

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Нові рішення в
сучасних технологіях**

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: New solutions in
modern technology**

№ 3(17)' 2023

No. 3(17)' 2023

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2023

Kharkiv
NTU "KhPI", 2023

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2023. — № 3(17). — 64 с. — ISSN 2079-5459.

Видання публікує наукові результати та досягнення мультидисциплінарних досліджень молодих науковців широкого профілю у сферах машинобудування, енергетики, технологій органічних і неорганічних речовин, екології, інформаційних технологій і систем управління, техніки та електрофізики високих напруг, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

The journal publishes scientific results and accomplishments of multidisciplinary researches of young scientists of a wide profile in the field of machine building, energy, technologies of organic and inorganic substances, ecology, information technologies and control systems, high voltage techniques and electrophysics, as well as on the fundamental aspects of modern technologies.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України КВ № 23776-13616 від 14 лютого 2019 року.

Мова статей – українська, англійська.

Офіційний сайт видання: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», **категорія «Б»** (накази МОН України № 409 від 17.03.2020 р. та №886 від 02.07.2020 р.).

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Авдєєва О. П., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Байрачний В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Березка Т. О., НТУ «ХПІ», Україна

Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Бурлака М. В., SoftInWay Inc., США

Глушко А. В., НТУ «ХПІ», Україна

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Гринченко Н. Г., доц., ХДУХТ, Україна

Данильченко Д. О., НТУ «ХПІ», Україна

Демидов І. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Єнікєєв О. Ф., доц., ДДМА, Україна

Заковоротний О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Колодяжна Л. В., ІПМаш НАНУ, Україна

Костик К. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Куліченко В. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Ларін О. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Львов Г. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Мазасва В. С., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

Меньшикова С. І., НТУ «ХПІ», Україна

Мінакова К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Моїсєєв В. Ф., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Ноздрачова К. Л., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Носенко Т. Т., проф., НУХТ, Україна

Папченко В. Ю., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

Піментел С. Р., проф., Федеральний Університет Гояс, Бразилія

Пітак І. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Плеснецов С. Ю., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Руденко С. С., НДПІКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», Україна

Селін Р. В., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна

Сучков Г. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Тихомірова Т. С., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Томашевський Р. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Філенко О. М., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Хохлов М. А., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна

Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шестопапов О. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Шідакова-Каменюка О. Г., доц., ХДУХТ, Україна

Editorial staff

Associate editor:

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of NASU, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Avdieieva O. P., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Bairachnyi V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Berezka T. O., NTU "KhPI", Ukraine

Bragina L. L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Burlaka M. V., SoftInWay Inc., United States

Glushko A. V., NTU "KhPI", Ukraine

Gorash Ye., prof., University of Strathclyde, UK

Grynchenko N. G., docent, HDUHT, Ukraine

Danylchenko D. O., NTU "KhPI", Ukraine

Demidov I. N., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Yenikieiev O. F., docent, DSEA, Ukraine

Zakovorotniy A. Yu., prof., NTU "KPI", Ukraine

Kolodyazhnaya L. V., IPMash NASU, Ukraine

Kostyk K. O., prof., NTU "KPI", Ukraine

Kulichenko V. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Larin A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Lvov G. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Mazaeva V. S., UkrRIOF NASU, Ukraine

Menshikova S. I., NTU "KhPI", Ukraine

Minakova K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Moiseev V. F., prof., NTU "KPI", Ukraine

Nozdrachova K. L., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Nosenko T. T., prof., NUFT, Ukraine

Papchenko V. Yu., UkrRIOF NASU, Ukraine

Pimentel S., prof., Federal University of Goias, Brazil

Pitak I. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Plesnetsov S. Yu., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Rudenko S. S., RDI "Molniya" NTU "KhPI", Ukraine

Selin R. V., E.O. Paton EWI NASU, Ukraine

Suchkov G. M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Tykhomyrova T. S., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Tomashevskiy R. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Filenko O. M., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Khokhlov M. A., E.O. Paton EWI NASU, Ukraine

Shevchenko S. Yu., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shestopalov A. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Shidakova-Kamenyuka E. G., docent, HDUHT, Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 7 від 15 вересня 2023 р.

УДК 621.318

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.01

THE RESONANT AMPLIFIER OF THE ACTIVE ELECTRICAL POWER WITH ADDITIONAL VOLTAGE SOURCE. SUGGESTIONS, ANALYSIS, NUMERICAL ESTIMATES

Y. BATYGIN, T. GAVRILOVA*, S. SHINDERUK, E. CHAPLYGIN

Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE
*e-mail: gavrilo.hnadu@gmail.com

ABSTRACT The problem of increasing energy saving in industry leads to the need to develop new technical devices. The paper presents and analyzes the circuit of the resonance amplifier of active electric power, evaluates the characteristics of electromagnetic processes for the fundamental substantiation of the operation of real devices based on this circuit. Mathematical analysis of electromagnetic processes taking place was carried out using strict methods of the theory of electric circuits. The advantages of this scheme in comparison with similar previous proposals are shown. The device includes four active-reactive circuits that are inductively connected. The first of them is an input circuit with a harmonic signal source that needs to be amplified. The second circuit generates enhanced reactive power in the "voltage resonance" mode. The third circuit with an additional voltage source provides reactive power output from the second circuit in the "resonance of currents" mode without adverse effects on amplification processes. The fourth circuit, inductively connected to the third circuit, contains an output load - a resistor that simulates the allocation of active power. On the basis of the analysis and numerical evaluation of the characteristics of the processes taking place in the proposed scheme of the resonance amplifier of active electric power, its basic efficiency is shown. The calculations of the experimental model made it possible to formulate recommendations for the selection of circuit elements of a working resonant amplifier with a high efficiency for low-impedance output loads. The considered real parameters of the device make it possible to minimize the dissipation of the energy of converted electrical signals and to increase the amplification factor of the electric power of harmonic currents and voltage by choosing the element base. The obtained results can be considered as practical recommendations for the creation of real devices for amplifying active electric power for use in various industries.

Keywords: resonant amplifier of the active power; active-reactive electrical circuits; voltage resonance; current resonance.

РЕЗОНАНСНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ АКТИВНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ДОДАТКОВИМ ДЖЕРЕЛОМ НАПРУГИ. ПРОПОЗИЦІЇ, АНАЛІЗ, ЧИСЛОВІ ОЦІНКИ

Ю. В. БАТИГІН, Т. В. ГАВРИЛОВА, С. О. ШИНДЕРУК, Є. О. ЧАПЛИГІН

Кафедра фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ Проблема підвищення енергозбереження у промисловості призводить до необхідності розробки нових технічних пристроїв. В роботі представлена та проаналізована схема резонансного підсилювача активної електричної потужності, проведені оцінки характеристик електромагнітних процесів для фундаментального обґрунтування роботи реальних приладів на основі даної схеми. Математичний аналіз електромагнітних процесів, що відбуваються, проводився строгими методами теорії електричних контурів. Показано переваги даної схеми в порівнянні з аналогічними попередніми пропозиціями. У складі приладу розглянуті чотири активно-реактивних контури, які індуктивно пов'язані між собою. Перший з них – це вхідний контур з джерелом гармонічного сигналу, який необхідно посилити. Другий контур генерує посилену реактивну потужність в режимі «резонанс напруги». Третій контур з додатковим джерелом напруги здійснює вихід реактивної потужності з другого контуру в режимі «резонанс струмів» без зворотного впливу на процеси підсилення. Четвертий контур, індуктивно з'єднаний з третім контуром, містить вихідне навантаження – резистор, який моделює виділення активної потужності. На основі аналізу та чисельної оцінки характеристик процесів, що протікають у запропонованій схемі резонансного підсилювача активної електричної потужності, показана її принципова працездатність. Проведені розрахунки експериментальної моделі дозволили сформулювати рекомендації щодо вибору елементів схеми робочого резонансного підсилювача з високим коефіцієнтом корисної дії для низькоомних вихідних навантажень. Розглянуті реальні параметри приладу дозволяють шляхом вибору елементної бази виключити до мінімуму розсіювання енергії перетворених електричних сигналів і підвищити коефіцієнт підсилення електричної потужності гармонічних струмів та напруги. Отримані результати можна розглядати як практичні рекомендації для створення реальних пристроїв для підсилення активної електричної потужності при застосуванні у різних галузях промисловості.

Ключові слова: резонансний підсилювач активної напруги; активно-реактивні електричні кола; резонанс напруги; резонанс струмів.

Introduction

The growing energy needs of mankind is evident in our time all over the world. The increasing role of

electricity both in industry and in everyday life is emphasized, for example, in works [1-3]. One of the general directions for solving the energy challenges of today is the development and

improvement of alternative energy sources [4-7]. However, at present, we still have quite a lot of unresolved issues that do not allow us to consider such a direction as finally sufficient. Another direction can be considered the development of technical devices that would make it possible to improve the energy performance of existing energy sources, for example, on the basis of resonance phenomena.

As it follows from the information generalization represented in the different scientific publications the resonance can be a key to the energetic spike in the oscillatory systems of the different physical nature. For example, the historical facts of the bridge constructions mechanical destroying are well known to the world science but they are non-obvious in the sense of their physical causality. There are many analogical questions to the resonant phenomena appearance in the heat processes, the electrical circuits and much other. Their analysis leads to the fundamental question formulation about a source the energy of which allows fulfilling a work what is impossible in traditional understanding of the physical processes cause-effect tie. There are different hypothesizes the essence of which consists in some universal substance existence which possess by the great energetic potential (for example, it can be the "dark matter", the "physical vacuum", the ether etc.). In dependence on the realization conditions this potential can become apparent in a sharp burst kind of the thermal energy, of the nuclear energy and of the electromagnetic energy [8-10]. Not stopping on the works dedicated to the fundamental questions of our Universe structure the undoubted interest of the world public to the known technical elaborations which are directed to solution of the modern power engineering problems should particularly extracted [11].

The efficiency of the electric resonance-rectifier circuit for the renewable energy conversion is analyzed in the work [12]. The scientific edition [13] is dedicated to a concise technical overview of energy technology: the sources of energy, energy systems and frontier conversion. Here are the advanced converters, catalysts, fuel cells, membranes, metal-hydrides, refrigerators and M.H.D. solar cells, finally.

The articles [14,15] illuminate the theoretical investigations of the electromagnetic processes in Tesla transformer which was the first technically realized suggestion of the voltage resonant amplifier. The got results and the numerical estimates agree well with the qualitative conclusions of the Great Inventor. Appearance of the Patent [16] is conditioned by the practical interest to the power resonant amplify. The subject of the invention is related to the impact excitation systems in the electrical power engineering but it can find application in the uninterrupted power supply units, in the electromagnetic vibration transmitting apparatuses etc. Finally, the work [17] is dedicated to the experimental justification of the electrical power resonant amplifier workability. To the authors opinion the main result of the conducted investigations is the experimental fact when the output reactive electrical power exceeds more than ~33 times of the source input power. Of practical interest is the development of a circuit of a resonant amplifier of electrical energy, where (unlike the previous analogue) active electrical energy is generated, which can be physically used to perform various works, for example, for the systems proposed by the authors of the works [18,19] for non-contact work on repairing vehicles.

The aim of the work

The aim of the present investigation is the scheme suggestion of the active electrical power resonant amplifier, analysis and numerical estimates of the flowing electromagnetic processes characteristics for the principally justification of the suggested scheme real workability.

1. Problem formulation, main calculation dependencies

1.1. Electrical scheme, action principle

The electrical equivalent scheme of the suggested resonant amplifier of the active electrical power consisting of the four resonant circuits is represented on Fig. 1.

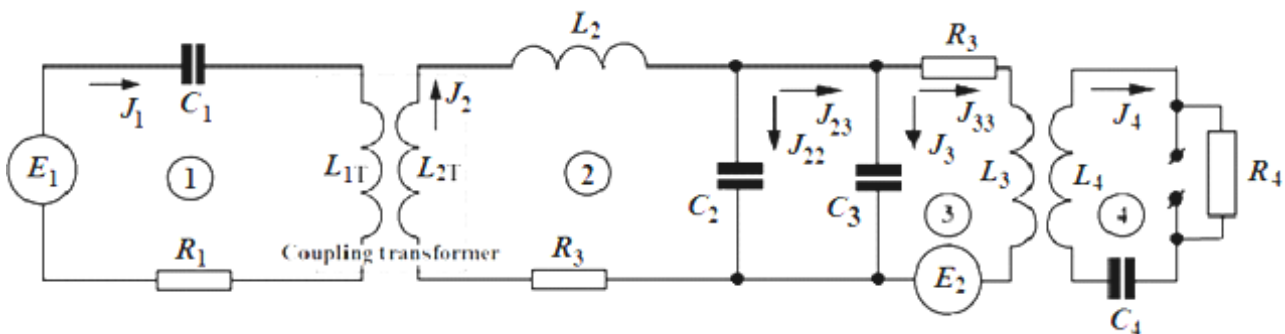


Fig. 1 - Electrical equivalent scheme of the resonant amplifier of the active electrical power

The first of them – 1 with source of the harmonic voltage – E_1 – the amplifier input circuit. Its current and voltage transmit to the second serial circuit – 2 with help of the coupling transformer « $L_{1T} - L_{2T}$ ». Here the amplified reactive power from the output element (the capacitance – C_2) transmits to input (the capacitance – C_3) of the parallel resonant circuit – 3. The latter one is inductively coupled with the serial circuit – 4 the output element of which is modeled by resistor – R_4 . This is the load where the amplified active electrical power is liberated.

The particularity of the suggested scheme consists in what the parallel circuit – 3 contains the additional source of the harmonic voltage – E_2 . Its appointment consists in the conditions creation for the “current resonance” regime in which a back influence on the serial circuit – 2 is excluded.

A relation of the active power in the output element of the circuit – 4 (load, resistor – R_4) to the power of the energy source in the input circuit – 1 is the quantitative index of the electromagnetic energy conversion in suggested scheme of the resonant amplifier of the active electrical power.

1.2. Problem formulation

Let's consider the proposed scheme and its parameters in more detail.

- The input serial circuit 1 contains the capacitance C_1 , the inductance L_{1T} (primary the winding of the coupling transformer between the circuits 1–2), the active resistance R_1 and the source of the harmonic voltage $E_1(t) = E_1 \cdot \sin(\omega t)$ (E_1 is the amplitude, ω is the angular frequency, t – the time).

- The amplifying serial circuit 2 contains the inductance L_{2T} (this is the secondary winding of the coupling transformer between the circuits 1–2), the capacitance C_2 (the output element), the inductance L_2 and active resistance R_2 (this can be the resistance of the winding inductances and coupling wires).

- The parallel circuit 3 contains the capacitance C_3 , the active resistance R_3 (the resistance of the windings inductances and the coupling wires), the inductance L_3 and the additional source of the harmonic voltage $E_2(t) = E_2 \cdot \sin(\omega t)$ (E_2 is the amplitude).

- The output serial circuit 4 contains the inductance L_4 the capacitance C_4 and the resistor R_4 , which models the amplifier active load.

- The frequencies of all resonant circuits are equal to each other $\omega_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$; $\omega_2 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$; $\omega_3 = 1/\sqrt{L_3 C_3} = \omega_4 = 1/\sqrt{L_4 C_4}$ – the amplifier resonant frequency: $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega$.

The main task of the research is to evaluate the integrated efficiency of the amplifier as a whole by

finding the appropriate gain coefficients depending on the parameters of this circuit.

1.3. Main calculation dependencies

The calculation dependencies for the workability theoretical justification of the suggested scheme are based on the physically “transparent” phenomenological statements and the strict mathematical approach with the electrical circuit theory methods usage [20].

We shall start from the “output” circuits of the amplifier resonant.

According to the equivalent scheme on Fig.1 the state equations in the serial and parallel circuits – 3 and 4 accept the view [20]:

$$\begin{cases} R_4 \cdot J_4 + i\omega(k_{34} \cdot \sqrt{L_3 L_4}) \cdot J_{33} = 0; \\ (i\omega L_3 + R_3) \cdot J_{33} + i\omega(k_{34} \cdot \sqrt{L_3 L_4}) \cdot J_4 - \\ -E_2 = U_{C_3}; \\ J_3 = i\omega C_3 \cdot U_{C_3}, \end{cases} \quad (1)$$

where $k_{34} \in [0,1]$ is the coefficient of the electromagnetic coupling level between the circuit 3 and the circuit 4; J_4 is the current in the circuit 4 with the inductance L_4 , with the capacitance C_4 and the active resistance of the load R_4 ; J_{33} , J_3 are the currents in branches of the circuit 3; J_{33} is the current in the branch with the inductance L_4 , with active resistance R_3 and additional source of the harmonic voltage E_2 ; J_3 is the current in the branch with the capacitance C_3 ; U_{C_3} is the voltage on the capacitance C_3 .

The currents being excited can be found from the linear algebraic equations system (1) [18].

$$\begin{cases} J_4 = -\frac{i\omega(k_{34} \cdot \sqrt{L_3 L_4})}{R_4} \cdot J_{33}; \\ J_{33} = \frac{U_{C_3} + E_2}{(i\omega L_3 + R_3 \cdot (1 + k_{34}^2 \cdot Q_3 \cdot Q_4))}; \\ J_3 = i\omega C_3 \cdot U_{C_3}, \end{cases} \quad (2)$$

where $Q_3 = \frac{\omega L_3}{R_3}$, $Q_4 = \frac{\omega L_4}{R_4}$ are the Q -factors of the circuits 3 and 4 correspondingly.

The current J_{23} in the output from the capacitance C_2 can be determined as sum the currents in the branches of the parallel circuit taking into account the resonance:

$$J_{23} = J_3 + J_{33} = \frac{\left(E_2 + iU_{C_3} \left(\frac{1}{Q_3} + k_{34}^2 Q_4 \right) \right)}{R_3 \left(iQ_3 + (1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) \right)}. \quad (3)$$

From (3) we receive that for $J_{23} = 0$ the next condition has to be fulfilled:

$$E_2 = -i \cdot U_{C_3} \cdot \left(\frac{1}{Q_3} + k_{34}^2 \cdot Q_4 \right). \quad (4)$$

It should be marked that in practices, the necessary voltage of the additional source can be determined when the voltage amplitude variation till to obtain the zero current in the input to the circuit 3 from the capacitance C_2 in the circuit 2.

With help of (2) and (4) we find the voltage and current in the load active resistance R_4 :

$$\begin{cases} U_4 = U_{C_3} \cdot \left(k_{34} \cdot \sqrt{\frac{L_4}{L_3}} \right) \cdot e^{-i \cdot \frac{\pi}{2}}; \\ J_4 = \frac{U_{C_3}}{R_4} \cdot \left(k_{34} \cdot \sqrt{\frac{L_4}{L_3}} \right) \cdot e^{-i \cdot \frac{\pi}{2}}. \end{cases} \quad (5)$$

Let us return to analysis of the condition (4). If this condition is fulfilled the "current resonance" regime is excited in the parallel circuit 3. The current in the output from the capacitance C_2 to the circuit 3 is equal to zero ($J_{23} = 0$). The electromagnetic processes in the resonant circuits 2 and 1 are flowing independently on the processes in the circuits 3 and 4.

The last final conclusion allows analyzing excitation of the circuit 2 and 1 by the source of the harmonic voltage E_1 without any coupling with the circuits 3 and 4.

The state equations system has the view [20]:

$$\begin{cases} E_1 = \left(i \left(\omega L_{1T} - \frac{1}{\omega C_1} \right) + R_1 \right) J_1 + i\omega M_{12} J_2; \\ -i\omega M_{12} J_1 = \left(i \left[\omega L_{2S} - \frac{1}{\omega C_2} \right] + R_2 \right) J_2; \end{cases} \quad (6)$$

where J_1 and J_2 are the currents in the circuits 1 and 2, correspondingly; $M_{12} = k_{12} \cdot \sqrt{L_{1T} L_{2T}}$ is the mutual inductance; $k_{12} \in [0,1]$ is the coefficient of the electromagnetic coupling level between the circuits 1-2; $L_{2S} = (L_{2T} + L_2)$ is the summary inductance of the circuit 2.

Under resonance conditions

$$\omega \cdot L_{2S} - 1 / \omega C_2 = 0; \quad \omega L_{1T} - 1 / \omega C_1 = 0$$

the equations system (6) accepts the view:

$$\begin{cases} E_1 = J_1 R_1 + i\omega M_{12} J_2 - \\ -i\omega M_{12} J_1 = R_2 J_2 \end{cases}. \quad (7)$$

The expressions for the currents being excited can be got from (7)

$$\begin{cases} J_1 = E \cdot \frac{R_2}{(\omega M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2}, \\ J_2 = -i \cdot \frac{E_1}{Z}, \end{cases} \quad (8)$$

where

$$Z = \frac{(\omega M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2}{\omega M_{12}}.$$

Should mark that parameter Z in (8) can be interpreted as a module of the equivalent inductive resistance. It ties the source power voltage E_1 with the resonant current J_2 in the second circuit. And as it follows from the corresponding expression in (8) this tie has the strictly inductive character.

Let us rewrite the corresponding expression for J_2 separately for strict clearness in the further analysis of the flowing electromagnetic processes

$$J_2 = -i \cdot \frac{E_1}{Z}, \quad (9)$$

where

$$Z = \frac{(\omega M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2}{\omega M_{12}}.$$

Obviously, the functional dependence $Z = Z(\omega M_{12})$ has to have a minimum what determines a maximum of the current J_2 as of function of the argument $-(\omega M_{12})$.

The necessary condition of the extremum existence for the function $Z = Z(\omega M_{12})$ is being written in the view [12]:

$$\frac{dZ(\omega M_{12})}{d(\omega M_{12})} = \frac{(\omega M_{12})^2 - R_1 R_2}{(\omega M_{12})^2} = 0. \quad (10)$$

As it follows from the expression (10), the equivalent resistance module reaches the minimum under $(\omega M_{12})_{\min} = \sqrt{R_1 \cdot R_2}$. And

the corresponding resistance minimum will equal to –
 $Z_{\min} = 2\sqrt{R_1 \cdot R_2}$.

In the terms of the parameters of the circuits – 2 and 1 the realization condition of the minimal value of the equivalent resistance Z has the view:

$$\omega k_{12} \sqrt{L_{1T} L_{2T}} = \sqrt{R_1 R_2}. \quad (11)$$

The estimate of the electromagnetic coupling coefficient which provides the secondary current maximum $J_{2\max}$ follows from the expression (11)

$$k_{12\max} = \sqrt{\frac{R_1 R_2}{(\omega L_{1T}) \cdot (\omega L_{2T})}}. \quad (12)$$

Physically, the found minimum of the equivalent resistance tinging the secondary current with the voltage E_1 of the power source and determining the maximum power amplifying can be explained by the minimally possible return of the energy from the secondary circuit 2 to the primary circuit 1. At that all this process is being provided by the electromagnetic coupling level between the circuits correspondingly to the formula (12).

To calculate the integral coefficient of the active electrical power conversion in the suggested scheme of the resonant amplifier the formulas should be written for the current in the circuit 1 and the voltage in the “output element” – L_2 of the circuit 2

$$\begin{cases} J_1 = \frac{E}{2R_1}; \\ U_{C_2} = -E_1 \frac{1}{2\omega C_2 \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}} = \\ = \left\| \frac{1}{\omega C_2} = \omega L_{2S} \right\| = -E_1 \frac{\omega L_{2S}}{2\sqrt{R_1 \cdot R_2}}. \end{cases} \quad (13)$$

Taking into account that $U_{C_3} = U_{C_2}$, after substitution of the expression for U_{C_2} to (5) we find the voltage and current in the load active resistance R_4 .

$$\begin{cases} U_4 = -E_1 \frac{\omega L_{2S}}{2\sqrt{R_1 \cdot R_2}} \left(k_{34} \sqrt{\frac{L_4}{L_3}} \right), \\ J_4 = -E_1 \frac{\omega L_{2S}}{2R_4 \sqrt{R_1 \cdot R_2}} \left(k_{34} \sqrt{\frac{L_4}{L_3}} \right). \end{cases} \quad (14)$$

According to (13) and (14) the power amplitudes in the circuit 1, in the circuit 2 and

in the circuit 4 (the amplifier output of the active electrical power) will be determined by the following dependencies

$$\begin{cases} P_{1m} = \frac{E_1^2}{2R_1}, \\ P_{2m} = \frac{E_1^2 Q_2}{R_1 4}, \\ P_{4m} = E_1^2 \frac{R_2}{4R_4 \cdot R_1} Q_2^2 \left(k_{34}^2 \frac{L_4}{L_3} \right), \end{cases} \quad (15)$$

where $Q_2 = \frac{\omega L_{2S}}{R_2}$ is the Q-factor of the circuit 2.

The conversion coefficients of the electrical power in the suggested scheme of the resonant amplifier can be found as the relations of the corresponding values from the expressions (15):

a) from circuit 1 to circuit 2

$$K_{1-2} = \frac{P_{2m}}{P_{1m}} = \frac{Q_2}{2};$$

b) from circuit 2 to circuit 4

$$K_{2-4} = \frac{P_{4m}}{P_{2m}} = \left(\frac{L_{2S}}{L_3} \right) k_{34}^2 Q_4; \quad (16)$$

c) from circuit 1 to circuit 4,

$$K_{1-4} = \frac{P_{4m}}{P_{1m}} = \frac{Q_2}{2} \left(\frac{L_{2S}}{L_3} \right) k_{34}^2 Q_4.$$

The introduced power P_{E_2} (of the additional source) normalized on the power P_{2m} which is introduced from the circuit 2 (under the resonant conditions) is being determined by the expression:

$$\left| \frac{P_{E_2}}{P_{2m}} \right| = \left(\frac{1}{Q_3} + k_{34}^2 \cdot Q_4 \right), \quad (17)$$

where $P_{2m} = \frac{U_{L_3}^2}{\omega L_3}$ is the power introduced from the circuit 2 in the terms of the parameters of the circuit 3.

For practice, the formula allowing the efficiency integral estimation of the amplifier in the whole is interesting. It can be got as relation:

$$K_{1-4}^{(E_2)} = \left| \frac{P_{4m} - P_{E_2}}{P_{2m}} \right| = \frac{Q_2}{2} \cdot \left(k_{34}^2 Q_4 \left(\frac{L_{2S}}{L_3} - 1 \right) - \frac{1}{Q_3} \right), \quad (18)$$

where P_{4m} is the output power in the load active resistance in the terms of the amplifier parameters.

As it follows from the formula (18) the active power in the load which is determined with taking into account power of the additional source can be considered as some efficiency conditional characteristic which permits evaluating the minimally possible value of the output power in the scheme of the considered amplifier.

1.4. Analysis, numerical estimates

From physical consideration it is obvious that for the amplifier efficiency maximum a contribution of the power additional source in exciting the current resonance” in the parallel circuit has to be minimal. As it follows from dependencies (4), (17) and (18), for this it is necessary quite high Q -factor – $Q_3 \gg 1$ and quite weak electromagnetic coupling with the serial circuit in aggregate with quite small Q -factor, so that – $k_{34}^2 \cdot Q_4 \ll 1$. Simultaneously, the dependence for the power conversion coefficient – (16), (17) and (18) demands increasing parameter – $k_{34}^2 \cdot Q_4$.

The efficiency illustrations of the experimental model of the active power resonant amplifier are represented on Fig. 2, Fig. 3.

The following initial data were accepted for calculation: $\omega = 2\pi \cdot 25000$ Hz, $L_{1T} = L_{2T} = L_3 = 14,8 \mu\text{H}$, $L_2 = 169 \mu\text{H}$, $R_2 = 0,35 \text{ Ohm}$, $R_1 = R_3 = 0,1 \text{ Ohm}$, $k_{34} = 0,1$.

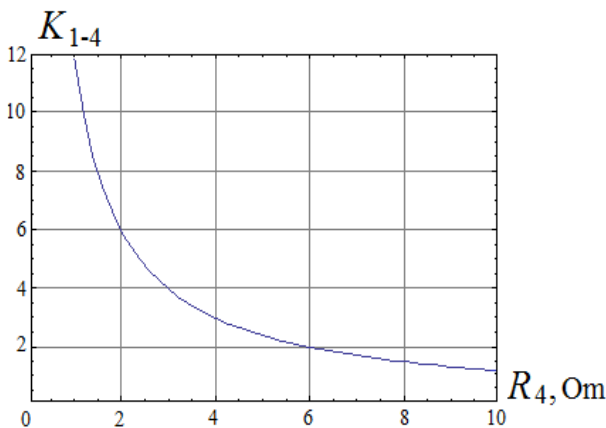


Fig. 2 – The amplifying efficiency of the active power as function from the load resistance without taking into account the power contribution of the additional source

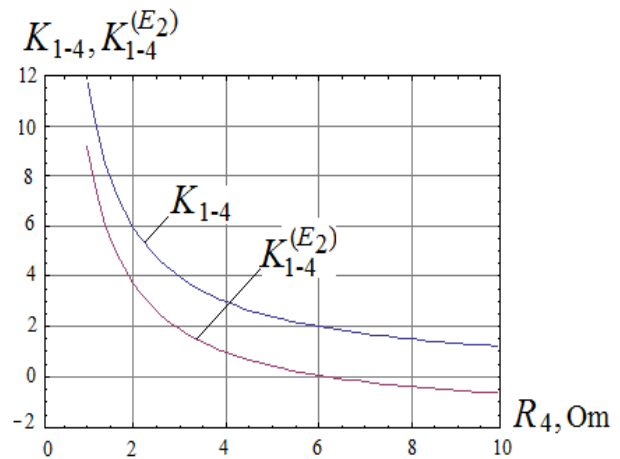


Fig. 3 – Illustration of the additional source power influence on the active power amplifying in dependence on the load resistance

Practically straight-proportional tie of the conversion integral coefficient and the power of the additional source follows from the calculations results on Fig. 2.

Really, a substitution of (17) into the expression for K_{1-4} from (16) leads to the relationship:

$$K_{1-4} = \frac{Q_2}{2} \cdot \left(\frac{L_{2S}}{L_3} \right) \cdot \left(\left| \frac{P_{E_2}}{P_{2m}} \right| - \frac{1}{Q_3} \right). \quad (19)$$

Physically, this tie supposes the growth possibility of the conversion coefficient but with the simultaneous growth of the power of the additional source.

Finally, last comment. The curves on Fig. 3 illustrate the output power falling down in the dependence on the load resistance with and without taking into account the power of the additional source.

Conclusions

The resonant amplifier scheme of the active electrical power which is represented by the series of the inductively coupled resonant circuits is suggested. The distinguishing particularity of the present suggestion is introduction of the additional source of the harmonic voltage what permits excluding the back influence of the output currents and voltages on the processes of their resonant amplifying.

An expression for the coefficient of integral transformation of the device is obtained, which is related to the power of the additional source and makes it possible to estimate the efficiency of the amplifier as a whole.

The conclusions about the real workability of the active power suggested amplifier are formulated on

the basing the numerical estimates and the characteristics analysis of the flowing processes.

Список літератури

1. Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. International Energy Agency, France: IEA Publications, 2017. doi: 10.1787/energy_tech-2017-en.
2. Petrović S. N., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A., Bühler F., Grandal R., Boucenna M., Balyk O. Exploring the long-term development of the ukrainian energy system. *Energies*. 2021. Vol. 22. no. 14. P. 7731. doi: 10.3390/en14227731.
3. Mengi-Dincer H., Ediger V. S., Yesevi C. G. Evaluating the International Renewable Energy Agency through the lens of social constructivism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 152. P. 111705. doi: 10.1016/j.rser.2021.111705.
4. Mercure J.-F., Salas P., Vercoulen P., Semieniuk G., Lam A., Pollitt H., Holden P. B., Vaklifard N., Chewpreecha U., Edwards N. R., Vinales J. E. Reframing incentives for climate policy action. *Nature Energy*. 2021. Vol. 12. no. 6. P. 1133-114. doi: 10.1038/s41560-021-00934-2.
5. Kies A., Schyska B., Bilousova M., Sayed O., Jurasz J., Stoecker H. Critical review of renewable generation datasets and their implications for European power system models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 152. P. 111614. doi: 10.1016/j.rser.2021.111614.
6. Gong E., Ali S., Hiragond C., Kim H., Powar N., Kim D., Kim H., In S.-I. Solar fuels: research and development strategies to accelerate photocatalytic CO₂ conversion into hydrocarbon fuels. *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 3. no. 15. P. 880-937. doi: 10.1039/D1EE027114J.
7. Barrows S., Homer J., Orrell A. Valuing wind as a distributed energy resource: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 152. P. 111678. doi: 10.1016/j.rser.2021.111678.
8. Whittaker Ed. T. *A History of the theories of ether and electricity Vol. 1: The classical theories* (2. ed.), London. Nelson Publ., 1951.
9. Etkin V. A. *The Theoretical Basis's of the Non-Fuel Power Engineering*. Altaspera Publ. & Literary Agency Inc., 2013.
10. Tesla N. *My Inventions and Other Writing*. Dover Drift Edition. Dover Publication Inc., 2016.
11. Shedleski Ty. *Inventions of Nikola Tesla: A Complete Set of Patents*. Book Shed. 2014.
12. Boström C., Ekergård B., Leijon M. Electric resonance-rectifier circuit for renewable energy conversion. *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 100(4). doi: 10.1063/1.3680097.
13. Tokio Ohta. *Energy Technology: Systems, Sources and Frontier Conversion*. Elsevier Science Ltd., 2012. 245 p.
14. Batygin Yu. V., Serikov G. S., Shinderuk S. A. Main calculation relationships in double-circuit of the resonant amplifier of electrical power. *Bulletin of NTU "KhPI"*. 2018. Vol. 32(1308). P. 59-64.
15. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. *Danish Scientific Journal*. 2018. Vol. 11-1. P. 72-79.
16. Likhovid Yu. M. The resonant power amplifier. Patent UA №103215. 2015.
17. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S., Yeryomina E. F. Resonant electric power amplifier. Experimental

- research. *Promising technologies and devices*. 2018. Vol 13. P. 18-25.
18. Batygin Yu. V., Shinderuk S. O., Chaplygin E. O., Fendrikov D. V. Double-circuit resonant electric power amplifier for magnetic-pulse processing of metals. *Technical Electrodynamics*. 2022. Vol. 3. P. 29-36. doi: 10.15407/techmed2022.03.029.
19. Batygin Yu. V., Shinderuk S. O., Yeryomina O. F., Chaplygin E. A. Electromagnetic processes in a flat rectangular system with an inductor between thin bifilar coils. *Technical Electrodynamics*. 2021. Vol. 1. P. 3-9. doi: 10.15407/techmed2021.01.003.
20. Thomson J. J. *Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. Wentworth, 2016.
21. Kantorovich L. *Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics*. Springer Nature Switzerland AG, 2016. 526 p. doi: 10.1007/978-1-4939-2785-2.

References (transliterated)

1. Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. International Energy Agency, France: IEA Publications, 2017. doi: 10.1787/energy_tech-2017-en.
2. Petrović S. N., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A., Bühler F., Grandal R., Boucenna M., Balyk O. Exploring the long-term development of the ukrainian energy system. *Energies*, 2021, vol. 22, no. 14, pp. 7731, doi: 10.3390/en14227731.
3. Mengi-Dincer H., Ediger V. S., Yesevi C. G. Evaluating the International Renewable Energy Agency through the lens of social constructivism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 152, pp. 111705, doi: 10.1016/j.rser.2021.111705.
4. Mercure J.-F., Salas P., Vercoulen P., Semieniuk G., Lam A., Pollitt H., Holden P. B., Vaklifard N., Chewpreecha U., Edwards N. R., Vinales J. E. Reframing incentives for climate policy action. *Nature Energy*, 2021, vol. 12, no. 6, pp. 1133-114, doi: 10.1038/s41560-021-00934-2.
5. Kies A., Schyska B., Bilousova M., Sayed O., Jurasz J., Stoecker H. Critical review of renewable generation datasets and their implications for European power system models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 152, pp. 111614, doi: 10.1016/j.rser.2021.111614.
6. Gong E., Ali S., Hiragond C., Kim H., Powar N., Kim D., Kim H., In S.-I. Solar fuels: research and development strategies to accelerate photocatalytic CO₂ conversion into hydrocarbon fuels. *Energy & Environmental Science*, 2021, vol. 3, no. 15, pp. 880-937, doi: 10.1039/D1EE027114J.
7. Barrows S., Homer J., Orrell A. Valuing wind as a distributed energy resource: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 152, pp. 111678. doi: 10.1016/j.rser.2021.111678.
8. Whittaker Ed.T. *A History of the theories of ether and electricity vol. 1: The classical theories* (2. ed.), London. Nelson Publ., 1951.
9. Etkin V. A. *The Theoretical Basis's of the Non-Fuel Power Engineering*. Altaspera Publ. & Literary Agency Inc., 2013.
10. Tesla N. *My Inventions and Other Writing*. Dover Drift Edition. Dover Publication Inc., 2016.
11. Shedleski Ty. *Inventions of Nikola Tesla: A Complete Set of Patents*. Book Shed. 2014.
12. Boström C., Ekergård B., Leijon M. Electric resonance-rectifier circuit for renewable energy conversion. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100(4), doi: 10.1063/1.3680097.
13. Tokio Ohta. *Energy Technology: Systems, Sources and*

- Frontier Conversion*. Elsevier Science Ltd., 2012. 245 p.
14. Batygin Yu. V., Serikov G. S., Shinderuk S. A. Main calculation relationships in double-circuit of the resonant amplifier of electrical power. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2018, vol. 32(1308), pp. 59-64.
 15. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. *Danish Scientific Journal*, 2018, vol. 11-1, pp. 72-79.
 16. Likhovid Yu. M. The resonant power amplifier. Patent UA №103215. 2015.
 17. Batygin Yu. V., Shinderuk S. A., Serikov G. S., Yeryomina E. F. Rezonansnyj posyljuvach elektrychnoi' potuzhnosti. Eksperymental'ni doslidzhennja. *Perspektyvni tehnologii' ta pryklady*. 2018, vol. 13, pp. 18-25.
 18. Batygin Yu. V., Shinderuk S. O., Chaplygin E. O., Fendrikov D. V. Double-circuit resonant electric power amplifier for magnetic-pulse processing of metals. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2022, vol. 3, pp. 29-36, doi: 10.15407/techned2022.03.029.
 19. Batygin Yu. V., Shinderuk S. O., Yeryomina O. F., Chaplygin E. A. Electromagnetic processes in a flat rectangular system with an inductor between thin bifilar coils. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2021. vol. 1, pp. 3-9, doi: 10.15407/techned2021.01.003.
 20. Thomson J. J. *Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism*. Wentworth, 2016.
 21. Kantorovich L. *Mathematics for Natural Scientists. Fundamentals and Basics*. Springer Nature Switzerland AG, 2016. 526 p., doi: 10.1007/978-1-4939-2785-2.

Відомості про авторів (About authors)

Batygin Yuriy – Dr. of Science, Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Head of the Department of physics, Kharkiv, Ukraine; ORCID ID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Батигін Юрій Вікторович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна; ORCID ID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

Gavrilova Tetyana – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID ID: 0000-0002-3677-2219; e-mail: gavrilova.hnadu@gmail.com.

Гаврилова Тетяна Володимирівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна; ORCID ID: 0000-0002-3677-2219; e-mail: gavrilova.hnadu@gmail.com.

Shinderuk Svitlana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Шиндерук Світлана Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Chaplygin Evgeniy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Чаплігін Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

Please cite this article as:

Batygin Yu., Gavrilova T., Shinderuk S., Chaplygin E. The resonant amplifier of the active electrical power with additional voltage source. Suggestions, analysis, numerical estimates. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 3–10, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.01.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Батигін Ю. В., Гаврилова Т. В., Шиндерук С. О., Чаплигін Є. О. Резонансний підсилювач активної електричної потужності з додатковим джерелом напруги. Пропозиції, аналіз, числові оцінки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 3–10. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.01.

*Надійшла (received) 04.08.2023
Прийнята (accepted) 10.09.2023*

УДК 621.794.4: 546.681/682'19/86

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.02

EVALUATION OF ENERGY BAND STRUCTURE OF HALF-HEUSLER ALLOY LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{and Sb}$) USING FIRST PRINCIPLE CALCULATION

E. B. ETTAH¹, M. E. ISHAJE¹, K. A. MINAKOVA^{2*}, E. O. ASUQUO³, S. U. ODEY⁴

¹Department of Physics, Cross River University of Technology, Calabar, NIGERIA

²Department of Physics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

³Department of Chemistry, Cross River University of Technology, Calabar, NIGERIA

⁴Department of Curriculum and Instructional Technology, Cross River University of Technology, Calabar, NIGERIA

*e-mail: ksenia.minakova@khp.edu.ua

ABSTRACT The evaluation of energy band structure plays a vital role in understanding the electronic properties of materials. This research, we investigate the energy band structure of Half-Heusler alloys LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{and Sb}$) using a first principle approach based on Density Functional Theory (DFT). These alloys are of particular interest due to their potential applications in thermoelectric and spintronics devices. The corresponding Density of States (DOS) for the tripartite compounds LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{and Sb}$) have been calculated and the contributions of the Li, Zn, As, P and Sb orbital to the Density of States at ambient pressure. This also confirmed that LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{and Sb}$) is a semi-conductor with a narrow band-gap between the occupied and unoccupied regions around the Fermi level. The orbitals Li-1s, As-4p, As-4s, Zn-3d has the highest contributions. The dominant of the orbitals P-1s and P-2p before the Fermi-level and Zn-2p after the Fermi-level are observed. We observed the dominant of the orbitals Sb-1s, Sb-3d, Li-1s, Li-2s, Zn-3d shows weak hybridization and low contribution. This features indicates that the covalent bond between these two atoms is weak, and could be responsible for the mechanical instability observed in the calculation. Meanwhile the band structure calculated and presented has narrow band-gap of 0.625, 0.937 and 0.313 respectively for the tripartite compound LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{and Sb}$) and its a direct band-gap semiconductor. The obtained energy band structures provide valuable information about the electronic properties of LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{and Sb}$) alloys. The presence of band gaps is crucial for thermoelectric applications, as it indicates the presence of regions where electrons and holes are confined, enabling efficient charge transport.

Keywords: energy band structure; Half-Heusler alloys; density functional theory; dos; semiconductor; band-gap

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЗОННОЇ СТРУКТУРИ НАПІВГЕРСЛЕРОВОГО СПЛАВУ LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}$ та Sb) ЗА ДОПОМОГОЮ ПЕРШОГО ПРИНЦИПНОГО РОЗРАХУНКУ

E. B. ETTAH¹, M. E. ISHAJE¹, K. A. MINAKOVA², E. O. ASUQUO³, S. U. ODEY⁴

¹Кафедра фізики, Технологічний університет Кросс-Рівер, Калабар, НІГЕРІЯ

²Кафедра фізики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

³Кафедра хімії, Технологічний університет Кросс-Рівер, Калабар, НІГЕРІЯ

⁴Відділ навчальних програм і технологій навчання, Технологічний університет Кросс-Рівер, Калабар, НІГЕРІЯ

АНОТАЦІЯ Оцінка структури енергетичних зон відіграє важливу роль у розумінні електронних властивостей матеріалів. У цій роботі представлено дослідження структури енергетичних зон напівгерселерових сплавів LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{та Sb}$) за допомогою підходу першого принципу, основанийого на теорії функціонала густини (DFT). Ці сплави є особливо цікавими через їх потенційні застосування в термоелектричних та спінтронічних пристроях. Відповідна густина станів (DOS) для тричасткових сполук LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{та Sb}$) була розрахована, і внески орбіталей Li, Zn, As, P та Sb до густини станів при атмосферному тиску були визначені. Це також підтвердило, що LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{та Sb}$) є напівпровідником із вузькою забороненою зоною між зайнятими та незайнятими областями навколо рівня Фермі. Орбіталі Li-1s, As-4p, As-4s та Zn-3d мають найбільший внесок. Спостерігається переважання орбіталей P-1s та P-2p перед рівнем Фермі та Zn-2p після рівня Фермі. Також спостерігається переважання орбіталей Sb-1s, Sb-3d, Li-1s, Li-2s, Zn-3d зі слабкою гібридизацією та низьким внеском. Це свідчить про слабкий ковалентний зв'язок між цими двома атомами, що може бути відповідальним за спостережену механічну нестійкість при розрахунках. Тим часом розрахована та представлена структура енергетичних зон має вузьку заборонену зону розміром відповідно 0.625, 0.937 та 0.313 для тричасткової сполуки LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{та Sb}$), і це прямий напівпровідник з забороненою зоною. Отримані структури енергетичних зон надають цінну інформацію про електронні властивості сплавів LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{та Sb}$). Наявність забороненої зони є важливою для термоелектричних застосувань, оскільки це вказує на наявність областей, де електрони та дірки обмежені, що сприяє ефективному транспорту заряду.

Ключові слова: структура енергетичних зон; напівгерселерові сплави; теорія функціонала густини; густина станів; напівпровідник; заборонена зона

Introduction

Half-Heusler alloys have garnered significant attention in the field of materials science due to their

unique combination of properties, making them suitable for various technological applications. LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}, \text{and Sb}$) half-Heusler alloys, in particular, have emerged as promising candidates for thermoelectric

and spintronic devices. These materials exhibit interesting electronic properties such as high thermoelectric efficiency, spin polarization, and tunable band gaps, which are essential for efficient energy conversion and spin manipulation [1,2].

Thermoelectric materials have the ability to convert waste heat into electricity or vice versa, offering a sustainable approach for energy harvesting and cooling applications. The efficiency of thermoelectric devices depends on the dimensionless figure of merit (ZT), which is directly influenced by the energy band structure of the material. Therefore, a thorough understanding of the energy band structure is crucial for optimizing the thermoelectric performance of LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) alloys [3].

Additionally, the intriguing spintronic properties of these alloys make them attractive for spin-based electronic devices. Spintronics aims to exploit the spin of electrons, in addition to their charge, to develop devices with enhanced functionality and improved energy efficiency. By studying the energy band structure, one can gain insights into the spin-polarized states and spin transport properties of LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) alloys, facilitating the design and development of efficient spintronic devices [4].

The first principle approach based on density functional theory (DFT) has proven to be a powerful tool for investigating the electronic properties of materials. It allows for accurate calculations of the energy band structure, electronic density of states, and other fundamental properties without relying on empirical parameters [5]. By employing DFT simulations, we can obtain a comprehensive understanding of the energy band structure of LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) half-Heusler alloys and explore the potential applications of these materials.

The aim of this research is to evaluate the energy band structure of LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) half-Heusler alloys using a first principle approach based on density functional theory (DFT). By employing computational simulations, This paper seek to achieve the following objectives: Investigate the electronic properties and energy band structure of LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) alloys to gain a comprehensive understanding of their fundamental electronic behavior.

Determine the band gaps, band dispersion, and the nature of electronic states in LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) half-Heusler alloys to identify regions of efficient charge transport and potential for thermoelectric applications. Analyze the impact of substituting As, P, and Sb on the energy band structure of LiZn alloy to elucidate the influence of different elements on the electronic properties of these alloys. Provide insights into the potential applications of LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) half-Heusler alloys in thermoelectric and spintronic devices based on their energy band structure and electronic properties [6,7].

In research [1] conducted a theoretical investigation on the electronic structure and

thermoelectric properties of LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) half-Heusler alloys. Their DFT calculations revealed that LiZnAs possesses a direct band gap at the Γ -point, making it a potential candidate for efficient thermoelectric applications. LiZnP and LiZnSb were found to have indirect band gaps, indicating different charge transport mechanisms.

In another study [3] explored the effect of strain on the electronic properties of LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) half-Heusler alloys. Their DFT calculations demonstrated that applying strain can significantly modify the band structure, band gaps, and effective mass of charge carriers.

This work provided valuable insights into strain engineering for optimizing the thermoelectric performance of LiZn alloys.

Furthermore, [4] investigated the spin-dependent transport properties of LiZn ($X = \text{As, P, and Sb}$) half-Heusler alloys using spin-polarized DFT calculations. They revealed the presence of spin-polarized electronic states near the Fermi level, suggesting the potential for spintronic applications. The results indicated that LiZnAs exhibits high spin polarization, making it a promising material for spintronic devices.

The electronic band structure of a material can be calculated using the Schrödinger equation within the framework of density functional theory (DFT). The eigenvalue equation for the electronic wavefunctions (ψ) and energy levels (E) is given by:

$$H\psi = E\psi, \quad (1)$$

where H represents the Hamiltonian operator.

The electronic density of states (DOS) provides information about the distribution of electronic energy levels in a material. It can be obtained from the eigenvalues of the Hamiltonian using the following equation:

$$\text{DOS}(E) = \sum \delta(E - E_i), \quad (2)$$

where $\text{DOS}(E)$ is the density of states at energy E , E_i is the energy eigenvalue, and \sum represents the summation over all eigenstates.

The band gap (E_{gap}) is the energy difference between the top of the valence band (E_v) and the bottom of the conduction band (E_c) in a material. It determines the material's ability to conduct or insulate. The band gap can be calculated from the electronic band structure as:

$$E_{\text{gap}} = E_c - E_v. \quad (3)$$

The effective mass (m^*) characterizes the behavior of charge carriers (electrons or holes) in a material. It can be derived from the curvature of the energy bands near the band extrema using the following equation:

$$m^* = \hbar^2 / (\partial^2 E / \partial k^2), \quad (4)$$

where m^* is the effective mass, \hbar is the reduced Planck's constant, E is the energy, and k is the wavevector.

These equations provide the fundamental tools for analyzing the energy band structure and electronic properties of materials using density functional theory (DFT) calculations [8].

Methodology

This study, we employ the first principle approach based on density functional theory (DFT) to evaluate the energy band structure of LiZnX ($X = \text{As, P, and Sb}$) half-Heusler alloys. DFT calculations are performed using appropriate exchange-correlation functionals, such as the generalized gradient approximation (GGA) or hybrid functionals. The pseudopotential method is used to describe the electron-ion interactions, and the plane-wave basis set is employed to expand the electronic wave functions. The density functional theory calculations were performed using Quantum Espresso simulation software package described above.

As stated earlier, this code uses plane wave and pseudo-potential methods to describe the electron-ion interaction. In this work, the exchange and correlation were described by Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) functional in form of General Gradient Approximation (GGA) [9]. Also, Projected Augmented Wave (PAW) was used to generate the pseudopotentials for the elements used in this work. The convergence of the total electronic energy as computed in plane wave pseudopotential code is determined by two key computational parameters, namely the number of basis functions (plane wave cut-off) and the number of K-points (K-spacing). In this work, the number of basis functions was determined by running series of self-consistent calculations for different values of kinetic energy cut-off ($ecutwfc$) starting from (10 to 100) Ry at an interval of 5 Ry.

The converged values of $ecutwfc$ is 70 Ry while the k-point value is 6k-point mesh. The two values assist in determining accurately the electronic ground state properties of the systems studied in this work. In the present work, a self-consistent ab-initio calculation using the Full Potential-Linearized Augmented Plane Wave (FP-LAPW) method within the frame of the spin-polarized density functional theory was used to study the structural properties of the Half-Heusler alloys LiZnX ($X = \text{As, P and Sb}$) in three phases (α, β and γ). The generalized gradient approximation (GGA) described by Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) was used.

Results and Discussion

The calculated corresponding Density of States (DOS) are as shown in Fig. 1, 2 and 3 respectively for the tripartite compounds LiZnX ($X = \text{As, P, and Sb}$) and the

contributions of the Li, Zn, As, P and Sb orbital to the Density of States at ambient pressure. This also confirmed that LiZnX ($X = \text{As, P, and Sb}$) is a semi-conductor with a narrow band-gap between the occupied and unoccupied regions around the Fermi level [10-13].

From Fig. 1, the orbitals Li-1s, As-4p, As-4s, Zn-3d has the highest contributions. While at Fig. 3, the dominant of the orbitals P-1s and P-2p before the Fermi-level and Zn-2p after the Fermi-level. Fig. 3 shows the dominant of the orbitals Sb-1s, Sb-3d, Li-1s, Li-2s, Zn-3d which represents weak hybridization and low contribution. These features indicates that the covalent bond between the two atoms is weak, and could be responsible for the mechanical instability observed in the calculation [14-16].

Meanwhile the band structure calculated and presented in Fig. 4, 5 and 6 has narrow band-gap of 0.625, 0.937 and 0.313 respectively for the tripartite compound LiZnX ($X = \text{As, P, and Sb}$) and its a direct band-gap semiconductor.

The obtained energy band structures provides valuable information about the electronic properties of LiZnX ($X = \text{As, P, and Sb}$) alloys. The presence of band gaps is crucial for thermoelectric applications, as it indicates the presence of regions where electrons and holes are confined, enabling efficient charge transport.

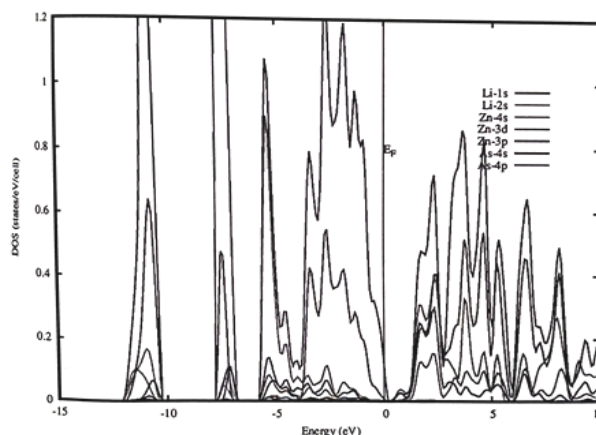


Fig.1 - The DOS of LiZnAs

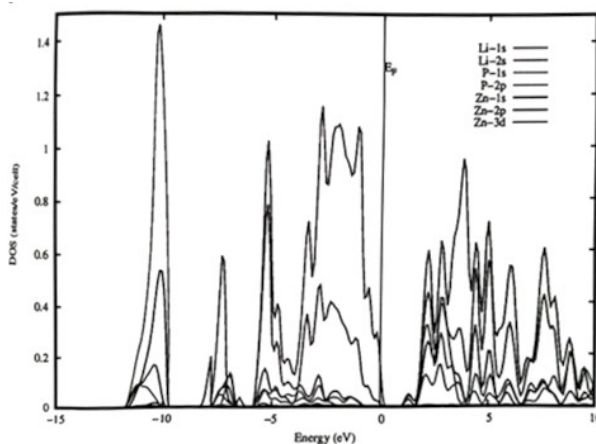


Fig.2 - The DOS of LiZnP

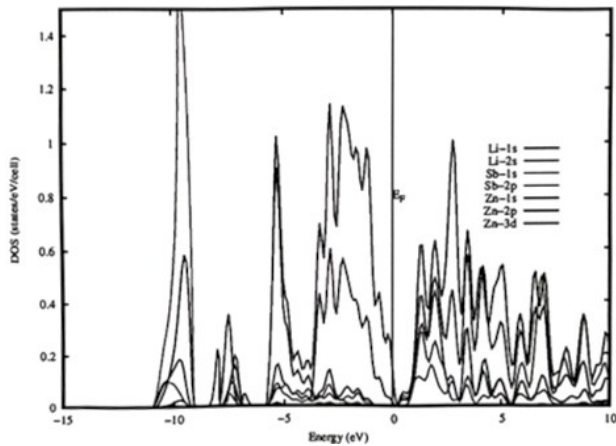


Fig.3 - The DOS of LiZnSb

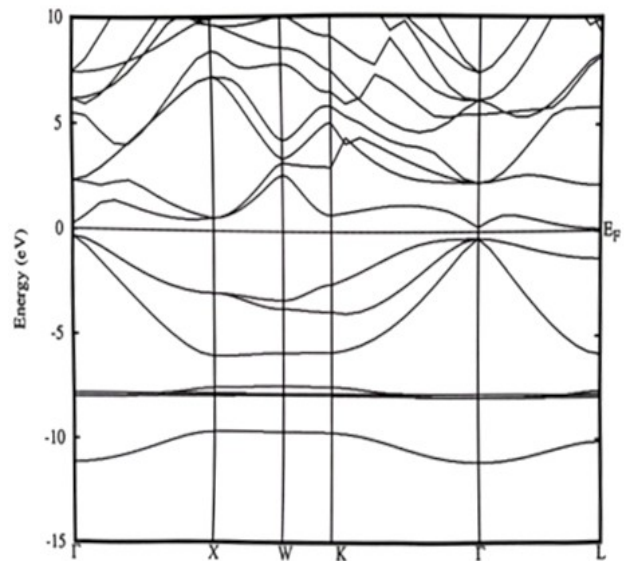


Fig.6 - The Band Structure of LiZnSb

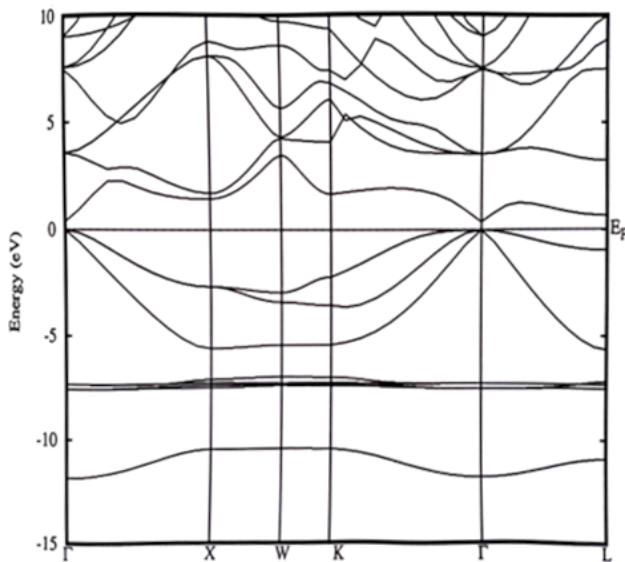


Fig.4 - The Band Structure of LiZnAs

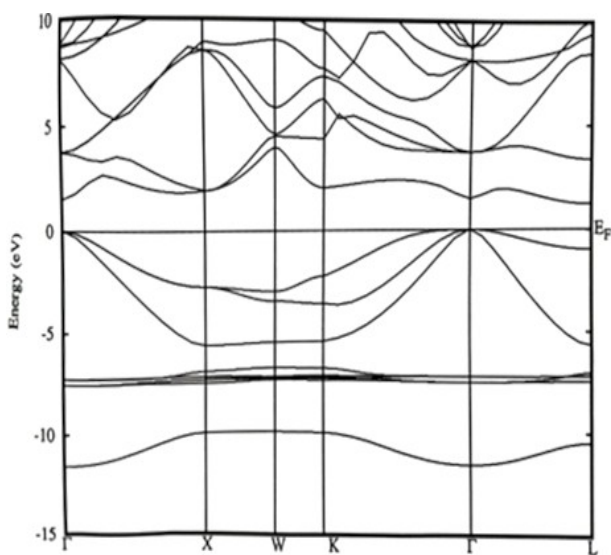


Fig.5 - The Band Structure of LiZnP

Furthermore, investigates the influence of the substitution of As, P, and Sb on the energy band structure of LiZn alloy. By systematically varying the concentration of these elements, we studied their impact on the band gap and electronic states. This analysis enables us to identify optimal compositions for enhanced thermoelectric properties or potential spintronic applications.

Conclusion

The evaluation of the energy band structure of LiZn (X = As, P, and Sb) Half-Heusler Alloys using a first principle approach provides valuable insights into the electronic properties of these materials.

The energy band structure of the Half-Heusler alloy LiZn (X = As, P, and Sb) describes the range of the energy levels that electrons may have within it, as well as the ranges of energy that they may not have. Band gaps are essentially leftover rangers of energy not covered by any band, a result of the finite widths of the energy bands. The bands have different widths, with the widths depending upon the degree of overlap in the atomic orbitals from which they arise.

Hence, LiZnX (X = As, P and Sb) is a Semiconductor material with narrow band-gap between the occupied and uncopied regions around the Fermi-Level. Furthermore, the Covalent bond between these two atoms is weak, and could be responsible for the mechanical instability observed in the calculation.

This research contributes to the fundamental understanding of these alloys and lays the foundation for further experimental investigations and device design based on LiZn (X = As, P, and Sb) alloys Half-Heusler materials.

Список літератури

- Zhang S., Liu Z., Liu Y. First-principles investigation on the electronic structure and thermoelectric properties of LiZn (X = As, P, and Sb) half-Heusler alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. 784. P. 1050-1057. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.01.315.
- Curnoe S. H., Cadogan J. M., & Graedel T. E. Half-Heusler alloys: *Fundamentals and applications*. *Journal of Materials Science*. 2011. 46(17). P. 32-36. doi:10.1007/s10853-010-5114-0.
- Wang Y., Zhang Y., & Wang Y. Strain-dependent electronic and thermoelectric properties of LiZn (X = As, P, and Sb) half-Heusler alloys: A first-principles study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. 855. P. 157297. doi:10.1016/j.jallcom.2020.157297.
- Liu X., Zheng Z., & Xu Z. First-principles study on spin-dependent transport properties of LiZn (X = As, P, and Sb) half-Heusler alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. 503. P. 166599. doi: 10.1016/j.jmmm.2020.166599.
- Nolas G. S., Cohn J. L., & Slack G. A. Semiconducting Ge-rich alloys in the TiNiSi structure. *Applied Physics Letters*. 2018. 79(2). P. 173-175. doi: 10.1063/1.1387641.
- Biswas K., & Blum I. D. High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures. *Nature*. 2012. 489(7416). P. 414-418. doi: 10.1038/nature11439.
- Chen L., & Wang X. L. Half-Heusler alloys for thermoelectric applications: A comprehensive review. *Chinese Physics B*. 2013. 22(6). P. 242-246. doi: 10.1088/1674-1056/22/6/067201.
- Hong J., Kim J., & Lee H. Y. Enhanced thermoelectric properties of half-Heusler LiZnSb alloys through alloying and resonant states. *Journal of Applied Physics*. 2020. 128(12). P. 125101. doi: 10.1063/5.0023882.
- Perdew P. J., Burke K., & Ernzerhof M. Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Physical Review Letters*. 1996. 77. P. 3865. doi: 10.1103/PhysRevLett.77.3865.
- Gospodarev I., Grishaev V., Manzhelii E., Syrkin E., Feodosyev S., Minakova K. Phonon heat capacity of graphene nanofilms and nanotubes. *Low Temperature Physics*. 2017. 43(2). P. 264-273. doi: 10.1063/1.4976448.
- Eremenko V., Sirenko V., Gospodarev I., Syrkin E., Feodosyev S., Bondar I., Minakova K. Electron and phonon states localized near the graphene boundary. *Low Temperature Physics*. 2017. 43(11). P. 1323-1331. doi: 10.1063/1.4989561.
- Eremenko V., Sirenko V., Gospodarev I., Syrkin E., Feodosyev S., Bondar I., Minakova K. Electron spectra of graphene with local and extended defects. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 969(1). P. 012021. doi:10.1088/1742-6596/969/1/012021.
- Sirenko V., Gospodarev I., Syrkin E., Feodosyev S., Minakova K. Low dimensional features of graphene nanostructure stability and vibrational characteristics. *Low Temperature Physics*. 2020. 46(3). P. 232-257. doi:10.1063/10.0001912.
- Feodosyev S., Gospodarev I., Syrkin E., Sirenko V., Bondar I., Minakova K. Propagation and localization of phonons in graphite and graphene nanofilms. *Low Temperature Physics*. 2022. 48(2). P. 121-125. doi: 10.1063/10.0004776.
- Feodosyev S., Gospodarev I., Sirenko V., Syrkin E., Bondar I., Minakova K. Features of the propagation of phonons in graphene nanostructures. Fast high-frequency phonons in a quasi-flexural mode. *Low Temp. Phys.* 2022. 48(8). P. 628-633. doi: 10.1063/5.0060314.
- Feodosyev S., Sirenko V., Syrkin E., Manzhelii E., Bondar I., Minakova K. Localized and quasi-localized energy levels in the electron spectrum of graphene with isolated boron and nitrogen substitutions. *Low Temp. Phys.* 2023. 49(1). P. 30-37. doi: 10.1063/5.0060314.

References (transliterated)

- Zhang S., Liu Z., & Liu Y. First-principles investigation on the electronic structure and thermoelectric properties of LiZn (X = As, P, and Sb) half-Heusler alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 784, pp. 1050-1057, doi:10.1016/j.jallcom.2019.01.315.
- Curnoe S. H., Cadogan J. M., & Graedel T. E. Half-Heusler alloys: *Fundamentals and applications*. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(17), pp. 32-36, doi:10.1007/s10853-010-5114-0.
- Wang Y., Zhang Y., & Wang Y. Strain-dependent electronic and thermoelectric properties of LiZn (X = As, P, and Sb) half-Heusler alloys: A first-principles study. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 855, pp. 157297, doi:10.1016/j.jallcom.2020.157297.
- Liu X., Zheng Z., & Xu Z. First-principles study on spin-dependent transport properties of LiZn (X = As, P, and Sb) half-Heusler alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 503, pp. 166599, doi:10.1016/j.jmmm.2020.166599.
- Nolas G. S., Cohn J. L., & Slack G. A. Semiconducting Ge-rich alloys in the TiNiSi structure. *Applied Physics Letters*, 2018, 79(2), pp. 173-175, doi:10.1063/1.1387641.
- Biswas K., & Blum I. D. High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures. *Nature*, 2012, 489(7416), pp. 414-418, doi:10.1038/nature11439.
- Chen L., & Wang X. L. Half-Heusler alloys for thermoelectric applications: A comprehensive review. *Chinese Physics B*, 2013, 22(6), pp. 242-246, doi:10.1088/1674-1056/22/6/067201.
- Hong J., Kim J., & Lee H. Y. Enhanced thermoelectric properties of half-Heusler LiZnSb alloys through alloying and resonant states. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(12), pp. 125101, doi:10.1063/5.0023882.
- Perdew P. J., Burke K., & Ernzerhof M. Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Physical Review Letters*, 1996, 77, pp. 3865, doi:10.1103/PhysRevLett.77.3865.
- Gospodarev I., Grishaev V., Manzhelii E., Syrkin E., Feodosyev S., Minakova K. Phonon heat capacity of graphene nanofilms and nanotubes. *Low Temperature Physics*, 2017, 43(2), pp. 264-273, doi:10.1063/1.4976448.
- Eremenko V., Sirenko V., Gospodarev I., Syrkin E., Feodosyev S., Bondar I., Minakova K. Electron and phonon states localized near the graphene boundary. *Low Temperature Physics*, 2017, 43(11), pp. 1323-1331, doi:10.1063/1.4989561.
- Eremenko V., Sirenko V., Gospodarev I., Syrkin E., Feodosyev S., Bondar I., Minakova K. Electron spectra of graphene with local and extended defects. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 969(1), p. 012021, doi:10.1088/1742-6596/969/1/012021.
- Sirenko V., Gospodarev I., Syrkin E., Feodosyev S., Minakova K. Low dimensional features of graphene nanostructure stability and vibrational characteristics. *Low Temperature Physics*, 2020, 46(3), pp. 232-257, doi:10.1063/10.0001912.
- Feodosyev S., Gospodarev I., Syrkin E., Sirenko V., Bondar I., Minakova K. Propagation and localization of phonons in graphite and graphene nanofilms. *Low Temperature Physics*, 2022, 48(2), pp. 121-125, doi: 10.1063/10.0004776.
- Feodosyev S., Gospodarev I., Sirenko V., Syrkin E., Bondar I., Minakova K. Features of the propagation of phonons in graphene nanostructures. Fast high-frequency phonons in a quasi-flexural mode. *Low Temp. Phys.* 2022, 48(8), pp. 628-633, doi: 10.1063/5.0060314.
- Feodosyev S., Sirenko V., Syrkin E., Manzhelii E., Bondar I., Minakova K. Localized and quasi-localized energy levels in the electron spectrum of graphene with isolated boron and nitrogen substitutions. *Low Temp. Phys.* 2023, 49(1), pp. 30-37, doi: 10.1063/5.0060314.

- graphene with local and extended defects. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 969(1), pp. 012021, doi:10.1088/1742-6596/969/1/012021.
13. Sirenko V., Gospodarev I., Syrkin E., Feodosyev S., Minakova K. Low dimensional features of graphene nanostructure stability and vibrational characteristics. *Low Temperature Physics*, 2020, 46(3), pp. 232-257, doi:10.1063/10.0001912.
14. Feodosyev S., Gospodarev I., Syrkin E., Sirenko V., Bondar I., Minakova K. Propagation and localization of phonons in graphite and graphene nanofilms. *Low Temperature Physics*, 2022, 48(2), pp. 121-125, doi:10.1063/10.0004776.
15. Feodosyev S., Gospodarev I., Sirenko V., Syrkin E., Bondar I., Minakova K. Features of the propagation of phonons in graphene nanostructures. Fast high-frequency phonons in a quasi-flexural mode. *Low Temp. Phys.*, 2022, 48(8), pp. 628-633, doi:10.1063/5.0060314.
16. Feodosyev S., Sirenko V., Syrkin E., Manzhelii E., Bondar I., Minakova K. Localized and quasi-localized energy levels in the electron spectrum of graphene with isolated boron and nitrogen substitutions. *Low Temp. Phys.*, 2023, 49(1), pp. 30-37, doi:10.1063/5.0060314.

Відомості про авторів (About authors)

Emmanuel Ettah – Ph. D., Associate Professor, Senior Researcher of Solid States Physics, Department of Physics, Cross River University of Technology, Calabar Nigeria; ORCID: 0009-0008-2037-7434, e-mail: emmanuelettah@unicross.edu.ng .

Еттах Еммануель – доктор філософії, доцент, старший науковий співробітник фізики твердого тіла, кафедра фізики, Технологічний університет Кросс-Рівер, м. Калабар, Нігерія, e-mail: emmanuelettah@unicross.edu.ng .

Michael E. Ishaje – Ph. D in-view, University Lecturer, Researcher in Theoretical Physics and Materials science, Department of Physics, Cross River University of the Technology, Calabar, Nigeria; ORCID: 0009-0006-4285-3812, e-mail: ishajemichael@unicross.edu.ng .

Ішай Майкл Е. – Ph.D in-view, викладач університету, дослідник у галузі теоретичної фізики та матеріалознавства, кафедра фізики, Технологічний університет Кросс-Рівер, м. Калабар, Нігерія; e-mail: ishajemichael@unicross.edu.ng .

Kseniia Minakova – Ph. D., Associate Professor, Associate Professor of Physics Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua .

Мінакова Ксенія Олександрівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна, e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua .

Esther Offiong Asuquo – Researcher, Biomaterials and Bio-energy Research Group, Department of Chemistry, Cross River University of Technology. Calabar, Nigeria; ORCID: 0000-0002-1161-8514; e-mail: estherasuquo@unicross.edu.ng .

Асукуо Естер Оффіон – дослідник, дослідницька група біоматеріалів і біоенергетики, кафедра хімії, Технологічний університет Кросс-Рівер, м. Калабар, Нігерія, e-mail: estherasuquo@unicross.edu.ng .

Stephen U. Odey – University Lecturer, Physics Education, Cross River University of Technology, Calabar, Nigeria; ORCID: 0009-0009-8822-3594; e-mail: odeysteve001@gmail.com .

Одей Стівен У. – викладач університету з фізики, Технологічний університет Кросс-Рівер, м. Калабар, Нігерія; ORCID: 0009-0009-8822-3594; e-mail: odeysteve001@gmail.com .

Please cite this article as:

Ettah E. B., Ishaje M. E., Minakova K. A., Asuquo E. O., Odey S. U. Evaluation of energy band structure of half-heusler alloy LiZnX (X = As, P, and Sb) using first principle calculation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 11–16, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.02.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Еттах Е. В., Ішай М. Е., Мінакова К. О., Асукуо Е. О., Одей С. У. оцінка енергетичної зонної структури напівгерслерового сплаву LiZnX (X = As, P та Sb) за допомогою першого принципного розрахунку. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 11–16. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.02.

Надійшла (received) 07.07.2023
Прийнята (accepted) 09.08.2023

УДК 662.75:621.593.3

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.03

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ФУЛЕРЕНОВИХ ПРИСАДОК У СУЧАСНИХ АВІАЦІЙНИХ ОЛИВАХ

**В. В. ЄФІМЕНКО^{1*}, В. П. ОЛЕКСАНДРЕНКО², Н. Г. КАЛМИКОВА¹, В. М. РУДЕНКО¹,
О. В. ЄФІМЕНКО¹**

¹ кафедра хімії і хімічної технології, Національний авіаційний університет, м. Київ, УКРАЇНА

² кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії, Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, УКРАЇНА
*e-mail: e.valerij.ua@gmail.com

АНОТАЦІЯ Проаналізовано можливості й доцільність застосування фулеренових присадок та їхній вплив на трибологічні властивості сучасних синтетичних авіаційних олів. Розглянуто метод підвищення протизносних властивостей синтетичних олів Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 для турбореактивних авіаційних двигунів шляхом добавки фулеренової присадки C₆₀. Показано, що протизносні властивості синтетичної Mobil Jet Oil 254 оливи для турбореактивних авіаційних двигунів перевищують понад 5 % оливу Mobil Jet Oil II, що стало наряду з іншими факторами причиною повного переводу гелікоптерів Airbus Helicopters H-145 на оливу Mobil Jet Oil 254. Збільшення концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу підшипників кочення вала турбіни гелікоптерів, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу та зростання критичного навантаження переходу до схоплення спостерігається. Це пояснюємо тим, що на відміну від тертя ковзання, при якому коефіцієнт тертя зменшується в десятки разів за рахунок можливості кочення молекул фулерену по графітовій поверхні, яке характеризується значно меншим тертям в порівнянні з ковзанням графітових поверхонь одна відносно іншої в силу більш високої площі контакту в останньому випадку. Із цього слідує, що фулерени виконують роль мікропідшипників кочення, які зменшують коефіцієнт тертя ковзання. Передбачено, що в підшипниках кочення кульки можливо перемелюють фулерени, як кульові млини, тому не спостерігається значного ефекту покращення протизносних властивостей олів при застосуванні фулеренових присадок. Встановлено, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах зміщує критичне навантаження в область більш високих значень. Використання фулеренів в якості протизносної присадки до олів для турбореактивних двигунів потребує проведення подальшого дослідження і обґрунтування

Ключові слова: фулеренові присадки; олива Mobil Jet Oil II; олива Mobil Jet Oil 254; чотирьохкулькова машина тертя; діаметр плями зносу; критичне навантаження

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF FULLERENE ADDITIVES IN MODERN AVIATION OILS

V. YEFYMENKO¹, V. OLEKSANDRENKO², N. KALMYKOVA¹, V. RUDENKO¹, O. YEFIMENKO¹

¹ Department of Chemistry and Chemical Technology, National Aviation University, Kyiv, UKRAINE

² Department of Industrial Mechanical Engineering and Agricultural Engineering, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, UKRAINE

ABSTRAKT The possibilities and expediency of using fullerene additives and their influence on the tribological properties of modern synthetic aviation oils are analyzed. The method of increasing anti-wear properties of synthetic oils for turbojet aircraft engines Mobil Jet Oil II and Mobil Jet Oil 254 by adding fullerene additive C₆₀ is considered. It is shown that the antiwear properties of synthetic Mobil Jet Oil 254 oil for turbojet aircraft engines exceed more than 5% of Mobil Jet Oil II oil, which, along with other factors, was the reason for the complete transfer of Airbus Helicopters H-145 helicopters to Mobil Jet Oil 254 oil. The increase in the concentration of fullerene additives in oils does not significantly affect the amount of wear of the rolling bearings of the turbine shaft of helicopters, although there is a tendency to decrease the diameter of the wear spot and an increase in the critical load of the transition to seizing. This is explained by the fact that, in contrast to sliding friction, in which the coefficient of friction decreases tenfold due to the possibility of rolling of fullerene molecules on the graphite surface, which is characterized by much lower friction compared to the sliding of graphite surfaces relative to each other due to the higher contact area in the last case. It follows that fullerenes act as micro-rolling bearings that reduce the coefficient of sliding friction. It is assumed that the balls in the rolling bearings may grind fullerenes like ball mills, therefore no significant effect of improving the anti-wear properties of oils when using fullerene additives is observed. It was established that an increase in the concentration of the fullerene additive in oils shifts the critical load to higher values. The use of fullerenes as an anti-wear additive to oils for turbojet engines requires further research and justification.

Keywords: fullerene additives; Mobil Jet Oil II oil; Mobil Jet Oil 254 oil; four-ball friction machine; wear spot diameter; critical load

Вступ

Україна, здійснюючи інтеграцію у світове та європейське співтовариство, виконуючи зобов'язання

перед своїми стратегічними партнерами, придбала 10 гелікоптерів фірми «Airbus Helicopters» H-145 для потреб Міністерства внутрішніх справ з метою оперативного реагування на нестандартні ситуації та

використання їх для екстреної медичної допомоги. Сучасні авіаційні газотурбінні двигуни (ГТД) характеризуються великими швидкостями обертання ротора, високою температурою газів та ступенем їх стискування в компресорі. У результаті цього на поверхні деталей тертя двигунів діють значні механічні та теплові навантаження. Тому, основними функціями змащувальних оливо є не лише зменшення тертя і зносу поверхонь деталей, а й інтенсивний відвід від них тепла.

Важливе місце у підвищенні надійності роботи техніки та збільшення термінів її експлуатації займають питання зносостійкості деталей. Протягом експлуатації відбувається інтенсивний знос вузлів тертя у результаті значних навантажень, швидкостей та температур, впливу агресивних середовищ та вібрацій.

Одним з найбільш економічно вигідних шляхів збільшення довговічності вузлів тертя у різних машинах і механізмах є підвищення якості мастильних матеріалів, у першу чергу, їх змащувальних властивостей, що досягається в основному шляхом введення до них протизносних, протизадирних і антифрикційних присадок.

Введення присадок в оливи та мастила дозволяє задовольнити дві основні вимоги техніки: підвищення терміну роботи (надійності) машин і механізмів; збереження енергії палива, тому що близько 30% енергії, що виробляється в промислових країнах світу, в кінцевому рахунку витрачається на тертя.

В останні роки одним з найбільш розвиваючим напрямом науки є вивчення фулеренів та можливостей їх застосування як присадок до змащувальних матеріалів. Це пов'язано з тим, що ці сполуки являють собою унікальні об'єкти з точки зору електронної будови, фізичних та хімічних властивостей. Надзвичайною особливістю також є те, що це єдина розчинна форма карбону у вуглеводневих сполуках, що дозволяє використовувати її у різноманітних напрямках. Проведення експериментальних досліджень з можливості застосування фулеренів та фулереномісної сажі як протизносних присадок є досить актуальним напрямом наукової роботи.

Мета роботи

Дослідження та вивчення можливостей використання та впровадження нових, перспективних комплексних присадок до паливно-мастильних матеріалів які будуть працювали більш тривалий термін, ніж традиційні присадки, а також проведення порівняльного аналізу трибологічних характеристик синтетичних оливо Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 для газотурбінних авіаційних двигунів гелікоптерів.

Для покращання експлуатаційних властивостей паливно-мастильних матеріалів – термоокисної стабільності вуглеводнів, протизносних

характеристик, застосовують антиокисні присадки фенольного характеру – «іонол», протизносні – «Hatec-580», але при підвищених температурах вони швидко окиснюються. Тому, основною задачею даної роботи є проведення досліджень з можливості впровадження нових, перспективних комплексних присадок до паливно-мастильних матеріалів на основі нанорозмірних вуглецевих матеріалів (фулеренів), що більш стійкі до процесу окиснення та дослідження під їх впливом зміни протизносних властивостей змащувальних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- визначення трибологічних показників синтетичних оливо Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 для газотурбінних авіаційних двигунів без та з вмістом фулерену C₆₀ на стандартизованій чотирьохкульковій машині тертя;
- вивчення доцільності використання фулеренових присадок у авіаційних синтетичних оливах.

Виклад основного матеріалу

Відомості про дослідження трибологічних властивостей фулеренів дуже нечисельні й стосуються головним чином фулерену C₆₀. Оpubліковано декілька робіт, де фулерен C₆₀ досліджувався у вигляді твердої плівки як тверде змащувальне покриття, тому зроблено висновок про перспективність C₆₀ для вирішення різних трибологічних завдань [1–3].

У нашій роботі [2] проведено трибологічні дослідження синтетичної Mobil Jet Oil 254 і мінеральної МК-8п оливо для газотурбінних двигунів гелікоптерів та показані обмеження щодо застосування мінеральної оливи, що робить її непридатною до використання за прямим призначенням після 300 год нальоту. Синтетичні оливи Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 рекомендовані виробником до використання в двигунах гелікоптерів H-145, тому основним завданням було дослідити, яка з цих двох оливо за трибологічними характеристиками є більш придатна до експлуатації.

Як показано в роботах [4–7], що останнім часом відбувся досить значний прогрес в одержанні та дослідженні нанооб'єктів, виникли нові наноматеріали, нанотехнології. Були синтезовані нанокластери ряду металів, фулерени і вуглецеві нанотрубки. Зроблений крок вперед в методах спостереження та вивчення властивостей вуглецевих наноструктур, пов'язаний з розвитком фізико-хімічних методів дослідження їх застосування в змащувальних матеріалах.

Проведено дослідження на основі яких запропоновано використання фулеренів як антиокиснювальної присадки, що значно поліпшує термоокисну стабільність оливо у порівнянні з традиційними присадками.

Фулерени відрізняються високою хімічною інертністю по відношенню до процесу мономолекулярного розпаду. Так, молекула C_{60} зберігає свою термічну стабільність до температури понад $1500^{\circ}C$, чого не можливо стверджувати про інші протизносні та антиокисні присадки.

Проте, у присутності кисню окиснення цієї форми карбону до CO і CO_2 спостерігається вже при істотно нижчих температурах (близько $250^{\circ}C$), але така температура в системі змащування сучасних автомобільних та авіаційних двигунів не досягається, хоча в авіаційних надзвукових літаках при зупинці двигуна, внаслідок припинення відводу тепла із зони підшипників турбіни, можливе таке підвищення температури на короткий період часу [4].

Вченими було виконано детальне кількісне дослідження визначення впливу добавки фулерену на робочі характеристики змащувальних композицій на основі графіту. Результати цих досліджень можуть бути покладені в основу розробки «супермастила», яке буде забезпечувати коефіцієнт тертя поверхні нижче 0,001.

У якості змащувальної основи використовувався високоорієнтований піролітичний графіт (НОРГ), який разом з мілкодисперсним графітовим порошком природного походження вводили в суміш концентрованої сірчаної та азотної кислот (у об'ємному співвідношенні 4:1) та перемішували протягом 16 год. Оброблений таким чином порошок промивали водою, просушували за температури $100^{\circ}C$, після чого зразок протягом 15 с піддавали термічній обробці. Це призводило до утворення шаруватих графітових частинок, які потім вводили в 70 %-й спиртовий розчин і піддавали ультразвуковій обробці. Потім шаруваті частинки графіту разом з порошком фулерену C_{60} або C_{70} запаювали в умовах вакууму в кварцову ампулу, яку протягом 15 діб витримували за температури $600^{\circ}C$.

Одержаний у результаті описаної процедури графіт, інтеркалірований фулеренами, використовували для одержання антифрикційного покриття, яке являло собою плівку площею $2,3 \times 2,3 \text{ м}^2$ і товщиною 0,2 мм.

Фулереновмісна сажа та сам порошкоподібний фулерен C_{60} дають помітне покращення антифрикційних та протизносних властивостей пар тертя сталь–сталь та мідь–сталь, особливо в області великих навантажень і тисків на контакт. Найбільше покращення відбувається при парі тертя сталь–сталь. Для мідних пар було визначено, що наявність фулерену C_{60} у чистому вигляді або у фулереновій сажі призводить до утворення на поверхні тертя фулеренополімерної плівки значної товщини, яка відіграє захисну роль [8-10].

Коефіцієнт тертя цієї плівки μ виміряли стандартним методом, як відношення сили тертя до прикладеного бокового навантаження. У результаті вимірювання отримані величини $\mu < 0,001$, вдвічі менше, ніж у стандартного мастила на основі MoS_2

($\mu \approx 0,002$) та для графітового мастила ($\mu \approx 0,001$). В якості фізичного механізму, який визначає характеристики змащувальної плівки на основі піролітичного графіту, інтеркалірованого фулеренами, вчені розглядають можливість кочення молекул фулерену по графітовій поверхні, яке характеризується значно меншим тертям в порівнянні з ковзанням графітових поверхонь одна відносно іншої в силу більш високої площі контакту в останньому випадку. Із цього слідує, що фулерени виконують роль мікропідшипників кочення, які зменшують коефіцієнт тертя ковзання [8, 11].

Межі застосування фулеренів дуже широкі. Що стосується безпосередньо змащувальних матеріалів, то на базі фулеренів розробляють багато присадок до змащувальних олів і мастил, останнім часом перспективним є вироблення мастил на основі фулеренів, які характеризуються надзвичайними характеристиками [2, 12].

Основними вузлами змащування в турбореактивних авіаційних двигунах є підшипники кочення, на відміну від вузлів змащування поршневих двигунів в яких переважає тертя ковзання. Температура зовнішньої обойми таких підшипників досягає $125-150^{\circ}C$, яка в основному створюється за рахунок тепла, що надходить від крильчатки турбіни. Після зупинки двигуна, коли зменшується обдув повітрям, тепловий потік, що йде від крильчатки, розігріває обойму підшипника і оливу, що його змащує і відводить тепло із зони тертя, до температури $200^{\circ}C$.

У турбореактивних двигунах надзвукових літаків різко збільшується температура у вузлах тертя як за рахунок зростання навантаження на підшипники турбіни, так і за рахунок тепла, що надходить від камери згоряння та крильчатки турбіни. Одночасно з цим підвищується температура оливи.

У перспективних надзвукових турбореактивних двигунах температура у вузлах тертя може досягати 400 і навіть $540^{\circ}C$, а температура оливи до $200^{\circ}C$. Для роботи за таких температур рідкі мінеральні оливи непридатні, а синтетичні оливи повинні містити протизносні та антиокисні присадки, які виконували б свої функції за таких умов. Тому дослідження спрямовані на одержання та використання нових присадок до змащувальних матеріалів, які працювали б за високих температур і значних навантажень є досить актуальними.

Розробка та впровадження в експлуатацію нових змащувальних олів з метою розширення сировинної бази для їх виробництва та підвищення експлуатаційних властивостей здійснювалось одночасно з розвитком двигунобудування.

Велика потужність авіаційних редукторів, що передається, у поєднанні з їх невеликими масою й габаритами призводить до посилення умов роботи пар тертя, зростання теплової та динамічної напруженості деталей та вузлів двигуна. Шестерні редукторів, як зазначалося вище, працюють за умов високих

контактних навантажень. Міцність плівок малов'язких авіаційних олів, придатних для змащування опор турбореактивних двигунів за даних умов виявляється недостатньою. Для забезпечення надійного змащування шестерень редуктора потрібні оливи з більшою в'язкістю і вищою змащувальною здатністю.

Протиріччя у вимогах до якості мінеральних олів, що повинні поєднувати високу змащувальну здатність із задовільними в'язкісно-температурними характеристиками для забезпечення надійного запуску двигуна за низьких температур, призвели до необхідності використання для змащування редукторів гвинта гелікоптерів та турбогвинтових двигунів суміші з малов'язких мінеральних та високов'язких олів. Причому співвідношення вказаних олів у сумішах є різним для різних типів двигунів.

Альтернативою вирішення цього протиріччя є використання в двигуні та редукторній системі гелікоптерів Н-145 «Airbus Helicopters» синтетичної оливи Mobil Jet Oil 254.

Mobil Jet Oil 254 – це надзвичайно високоефективна синтетична олива для газотурбінних двигунів третього покоління, розроблена відповідно до їхніх вимог та використання у комерційній і військовій авіації. Цей продукт виготовлений із спеціально підготовленої базової синтетичної оливи із складним естером та збагачений пакетом присадок. Олива має чудову термічну та окиснювальну стабільність, що протистоїть руйнуванню та утворенню відкладень, зберігаючи фізичні характеристики, що вимагаються специфікаціями виробників та військових. Фізичні властивості Mobil Jet Oil 254 подібні до наявних на даний момент мастильних матеріалів для газових турбін попереднього покоління. Ефективний робочий діапазон оливи становить від мінус 40 °С до плюс 230–250 °С.

В'язкість синтетичних олів за температур 250–300 °С, вище ніж у рівнов'язких їм за температури 100 °С мінеральних, вони мають кращу термічну стабільність, низьку випаровуваність та малу схильність до високотемпературних відкладень та піноутворення.

Синтетичні оливи перевершують мінеральні по антиокиснювальним властивостям, мають рівні або кращі протизносні і протизадірні властивості. У зв'язку з цим термін їх експлуатації в кілька разів перевищує термін експлуатації мінеральних олів.

Останнім часом у синтетичні оливи вводять ефективні антифрикційні присадки (модифікатори тертя), що сприяють покращенню їх працездатності у зоні високих температур та протизносних властивостей.

Нові синтетичні матеріали, експлуатаційні характеристики яких значно перевершують природні, є основою просування людства по шляху прогресу. Фулерен є новою формою карбону по суті. Молекула

C_{60} містить фрагменти з п'ятикратною симетрією, які не зустрічаються в природі для неорганічних сполук (рис. 1). Тому слід визнати, що молекула фулерену є органічною молекулою, а кристал, утворений такими молекулами (фулерит) – це молекулярний кристал, що є зв'язуючою ланкою між органічною і неорганічною речовиною.

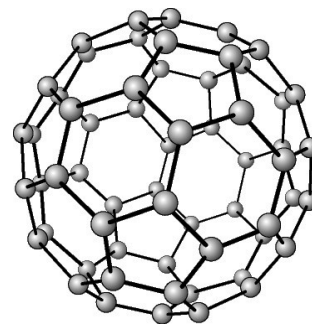


Рис. 1 – Молекула фулерену C_{60}

Кожний атом карбону в молекулі C_{60} знаходиться у вершинах двох шестикутників і одного п'ятикутника і принципово не відрізняється від інших атомів карбону. Атоми карбону які створюють сферу, зв'язані між собою сильним ковалентним зв'язком. Товщина сферичної оболонки 0,1 нм, радіус молекули C_{60} 0,357 нм. Довжина зв'язку С–С в п'ятикутнику – 0,143 нм, в шестикутнику – 0,139 нм.

Молекула фулерену C_{60} зберігає свою термічну стабільність до 1700 К, що значно перевищує температуру у вузлі тертя підшипника кочення газової турбіни двигуна гелікоптера чи в його редукторі.

Проте, у присутності кисню окиснення цієї форми карбону до СО і СО₂ спостерігається вже за істотно нижчих температурах (близько 500 К). Процес приводить до утворення аморфної структури, в якій на одну молекулу C_{60} припадає дванадцять атомів кисню, при цьому молекула фулерену практично повністю втрачає свою форму. При подальшому підвищенні температури до 700 К відбувається інтенсивне утворення СО і СО₂ і остаточне руйнування впорядкованих структур фулеренів.

Зацікавленість представляє галогенування фулерену, особливо його фторування. У перших роботах, присвячених фторидам фулерену, використовувалася реакція його взаємодії з газоподібним фтором, внаслідок якої утворювалася суміш продуктів. Розчинність самого фулерену C_{60} в розчинниках неароматичного характеру низька, тоді як його фториди достатньо добре розчинні в гексані, хлороформі, ацетоні, а з ароматичними сполуками утворюють стійкі за звичайних умов кристалосольвати.

Дослідження проводили використовуючи синтетичні оливи Mobil Jet Oil II і Mobil Jet Oil 254 з добавками різного вмісту фулерену. Контроль вмісту

та розчинності фулерену C_{60} в оливах визначали за методикою описаною у роботі [4].

Досліджувані фулеренові присадки у різних масових співвідношеннях мілкодисперсного порошку додавали в оливу і механічно перемішували до однорідної суспензії.

Якість змащувальних матеріалів визначається їх в'язкістю та протизносними властивостями в робочому діапазоні температур. З хімічної точки зору ці властивості забезпечуються, в першу чергу, молекулярною масою і ступенем розгалуження вуглеводневих ланцюгів. Однією з основних експлуатаційних властивостей, що висувається до олив, є висока стійкість до окиснення та протизносні властивості.

Для оцінки впливу фулерену на протизносні властивості олив проводили трибологічні випробування на стандартизованій чотирьохкульковій машині тертя відповідно до ГОСТ 9490 (ASTM D2783) (рис. 2).

За результатами досліджень визначали знос, який оцінювали за діаметром плями зносу d та критичному навантаженню P_k переходу до схоплення.

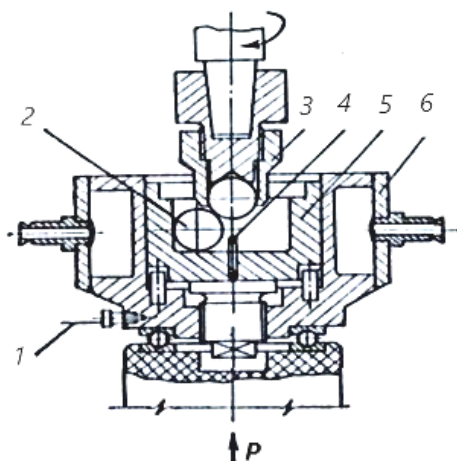


Рис. 2 – Чотирьохкулькова машина тертя ЧКМ-1: 1 – шпинт; 2 – кулі; 3 – вузол тертя; 4 – акустичний зонд; 5 – стакан; 6 – корпус

Три нижні кульки закріплюються нерухомо у чашці машини із змащувальним матеріалом, що випробовують. Верхня кулька, яка закріплена у шпинделі машини, обертається відносно трьох нижніх при заданому навантаженні з частотою обертання 1460 ± 70 об/хв. Провертання кульок у процесі випробування не допускається.

Кульки повинні бути виготовлені із підшипникової сталі ШХ-15 не нижче II ступеня точності, клас В, діаметром 16 або 20 мм. Можливо використовувати для випробування кульки з нових реальних підшипників.

Протизносні властивості на чотирьохкульковій машині тертя визначаються для олив та пластичних змащувальних матеріалів, що використовуються для

змащення поверхонь тертя.

Метод полягає у випробуванні змащувального матеріалу на машині тертя при заданих осьових навантаженнях та визначенні основних трибологічних характеристик змащувальних матеріалів: несучої здатності – за критичним навантаженням P_k , протизадирних властивостей за індексом задиру – I_z , граничної навантажувальної здатності – за навантаженням зварювання P_z та протизносних властивостей – за діаметром плями зносу (d).

Перед початком випробування кожного зразка змащувального матеріалу всі деталі машини, з якими стикається змащувальний матеріал під час випробування (чашка з деталями кріплення нижніх кульок і деталі кріплення верхньої кульки), промивають бензином або бензолом і просушують на повітрі. Кульки, які використовуються при випробуванні, також промивають бензином і просушують на повітрі.

Випробування кожного змащувального матеріалу проводять за температур, встановлених у нормативно-технічній документації.

Випробування складається із серії визначень. Кожне визначення проводять на новій пробі випробуваного змащувального матеріалу з чотирма новими кульками.

Для проведення випробування кульки закріплюють у шпинделі машини і чашці для змащувального матеріалу. При випробуванні оливу її заливають так, щоб кульки були цілком покриті нею. Потім встановлюють чашку із змащувальним матеріалом у машину, задають навантаження і включають електродвигун. Для того, щоб уникнути деформації кульок, необхідно уникати ударних навантажень.

При проведенні випробування при підвищених температурах попередньо включають електронагрівач. Після досягнення заданої температури створюють необхідне навантаження і включають електродвигун. Температура випробування повинна підтримуватися з похибкою не більше $\pm 5^\circ\text{C}$.

Тривалість випробування від моменту вмикання до моменту вимикання електродвигуна при визначенні критичного навантаження, навантаження зварювання та індексу задиру повинна бути $10 \pm 0,2$ с, при визначенні показника зносу – $60 \pm 0,5$ хв.

При визначенні критичного навантаження, що характеризує здатність змащувального матеріалу запобігати виникненню задиру поверхонь тертя, попередньо проводять ряд послідовних випробувань зі зниженням або зростанням навантаження відповідно до ряду навантажень, приведених у стандарті на випробування.

Проводять два паралельних випробування.

При зварюванні необхідно негайно виключити електродвигун, щоб уникнути пошкодження машини.

Показник зносу, що характеризує вплив мастильного матеріалу на знос поверхонь тертя,

визначають при постійному навантаженні, встановленому у нормативно-технічній документації на мастильний матеріал.

Після закінчення випробування та охолодження вузла тертя нижче температури 40 °С, зливають оливу та протирають кульки бензином, або спиртом.

Потім вимірюють діаметри плям зносу кожної з трьох нижніх кульок у напрямку ковзання і перпендикулярно йому у площині, перпендикулярній осі об'єктива мікроскопа. За результат виміру приймають середнє арифметичне значення вимірів плям зносу нижніх кульок у двох напрямках.

Результати вирішення основних завдань та їхнє обговорення

Об'єктом дослідження даної роботи є процес впливу нанорозмірних вуглецевих матеріалів (фулерену C_{60} та графіту) на протизносні властивості синтетичних Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 олив турбореактивних авіаційних двигунів.

Предметом дослідження є основні трибологічні характеристики авіаційних олив з добавками фулеренових нанорозмірних вуглецевих матеріалів, визначені за стандартною методикою на чотирьохкульковій машині тертя.

Ресурс та надійність роботи двигунів здебільшого залежить від того, в якій мірі авіаційна олива, що застосовується, відповідає експлуатаційним вимогам її використання.

Після відкриття фулеренів з'явилася можливість створювати нові змащувальні матеріали. На таку можливість вказували як ідеальна сферична форма молекул фулеренів C_{60} , так і основа цих молекул (карбон), який у вигляді графіту давно і широко використовується в якості антифрикційного компоненту цілого класу змащувальних матеріалів. Численні експерименти, проведені останнім часом, вказують на підвищені змащувальні характеристики олив у результаті додавання до них невеликої кількості фулеренів.

Характерною особливістю сучасних реактивних авіаційних двигунів є відсутність підшипників ковзання. В якості опор валу ротора двигуна и валів приводу агрегатів застосовують підшипники кочення. Коефіцієнт тертя кочення знаходиться в межах 0,001-0,003 для кулькових і 0,002-0,005 для роликів підшипників, тоді як для підшипників ковзання ця величина в десятки разів більша (приблизно 0,01).

Ротори сучасних авіаційних двигунів добре збалансовані і, не дивлячись на їх великі швидкості обертання та значну вагу, максимальне радіальне навантаження на підшипник не перевищує 1500 Н.

Протизносні властивості досліджували за допомогою чотирьохкулькової машини тертя по ASTM D2783 за параметрами діаметр плям зносу (d) та критичного навантаження (P_R). Останній показник

характеризує максимальну величину навантаження, за якого ще не виникає металевго контакту (задирів) при терті стандартизованих металевих кульок.

При визначенні показника граничного зносу (d) тривалість випробування від моменту вмикання до моменту вимикання двигуна становить 60 ± 0.5 хв, за стандартного навантаження 20 кгс (196 Н) та кімнатної температури. Взагалі, для кожного змащувального матеріалу вказуються умови випробування в нормативно-технічній документації. У даному випадку вибрані однакові умови випробування для синтетичних олив для зручності порівняння їх властивостей.

За показник зносу (d) у міліметрах приймають середнє арифметичне значення діаметрів плям зносу нижніх кульок двох паралельних випробувань при сталому навантаженні.

Заміри діаметрів плями зносу проводяться під мікроскопом у двох взаємно перпендикулярних напрямках з точністю до 0,01 мм.

На рис. 3. показано плями зносу при нормальному терті коченні (а) підшипникової сталі ШХ-15 в середовищі оливи та аномального (б) за рахунок збільшення критичного навантаження на вузол тертя. Під час цього спостерігається в точці критичного навантаження вирив та намазування (перехід) одного матеріалу на іншу поверхню. Критичне навантаження характеризує максимально можливе навантаження роботи вузла тертя в середовищі оливи.

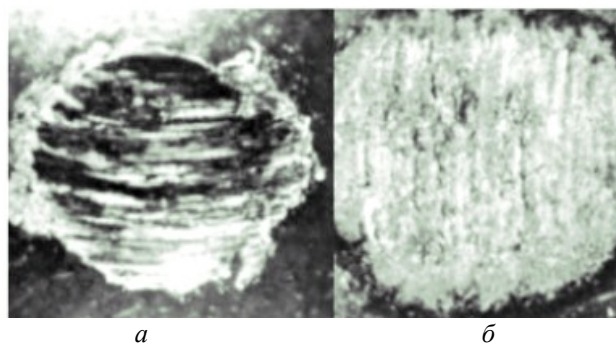


Рис. 3 – Плями зносу сталі ШХ-15 за нормального (а) та критичного навантаження (б)

Залежність діаметра плями зносу від концентрації фулеренової присадки для авіаційних олив Mobil Jet Oil II та Mobil Jet Oil 254 наведена на рис. 4.

Як показали результати досліджень, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу спостерігається. Слід також відмітити, що більш інтенсивно зменшення зносу спостерігається в оливі Mobil Jet Oil II, ніж у Mobil Jet Oil 254. Природа такої дії фулереновмісних присадок поки не зовсім з'ясована.

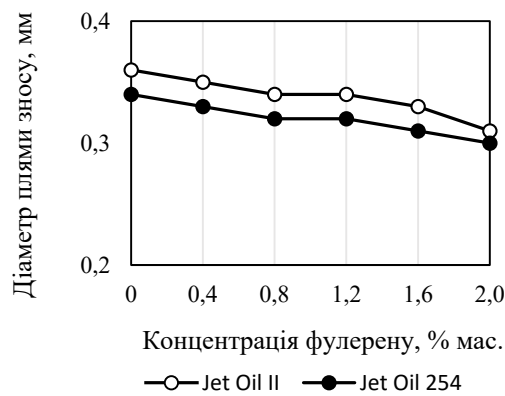


Рис. 4 – Залежність показника зносу від вмісту фулерену C_{60} в оливах

Критичним навантаженням (P_k , кгс) вважають навантаження, при якому середній діаметр плям зносу нижніх кульок знаходиться у межах значень величини граничного зносу для даного навантаження, що наводиться у таблиці ASTM D2783, збільшення якого на величину наступного навантаження за рядом навантажень викликає збільшення середнього діаметра плям зносу на величину, більшу ніж 0,1 мм.

За результат випробування приймають меншу величину критичного навантаження з двох отриманих величин (табл. 1 та табл. 2).

Таблиця 1. – Визначення критичного навантаження (P_k) для оливи Mobil Jet Oil II

Навантаження, кгс	Навантаження, Н	Середній діаметр плям зносу нижніх кульок, мм	Критичне навантаження, кгс
160	1568	0.65	-
200	1960	0.82	-
240	2352	0.94	(P_k) 240
280	2744	0.96	+

Таблиця 2. – Визначення критичного навантаження (P_k) для оливи Mobil Jet Oil 254

Навантаження, кгс	Навантаження, Н	Середній діаметр плям зносу нижніх кульок, мм	Критичне навантаження, кгс
160	1568	0.61	-
200	1960	0.65	-
240	2352	0.68	-
280	2744	0.71	-
320	3136	0.89	P_k (320)

Із вищевикладених таблиць видно, що критичне навантаження для оливи Mobil Jet Oil II за однакових умов випробування становить 2352 Н, тоді як для оливи Mobil Jet Oil 254 критичне навантаження становить 3136 Н. Це можна пояснити тим, що остання олива містить вдосконалений пакет присадок, які значно покращують її протизносні властивості.

Залежність критичного навантаження від вмісту фулеренової присадки в оливах наведена на рис. 5.

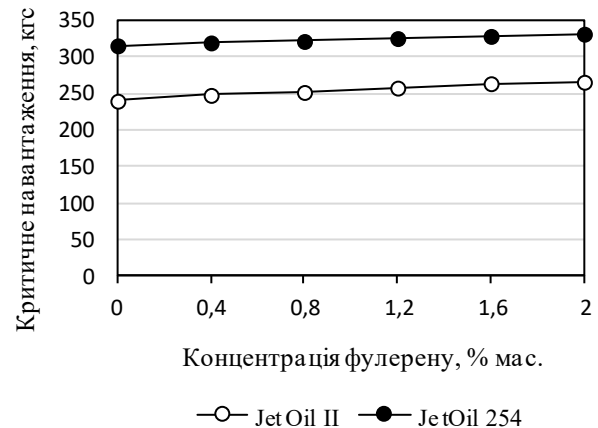


Рис. 5 – Залежність критичного навантаження від вмісту фулерену в оливах

Як показали результати досліджень, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах зміщує критичне навантаження в область більш високих значень. Слід також відмітити, що інтенсивність цього зростання в обох оливах практично однакова.

За сукупністю отриманих результатів можна передбачити та спрогнозувати механізм антифрикційної і протизносної дії фулеренів наступним чином. У процесі трибopolімеризації мінеральної оливи на тертьових поверхнях утворюється покриття у вигляді просторової трибopolімерної сітки, зв'язаної з підкладкою хімічними зв'язками. Це покриття захищає поверхні, що труться від безпосереднього контакту, і в той же час, будучи просторовою полімерною сіткою, утримує оливу, забезпечуючи таким чином і малозносний режим тертя, і малий коефіцієнт тертя. Цей процес може відбуватися і без присутності C_{60} . Однак без фулерену для формування трибopolімерного покриття потрібні, мабуть, більше часу і більш специфічні умови. Присутність фулерену завдяки його великій реакційній спроможності різко прискорює процес трибopolімеризації і призводить до утворення трибopolімерної сітки, у вузлах якої знаходяться переважно молекули C_{60} .

Тому трибоконтат є досить потужним реактором для різного роду структурних перетворень

і можна очікувати появи в зоні тертя тих модифікацій фулерену, які володіють підвищеною твердістю і можуть визначати властивості поверхневих плівок, що утворюються в процесі трибозносу.

Висновки

Набули подальшого розвитку експериментальними підтвердженнями теоретичні положення трибології. Як показали результати досліджень, збільшення концентрації фулеренової присадки в оливах не значно впливає на величину зносу, хоча тенденція зменшення діаметра плями зносу спостерігається. Це можливо пояснити тим, що на відміну від тертя ковзання, при якому коефіцієнт тертя зменшується в десятки разів за рахунок можливості кочення молекул фулерену по графітній поверхні, яке характеризується значно меншим тертям в порівнянні з ковзанням графітових поверхонь одна відносно іншої в силу більш високої площі контакту в останньому випадку. Із цього слідує, що фулерени виконують роль мікропідшипників кочення, які зменшують коефіцієнт тертя ковзання. Але в підшипниках кочення кульки можливо перемелюють фулерени, як кульові млини, тому не спостерігається значного ефекту покращення протизносних властивостей олив при застосуванні фулеренових присадок.

Показано, що протизносні властивості – діаметр плями зносу (d), визначений на чотирьохкульковій машині тертя, синтетичної оливи для газотурбінних авіаційних двигунів Mobil Jet Oil II перевищує понад 5 % діаметра плями зносу оливи Mobil Jet Oil 254, що пояснюється більш високою якістю останньої та вдосконаленням і оптимізацією пакету присадок.

Встановлено, що зростання концентрації фулеренової присадки в оливах зміщує критичне навантаження в область більш високих значень для обох марок синтетичних олив.

Список літератури

1. Tóth-Nagy C., Szabó A. I. Experimental Investigation of the Friction Modifying Effects of Graphene and C60 Fullerene Used as Nanoadditives in Engine Lubricating Oil Performed on an Oscillating Tribometer. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2023, 51(3). P. 257–262. doi: 10.3311/PPtr.20594.
2. Oleksandrenko V. P., Yefymenko V. V., Kalmykova N. G., Yefimenko O. V. Resistant Properties of Lubricating Materials with Fullerene Nano additives. *Problems of Tribology*, 2023, Vol. 28, № 2/108. P. 28–36. doi: 10.31891/2079-1372-2023-108-2-28-36.
3. Дмитриченко Н. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. А., Куц А. І. Кінетика зношування контактних поверхонь із застосуванням присадки фулерену C_{60} до моторної оливи. *Журнал тертя та зношування*, 2009, 30 (6). С. 399–403.
4. Єфіменко В. В., Єфіменко О. В., Калмикова Н. Г. Контроль та визначення концентрації фулеренових

- присадок у вуглеводневих рідинах. *XV Міжнародної науково-техн. конф. «Авіа-2021»*, (20–21 квітня 2021 р.) тези доп. Київ: НАУ, 2021. С.19.10–19.13.
5. Fang J., Chen B., Pan H. Anomalous friction of graphene nanoribbons on waved graphenes. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2015, 5(6). P. 212–215. doi: 10.1016/j.taml.2015.09.001.
 6. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Туриця Ю. О. Закономірності зношування пар тертя в умовах динамічного навантаження. *Вісник Національного транспортного університету*, 2010, № 21(2). С. 48–52.
 7. Dai W., Kheireddin B., Gao H., Liang H. Roles of nanoparticles in oil lubrication. *Tribology International*, 2016, 102. P. 88–98. doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.020.
 8. Vacher B., Le Mogne T. Boundary lubrication: Influence of the size and structure of inorganic fullerene-like MoS_2 nanoparticles on friction and wear reduction. *Wear*, 2014, 320. P. 161–178. doi: 10.1016/j.wear.2014.09.001.
 9. Rasheed A. K., Khalid M., Rashmi W., Gupta T. C. S. M., Chan A. Graphene based nanofluids and nanolubricants – Review of recent developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63. P. 346–362. doi: 10.1016/j.rser.2016.04.072.
 10. Zhang Z. J., Simionesie D., Schaschke C. Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants*, 2014, 2(2). P. 44–65. doi: 10.3390/lubricants2020044.
 11. Tóth-Nagy C., Szabó Á. I. Experimental investigation of the friction modifying effects of different nanoforms of graphene additives in engine lubricating oil. *FME Transactions*, 2022, 50(2). P. 248–259. doi: 10.5937/fme2201248T.
 12. Shahnazar S., Bagheri S., Hamid S. B. A. Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(4). P. 3153–3170. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.040.

References (transliterated)

1. Tóth-Nagy C., Szabó A. I. Experimental Investigation of the Friction Modifying Effects of Graphene and C60 Fullerene Used as Nanoadditives in Engine Lubricating Oil Performed on an Oscillating Tribometer. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2023, 51(3), pp. 257–262, doi: 10.3311/PPtr.20594.
2. Oleksandrenko V. P., Yefymenko V. V., Kalmykova N. G., Yefimenko O. V. Resistant Properties of Lubricating Materials with Fullerene Nanoadditives. *Problems of Tribology*, 2023, Vol. 28, no. 2/108-2023, pp. 28–36, doi: 10.31891/2079-1372-2023-108-2-28-36.
3. Dmytrychenko N. F., Mnaçakanov R. G., Mikosyanchik O. A., Kushh A. I. Kinytyka znoshuvannya kontaktnyx poverxon iz zastosuvannyam prysadky fulerenu S_{60} do motornoyi olyvy [Kinetics of wear of contact surfaces with the use of C60 fullerene additive to motor oil]. *Journal of friction and wear*, 2009, 30 (6), pp. 399–403.
4. Yefymenko V. V., Yefimenko O. V., Kalmykova N. G. Kontrol ta vyznachennya koncentraciyi fulerenvykh prysadok u vuglevodnevykh ridynax [Control and determination of the concentration of fullerene additives in hydrocarbon liquids]. *XV Int. sci.-pract. conf. «Avia-2021»*, (April 20-21, 2021). Kyiv: NAU, 2021, pp. 19.10–19.13.
5. Fang J., Chen B., Pan H. Anomalous friction of graphene nanoribbons on waved graphenes. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2015, 5(6), pp. 212–215, doi: 10.1016/j.taml.2015.09.001.

6. Dmytrychenko M. F., Mnaczkhanov R. G., Mikosyanchyk O. O., Turycya Yu. O. Zakonomirnosti znoshuvannya par tertya v umovax dynamichnogo navantazhennya [Patterns of wear of friction pairs under dynamic load conditions]. *Bulletin of the National Transport University*, 2010, no. 21(2), pp. 48–52.
7. Dai W., Kheireddin B., Gao H., Liang H. Roles of nanoparticles in oil lubrication. *Tribology International*, 2016, 102, pp. 88–98, doi: 10.1016/j.triboint.2016.05.020.
8. Vacher B., Le Mogne T. Boundary lubrication: Influence of the size and structure of inorganic fullerene-like MoS₂ nanoparticles on friction and wear reduction. *Wear*, 2014, 320, pp. 161–178, doi: 10.1016/j.wear.2014.09.001.
9. Rasheed A. K., Khalid M., Rashmi W., Gupta T. C. S. M., Chan A. Graphene based nanofluids and nanolubricants – Review of recent developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 63, pp. 346–362, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.072.
10. Zhang Z. J., Simionesie D., Schaschke C. Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants*, 2014, 2(2), pp. 44–65, doi: 10.3390/lubricants2020044.
11. Tóth-Nagy C., Szabó Á. I. Experimental investigation of the friction modifying effects of different nanoforms of graphene additives in engine lubricating oil. *FME Transactions*, 2022, 50(2), pp. 248–259, doi: 10.5937/fme2201248T.
12. Shahnazar, S., Bagheri, S., Hamid, S. B. A. Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(4), pp. 3153–3170, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.040.

Відомості про авторів (About authors)

Єфименко Валерій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний авіаційний університет, доцент кафедри хімії і хімічної технології; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4903-6173>; e-mail: e.valerij.ua@gmail.com

Valerij Yefymenko – candidate of technical sciences, associate professor, National Aviation University, associate professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology; Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-4903-6173>; e-mail: e.valerij.ua@gmail.com

Олександренко Віктор Петрович – доктор технічних наук, професор, Хмельницький національний університет, декан факультету інженерії, транспорту та архітектури; м. Хмельницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2404-2104>; e-mail: oleksandrenko_vp@ukr.net

Viktor Oleksandrenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Khmelnytskyi National University, Dean of the Faculty of Engineering, Transport and Architecture; Khmelnytskyi, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2404-2104>; e-mail: oleksandrenko_vp@ukr.net

Калмыкова Наталія Григорівна – аспірант PhD, Національний авіаційний університет, аспірант кафедри хімії і хімічної технології; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5553-5721>; e-mail: kalmykova82@ukr.net

Natalii Kalmykova – PhD candidate, National Aviation University, graduate student of the Department of Chemistry and Chemical Technology; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5553-5721>; e-mail: kalmykova82@ukr.net

Руденко Віра Миколаївна – доктор технічних наук, професор, Національний авіаційний університет, професор кафедри хімії і хімічної технології; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4052-6053>; e-mail: veranikrud@gmail.com

Vira Rudenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aviation University, Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technology; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4052-6053>; e-mail: veranikrud@gmail.com

Єфименко Олександр Валерійович – аспірант, Національний авіаційний університет, аспірант кафедри хімії і хімічної технології; м. Київ, Україна; e-mail: S94000@ukr.net

Oleksandr Yefymenko – graduate student, National Aviation University, graduate student of the Department of Chemistry and Chemical Technology; Kyiv, Ukraine; e-mail: S94000@ukr.net

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Єфименко В. В., Олександренко В. П., Калмыкова Н. Г., Руденко В. М., Єфименко О. В. Перспективи застосування фулеренових присадок у сучасних авіаційних оливах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 17-25. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.03.

Please cite this article as:

Yefymenko V., Oleksandrenko V., Kalmykova N., Rudenko V., Yefymenko O. Prospects for the use of fullerene additives in modern aviation oils. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 17-25, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.03.

*Надійшла (received) 08.08.2023
Прийнята (accepted) 08.09.2023*

УДК 662.24.051.55

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.04

МОДЕЛЮВАННЯ НЕДЕФОРМОВАНОЇ СТРУЖКИ, УТВОРЕНОЇ ПІД ЧАС НАРІЗАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ЗУБЧАСТОГО ВІНЦЯ МЕТОДОМ "POWER SKIVING"

А. М. СЛІПЧУК

Кафедра робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА
*e-mail: andsl@ukr.net

АНОТАЦІЯ Сьогодні на провідних світових підприємствах, які займаються виготовленням зубчастих коліс, все частіше можна зустріти нарізання зубчастого вінця на колесі методом Power Skiving. Цей сучасний спосіб дозволяє обробляти колеса із зовнішнім та внутрішнім вінцем, як прямозубого так і косозубого, а також нарізати шліци на валах чи втулках. Така технологія поєднує в собі елементи обточування та фрезерування, забезпечуючи дуже короткий час виготовлення. Проте, з кожним роком такий метод все більше удосконалюється, хоча по своїй кінематиці є дуже складним та потребує прецизійних розрахунків. Визначення точного положення інструменту та заготовки в кожний момент часу потрібні для синхронізації рухів при нарізанні. Показано принцип побудови недеформованої стружки при нарізанні внутрішнього прямозубого вінця методом Power Skiving. Отримано параметри перерізів зрізів стружки, яка утворилася під час роботи різального інструменту. Це служить основою для моделювання та розрахунку величин сил різання, тертя, необхідної роботи, яка потрібна для усунення припуску, теплових потоків, які виникають під час різання, інтенсивності нагрівання інструменту, температури та зношування інструменту, моделювання коливань і динамічних процесів. Повна інформація про розміри та форми зрізаних шарів, їх величини у різних ділянках зубця у кожний момент часу нарізання, а також встановлені закономірності їх неперервної циклічної зміни за оберт різального інструмента, служать основою для всебічного відтворення та опису різноманітних взаємопов'язаних і взаємозалежних деформаційних і контактних процесів, які відбуваються під час процесу нарізання зубчастого вінця. Для такої задачі розроблено комплексну систему графоаналітичного, математичного і комп'ютерного моделювання цього процесу. Враховано його кінематику і достовірно відтворено закономірності процесів різання-формування. Представлено застосування графоаналітичної методики побудови перерізів недеформованої стружки, яка дала можливість встановити її геометрію та основні характеристики, а також отримати 3D модель. Отримано адекватні моделі стружкоутворення та проаналізовано кількісні оцінки параметрів зрізів стружки, яка утворюється при Power Skiving.

Ключові слова: різак; моделювання; недеформована стружка; технологія Power Skiving; переріз зрізу.

SIMULATION OF UNDEFORMED CHIP FORMED DURING CUTTING FOR INTERNAL CROWN TOOTH BY THE "POWER SKIVING" METHOD

A. SLIPCHUK

Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, Lviv Polytechnic National University, L'viv, UKRAINE

ABSTRACT Today, the world's leading enterprises engaged in the manufacture of gear wheels increasingly use the Power Skiving method of cutting the gear crown on the wheel. This modern method allows you to process wheels with an external and internal crown, both spur and helical, as well as cut slots on shafts or hubs. This technology combines elements of turning and milling and ensures a very short production time. However, every year this method is increasingly improved, and in terms of its kinematics it is very complex and requires precise calculations. Determining the exact position of the tool and the workpiece at each moment of time is necessary for synchronizing movements during cutting. The principle of building an undeformed chip when cutting an internal straight-tooth crown by the Power Skiving method is shown. Section parameters for chip sections are obtained. They are the basis for modeling and calculating the values of cutting forces, friction, the necessary work that is needed to eliminate the allowance, heat flows that occur during cutting, the intensity of tool heating, temperature and wear of the tool, simulation of oscillations and dynamic processes. Complete information about the size and shape of the sheared layers, their size in different sections of the tooth at each moment of the cutting time is necessary for the description of various interrelated and interdependent deformation and contact processes. The established regularities of their continuous cyclical change during the revolution of the cutting tool are required for a comprehensive reproduction of the processes that occur during the cutting process of the toothed crown. A complex system of grapho-analytical, mathematical and computer modeling of this process has been developed for such a task. Kinematics is taken into account and the patterns of cutting-forming processes are reliably reproduced. The application of the grapho-analytical method of constructing sections for an undeformed chip is presented, which made it possible to establish its geometry and main characteristics, as well as to obtain a 3D model. Adequate models of chip formation are obtained. Quantitative estimates of parameters for slices in the process of Power Skiving are analyzed.

Keywords: cutter; modeling; undeformed chip; Power Skiving technology; section of slice.

Вступ

За останні десять років все більшого застосування у виготовленні зубчастих коліс набуває

метод нарізання зубчастого вінця на колесі - Power Skiving. Цей сучасний спосіб дозволяє обробляти прямозубі та косозубі колеса із зовнішнім та внутрішнім вінцем, а також нарізати шліци на валах

чи втулках. Незважаючи на те, що Power Skiving був вперше описаний ще на початку ХХ століття, процес довго не знаходив застосування і залишався в тіні інших методів нарізання через високі вимоги до жорсткості верстатів, необхідності високих ступенів синхронізації обертальних рухів заготовки та ріжучого інструменту, тяжких умов роботи різачка. На той час не було ні матеріалів, ні технічної можливості виготовити відповідний різальний інструмент, який був би здатний витримувати підвищену температуру. Обладнання мало низьку точність та велике биття, яке виникає під час процесу різання, під час обертання. Все це відкинуло застосування даного методу. Лише зараз, з розвитком верстатобудування та отримання належного інструменту, при сучасному програмному забезпеченні, Power Skiving застосовується на сучасних підприємствах всього світу, хоча поки в Україні звести його можна вкрай рідко.

Переваги даного методу є настільки очевидними, що його поширення серед виробників зубчастих коліс все частіше зустрічається на підприємствах. Висока швидкість різання, а вона може досягати до 300 м/хв., дає можливість говорити про значний прогрес у даній галузі промисловості. Така висока продуктивність процесу досягається головним чином через можливість безперервного видалення стружки. Час виготовлення зубчастого колеса займає лише декілька хвилин, залежно від параметрів зубчастого колеса та різального інструменту, який є набагато універсальнішим та дешевшим за інші продуктивні методи нарізання зубців.

Спеціальний інструмент – різак, який може бути як цільним та виготовленим з твердого сплаву або швидкоріжучої сталі, так і збірним, який буде мати змінні пластини. Такий робочий інструмент можна використовувати для чорнової обробки і для чистових проходів. Його відносна низька вартість у порівнянні з вартістю черв'ячних фрез, чи протяжок, є ще однією перевагою цього методу та зменшує собівартість виготовлення. Щодо можливостей застосування зуботочіння, то як правило, нарізають вінець з модулем від 2 до 9мм. Ще однією перевагою є можливість виконувати обробку поруч із вступом, що дає гнучкість під час проектування деталей.

Технологія Power Skiving є способом обробки зубчастих коліс чи шліців, що виключає необхідність використання спеціалізованого обладнання (зубофрезерних, протягувальних, довбальних), яке призначене виключно для нарізання зубців. Для його застосування достатньо мати універсальний оброблюючий 5-координатний центр, який має високу жорсткість, щоб отримати прийнятну точність зубчастого вінця. Зокрема, щоб отримати зубчастий вінець 7-8 ступенів точності, що повністю задовольняє широкий асортимент зубчастих коліс для різних механізмів, вузлів чи у машинах. Так, таке обладнання є дорогим, але на підприємствах для нього завжди є робота. Враховуючи вартість часу роботи такого обладнання, Power Skiving слід застосовувати лише при великосерійному чи масовому виробництві. Для виготовлення невеликої кількості зубчастих коліс або кількох одиниць можна

цей метод застосувати, як на спеціалізованому напівавтоматичному зубонарізному верстаті, так і на модернізованому верстаті фрезерної чи токарної групи, хоча точність та якість поверхні профіля зуба буде гіршою.

Ця технологія поєднує в собі елементи обточування та фрезерування, забезпечуючи дуже короткий час виготовлення. Проте, з кожним роком такий метод все більше удосконалюється, а над його дослідженням та удосконаленням працює ціла плеяда провідних науковців з Японії, Німеччини, Греції, Великої Британії.

Мета роботи

Метою даного дослідження є встановлення всіх геометричних параметрів недеформованої стружки, яка утворюється під час нарізання внутрішнього прямозубого вінця методом Power Skiving. Базуючись на отриманих результатах, необхідно побудувати модель за допомогою відповідного програмного середовища. Встановити вплив різних технологічних та геометричних параметрів процесу на форму та величину стружки. Серед усього різноманіття можливостей нарізання зубів або шліців методом Power Skiving, саме зуботочіння внутрішнього зубчастого вінця отримало найширше застосування. Перш за все це пов'язано з невеликим арсеналом методів, за допомогою яких можна отримати внутрішнє зубчасте колесо.

Якщо отримати точну та адекватну копію такої стружки, то така інформація стане першим кроком для подальшого дослідження силових, теплових, вібраційних показників процесу зуботочіння. Встановлення величини товщини стружки, її площі у кожний момент часу на кожній кромці леза, дозволить визначити характер зміни сили різання, сили тертя та спрогнозувати найбільш небезпечні зони на різальному інструменті. В подальшому можна також розрахувати теплові потоки, які будуть супроводжувати процес різання, а відповідно інтенсивності нагрівання інструменту та колеса, температури та зношування інструменту. Таким чином, це тільки перший етап фундаментального дослідження, який дозволить встановити закономірності зміни форми стружки від початку врізання інструменту до його виходу із "зацеплення" від різних факторів. Для заданого модуля, кількості зубців та кількості різців на різачку необхідно встановити залежності зміни форми стружки від подачі, кута нахилу. У цих дослідженнях розглянемо випадок, коли процес нарізання здійснюється на повну глибину зубця, тобто за 1 прохід. Для цього очевидно ми розглянемо приклад зубчастого колеса з невеликим модулем. Нам буде достатньо дослідити один оберт різального інструменту при нарізанні кінцевого контура зуба, адже саме формоутворюючий прохід дасть найбільші значення розміру стружки. Отримані результати можна застосувати для вирішення цілого ряду технологічних проблем з підбором ефективних параметрів різання, а саме встановлення ефективної подачі інструменту, його

кута нахилу та встановлення необхідної частоти обертання як заготовки так і різачка.

Отже, детальне дослідження параметрів перерізу зрізів у кожний момент часу, які можна отримати після зрізання стружки різачком, може слугувати основою всебічного дослідження процесу зуботочіння методом Power Skiving.

Основним завданням даного дослідження є створення адекватних моделей стружкоутворення та отримання кількісної оцінки параметрів зрізів в процесі Power Skiving. Для такої задачі необхідно розробити комплексну систему графоаналітичного, математичного і комп'ютерного моделювання цього процесу, у якій враховано його кінематику і достовірно відтворено закономірності процесів різання-формування. Також важливо встановити необхідні умови різання за допомогою аналізу обробки, оскільки існує велика кількість параметрів налаштування, які використовуються для визначення умов різання, а механізм обробки є складним. У цій статті представлено застосування графоаналітичної методики побудови перерізів недеформованої стружки, яка дасть можливість встановити її геометрію та основні характеристики, а також отримати 3D модель.

Огляд літературних джерел

Деякі тематичні дослідження [1,2] щодо нарізання прямозубих зубчастих коліс розглядаються, щоб продемонструвати практичність запропонованого програмного забезпечення для моделювання процесу Power Skiving, але не заглиблюються в теоретичні розрахунки та в саму кінематику процесу. Усі свої результати вони будують лише на експериментальних дослідженнях.

За останні роки було проведено досить багато досліджень в побудові моделі процесу зуботочіння [3]. Цілий ряд робіт зосереджені на визначенні геометрії недеформованої стружки [1,4], зокрема, товщині та довжині, а також розрахунку складових сили різання [5]. Проаналізовані різні можливі варіанти деформації стружки за допомогою моделювання з підтримкою FEM, де автори розробили алгоритм прогнозування температури, деформації та напруженості під час різання в інструменті [6].

Оскільки існує небагато продуктивних та недорогих методів обробки внутрішнього зубчастого вінця, то в світовій практиці зубонарізання цей прогресивний метод викликав великий інтерес. Зокрема, автори [7] досліджували кінематику процесу та сили, які виникають при різанні. У висновках основну увагу зосередили на проблемах конструкції інструменту при Power Skiving. Vouzakis та ін. [8] досліджували ефективність цього методу обробки циліндричних зубчастих коліс та порівнювали його з іншими методами. Чен та ін. [9,10] запропонували метод для підбору відповідної конструкції інструменту для нарізання косозубих і внутрішніх зубчастих коліс. Автори також представили метод отримання кінцевої поверхні зуба прямозубого колеса. У роботі [11] представлено цікавий метод

конструювання різачка, який має конічні зуби відповідно до кута нахилу спіралі. Штадтфельд [12] дослідив ефективність різання, процес утворення стружки та механізм різання Power Skiving при обробці циліндричних зубчастих коліс і побудував профіль зуба інструменту безпосередньо з перерізів. Гуо та ін. [13] досліджували теоретичні похибки профілів зубів шестерень, оброблених звичайним різальним інструментом, що нагадує зубчасту фрезу.

Основним недоліком робіт [1,2,4-6] є некоректне відтворення кінематики процесу. При розробленні кінематичної схем процесу Power Skiving автори вважають рух різання як поєднанням двох рухів – осьової подачі і швидкості головного руху, який надається інструменту, а не заготовці [14]. Це прийнято у вказаних роботах, як основа, але в результаті вектор швидкості буде скеровано під іншим кутом відносно базових поверхонь і осей. Це має велике значення для правильного визначення сил різання, тертя та геометричних параметрів інструменту.

У літературі описано різні способи моделювання процесу Power Skiving, які дещо спрощено розглядають утворення перехідних поверхонь під час різання. Базуючись на отриманих результатах та врахувавши кут нахилу інструменту, автори спроектували профілю зуба інструменту [7-10]. Однак ці методи не враховують правильне положення робочої кромки різачка в кожний момент часу. У зазначених роботах [7-10] автори не враховують форму та розміри перехідної поверхні, яка утворена у проміжній впадині між зубцями та інструментом в попередньому осьовому положенні інструмента по руху подачі. Саме форма цієї поверхні і визначає внутрішню поверхню усуненої стружки, її форму та розміри.

У роботах [8-13] результати геометричного моделювання і кількісні параметри стружки, зокрема, товщина зрізів, їх площа не належним чином використовуються як основа для подальшого і глибшого дослідження даного процесу. Адже, від їх значень і законів зміни по руху інструменту залежить більшість різноманітних силових, контактних, трибологічних і теплових явищ.

Складна кінематика Power Skiving разом із високими вимогами до спеціалізованих верстатів та інструментів потребує точного моделювання процесу різання в цілому. Коректна інформація про розміри та форму зрізаних шарів із заготовки у кожний момент часу могли б служити основою для створення геометрії моделі недеформованої стружки, яка утворюється під час обробки заготовки. Відповідно, у цій статті застосуємо графоаналітичний метод побудови поперечних перерізів та проаналізуємо вплив різних параметрів зубчастого колеса (модуля, кількості зубців) на характеристики недеформованої стружки, яка утворюється під час нарізання внутрішнього зубчастого вінця.

Виклад основного матеріалу

Використано методику, яка розроблена Грицаєм І.С., для черв'ячного зубофрезерування [14].

Її суть полягає в тому, що неперервний процес різання розглядається в послідовних дискретних кутових і лінійних положеннях контура зубця різального інструменту – індекс «i» (рис. 1). Для кожного з цих положень відображаються контури зубців інструменту, які виконували різання перед даним зубцем по куту повороту інструменту і заготовки $(i-1)\varphi$, та в попередньому положенні інструменту в русі осьової подачі $(i-1)s_o$. Накладання цих контурів відображає миттєвий перетин зрізу, який виконує даний зубець в цьому певному робочому положенні. Послідовні дії з визначення цих положень і контури миттєвих перерізів зрізів відтворюють динаміку зміни поперечного перерізу зрізів і дають можливість розрахувати параметри зрізів, або визначити їх величини на основі візуалізації картини на комп'ютері.

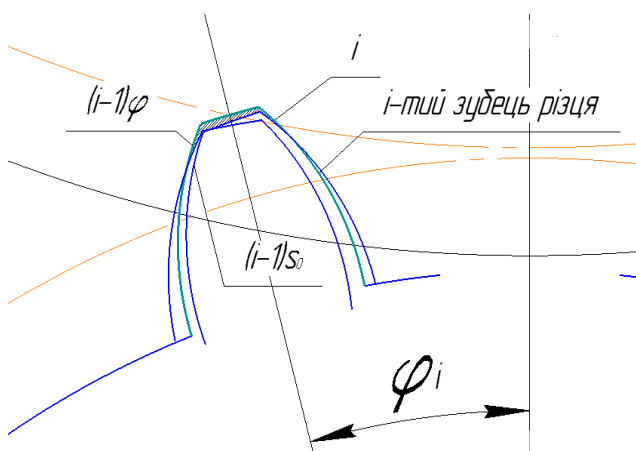


Рис. 1 - Множина контурів зубців та побудова перерізу поверхні різання, утворена цією множиною при зубофрезеруванні черв'ячною фрезою

Будемо аналізувати процес зуботочіння методом Power Skiving, як одного з найбільш продуктивного методу на даний момент.

Побудова миттєвих перерізів зрізів

Головною умовою точного визначення параметрів зрізів є встановлення форми та розмірів поверхні, яка утворюється в процесі усталеного різання в кожній западині зубчастого колеса між обробленими зубцями поверхнями та необробленою поверхнею заготовки на 1 оберт різача. Миттєво оброблена поверхня формується активним зубцем під час "зачеплення" із заготовкою. В кожний момент часу у роботі їх може бути від 2 до 5 - це залежить від параметрів зубчастого колеса, яке нарізається і від параметрів інструмента (модуля, кількості зубців). При наступному обробленні (після 1 оберту) цієї проміжної поверхні, інструмент переміститься вниз на величину подачі вздовж осі обертання зубчастого колеса, і таким чином зріже наступний шар стружки. Процес різання відбувається внаслідок схрещення осей колеса та інструменту на певний кут, який при нарізанні прямозубих

колес на виробництві рівний 20 градусів або більше. В межах цієї перехідної поверхні кожний наступний цикл різання в одній западині продовжується після оберту заготовки і переміщення різача на величину осьової подачі. Ця перехідна поверхня западини визначає дійсну форму і розміри миттєвого перерізу зрізу, які змінюються за кутом повороту зубця, та періодично повторюються в циклі обробки.

Під час осьового переміщення різального інструменту його кожний зуб здійснює рух по однаковій траєкторії, займаючи одне і те ж положення відносно елементарної поверхні нарізаного профілю. Інакше кажучи, внаслідок жорсткого кінематичного зв'язку між робочими рухами різання і формоутворення у процесі зуботочіння, під час кожного різку пляма контакту леза різача із утворюючим профілем змінюється за розмірами та переміщується з лівої сторони леза через вершину на праву. При розрахунку положень різача визначимо координати в кожний момент часу.

$$\begin{cases} x^2 = R_{ок}^2 - y^2 \\ x^2 = R_{ав}^2 - (y - A)^2 \end{cases};$$

$$y = R_{ок} - R_{ав};$$

$$R_{ок}^2 - y^2 = R_{ав}^2 - (y - A)^2 = R_{ав}^2 - y^2 + 2Ay - A^2;$$

$$y = \frac{R_{ок}^2 - R_{ав}^2 + A^2}{2A} = \frac{R_{ок}^2 - R_{ав}^2 + (R_{ак}^2 - 2R_{ак}R_{ок} - R_{ав}^2)}{2(R_{ак} - R_{ав})};$$

$$y = \frac{R_{ок}^2 - R_{ак}^2 + 2R_{ак}R_{ав}}{2(R_{ак} - R_{ав})};$$

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{y}{R_{ок}}\right);$$

$$X = C = R_{ок} \cdot \sin(\varphi_i);$$

$$\varphi_{вм} = \varphi_i / i,$$

де i – кількість розглянутих положень чашкового різача, $\varphi_{вм}$ – кут між вертикаллю та віссю симетрії різача в кожному положенні. Решта позначень зображено на рис. 2.

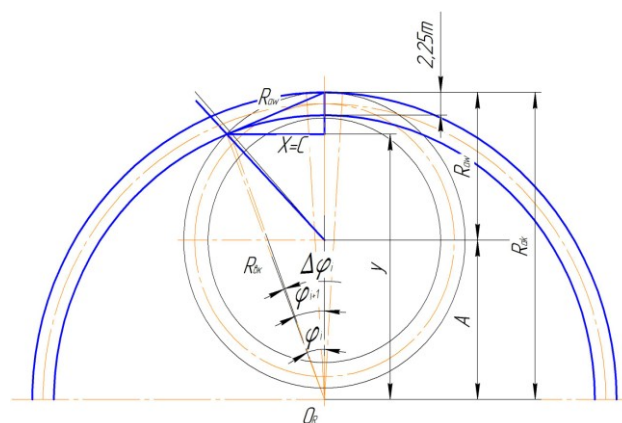


Рис. 2 - Побудова миттєвого положення чашкового різача відносно зубчастого колеса

Періодичний контакт кожного чашкового різця (його лева) із заготовкою поєднується з неперервністю різання і формоутворення в процесі обточування завдяки конструктивному руху різка, рухам обточування та осьової подачі.

Результати моделювання

Для дослідження параметрів зрізів, які утворюються від двох напрямків – осьової подачі та обертання різка розділимо послідовні положення. Розкладемо траєкторію проходження різка на 11 положень:

- положення -5, -4, -3, -2, -1 буде розташовуватися до перпендикуляра, де -5 – це положення врізання лева зуба різка у заготовку. Наступні положення будуть відповідати поступовому його наближенню до перпендикулярного розміщення - 0 (рис. 3).

- положення 0 – зубець різка розташовується перпендикулярно до колеса і відповідає середині всієї траєкторії.

- положення 1, 2, 3, 4, 5 буде розташовуватися після перпендикуляра, де 5 – це положення виходу лева зуба різка із заготовки. Після проходження середнього розташування (положення 0) зубець поступово буде виходити із зачеплення від положення 1 до 5 (рис. 3).

Наступний різ у цій западині буде відбуватися через повний оберт зубчастого колеса. За цей час різак переміститься в осьовому напрямі на величину осьової подачі. Здійснимо таку ж процедуру розбиття траєкторії “різального шляху” різка (рис. 4).

Якщо накласти ці дві проекції одна на одну, то ми отримаємо зрізи стружки у кожному положенні (рис. 5). Проте, після проходження перпендикуляра (0 положення) різак буде зрізати лише ліву частину западини, тому відкинувши “зайві” площі перерізів стружки, кінцево отримаємо сукупність усіх зрізів, як показано на рис. 6.

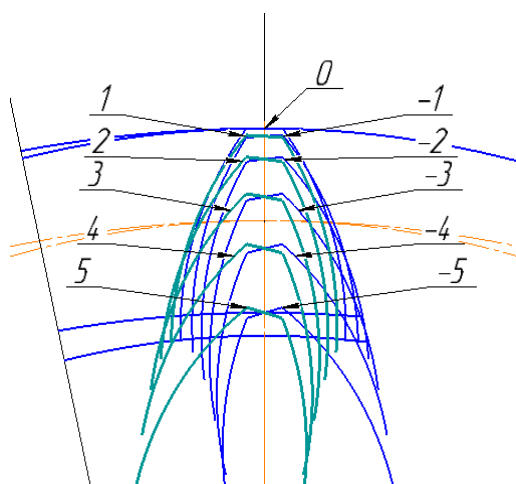


Рис. 3 - Ансамбль контурів зуба різка при врізанні і виході на i -му оберті

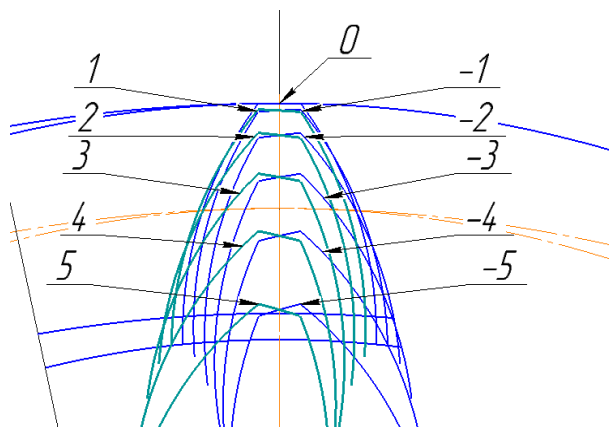


Рис. 4 - Ансамбль контурів зуба різка при врізанні і виході на $i+1$ -му оберті

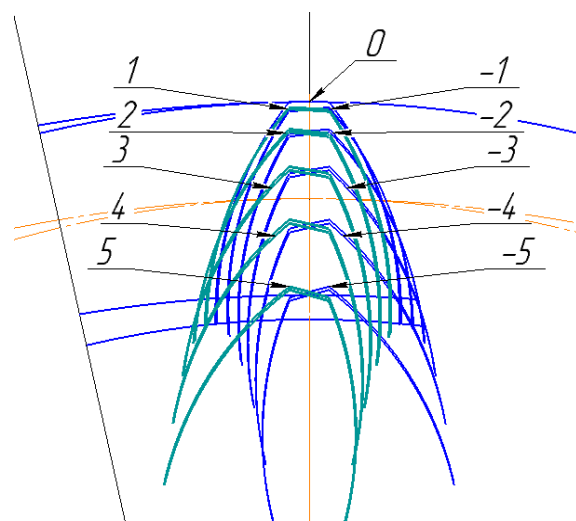


Рис. 5 - Сукупність перерізів стружки отримана під час кожного положення різка

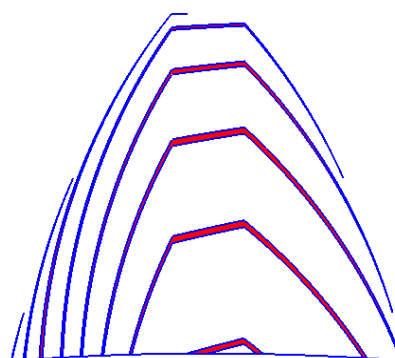


Рис. 6 - Змодельована сукупність перерізів стружки з врахуванням всієї траєкторії переміщення зуба різка

Результати моделювання за вказаними вище параметрами наведено у вигляді таблиць та графічних залежностей: площа перерізу стружки і товщини в залежності від різних осьових подач різка і для різних модулів зубчастого колеса (рис. 7-11).

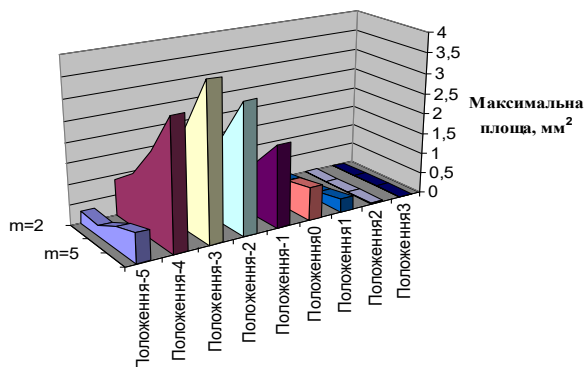


Рис. 7 - Залежність площі перпендикулярного січення стружки від модуля та положення різака при подачі 0,75 мм/об

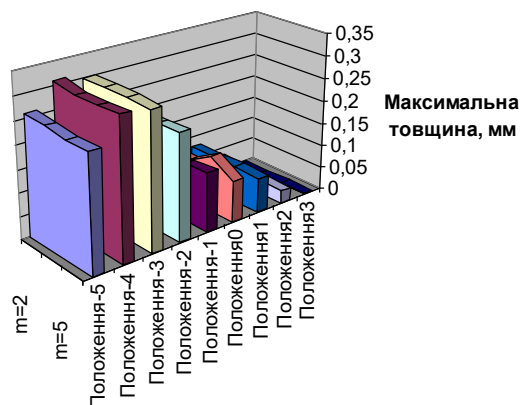


Рис. 8 - Залежність максимальної товщини перпендикулярного січення стружки від модуля та положення різака при подачі 0,75 мм/об

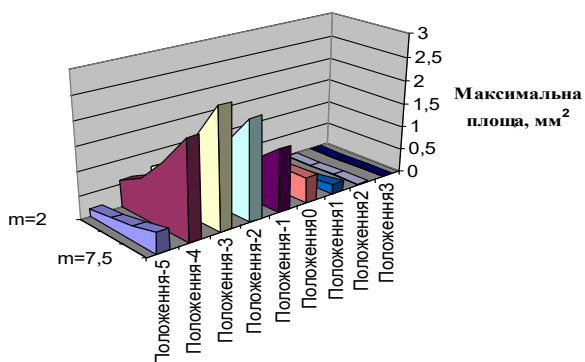


Рис. 9 - Залежність площі перпендикулярного січення стружки від модуля та положення різака при подачі 0,5 мм/об

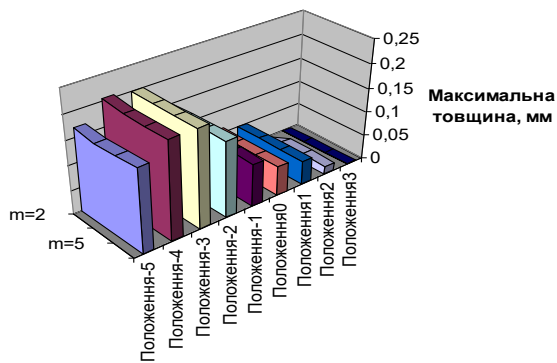


Рис. 10 - Залежність максимальної товщини перпендикулярного січення стружки від модуля та положення різака при подачі 0,5 мм/об

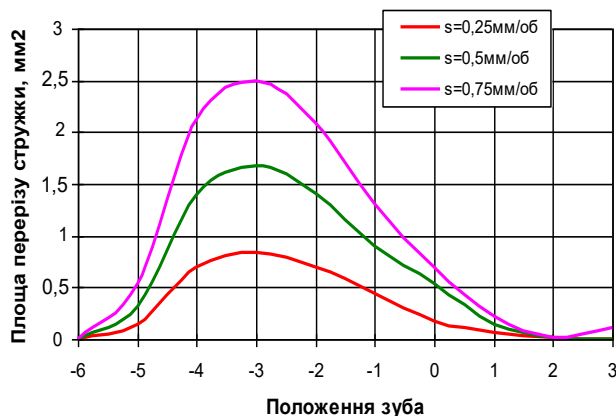


Рис. 11 - Залежність площі перпендикулярного січення стружки від подачі для модуля $t=5$ мм для різних положень різака

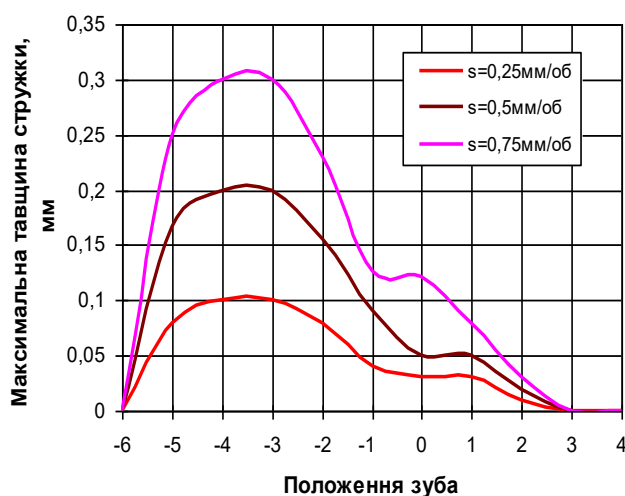


Рис. 12 - Залежність перпендикулярного січення максимальної товщини стружки від подачі для модуля $t=5$ мм для різних положень різака

Обговорення результатів

Серед зображеного графічного представлення залежностей товщини та площі поперечних перерізів стружки від подачі та модуля зубчастого колеса можна побачити наступні особливості:

- найцікавішою виявилася залежність товщини стружки від нарізаючого модуля! Як видно з рис. 8 та рис. 10 величина модуля не впливає на товщину недеформованої стружки, а лише на площу поперечного зрізу. В межах заданої подачі товщина є константою. Таким чином бачимо, що змінюється лише висота зрізу, яка є пропорційна модулю (рис. 7 та рис. 9);

- характерною ознакою для всіх випадків вибраних подач (від 0,25мм/об до 0,75мм/об) та модулів (від 2мм до 7мм) є те, що максимальні значення товщини зрізу та площі поперечних зрізів знаходяться на початковій положення, а пікові значення припадають на -3 положення. Якщо всю

траєкторію зачеплення різачка та заготовки розділити на 11 ділянок (рис. 3), як в нашому випадку, то пройшовши третину цього шляху різець досягає максимального навантаження. В подальшому різанні значення товщини та площі зрізу спадає, а при проходженні вертикального положення різця ці величини незначні. В останній третині шляху чашкового різця процес різання не відбувається (положення 4 та 5);

- на основі отриманих результатів щодо впливу подачі на площу перерізу та максимальну товщину стружки (рис. 11 та 12), можна сказати, що зміна відбувається пропорційно до зміни подачі. При зростанні подачі з 0,25 мм/об до 0,5 мм/об площа зростає в 2 рази. Така сама поведінка спостерігається і для зміни максимальної товщини. Найбільші площі та товщини перерізу стружки спостерігаються в -3 положенні;

- як і слід було очікувати при зростанні подачі від 0,25мм/об до 0,75 мм/об товщина недеформованої стружки зростає (рис. 12). Отримавши таку залежність можна підібрати оптимальне значення подачі для заданого модуля та врахувати можливості наявного обладнання.

Висновки

Застосувавши розроблений аналітичний метод та змодельовані положення перехідної поверхні та чашкового різця під час нарізання зуба методом Power Skiving у програмному середовищі, отримано усі числові значення геометричних параметрів недеформованої стружки. На відміну від раніше отриманих результатів інших авторів, цей метод є значно простішим у використанні і не потребує складних дороговартісних програмних продуктів для аналізу процесу різання. Ефективність запропонованої методики також полягає і в отриманні точніших результатів моделі стружки, яка дуже близька до реально нарізаної під час експерименту [12].

Особливістю отриманого результату є можливість підібрати оптимальне значення подачі інструменту для відповідного модуля зубчастого колеса. Маючи всі геометричні параметри стружки, можна спрогнозувати сили різання та виявити небезпечні зони на різальній кромці різця. Таким чином, можна також дати рекомендації по зміцненню небезпечних ділянок на кромці різця та попередню зміцнити відповідну поверхню.

Отже, отримавши залежності зміни геометричних характеристик (товщини, довжини, площі, форми) недеформованої стружки від положення різачка, у подальших дослідженнях ми можемо встановити цілий ряд інших фізичних величин (сили різання, теплові характеристики, коливання) та їх взаємозалежність під час нарізання зубчастого колеса методом Power Skiving.

Список літератури

1. Vargas B., Zapf M., Klose J., Zanger F., Schulze V. Numerical modelling of cutting forces in gear Skiving. *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 82. P. 455-460. doi: 10.1016/j.procir.2019.04.039.
2. Bouzakis K. D., Friderikos O., Tsiafis I. Fem-supported simulation of chip formation and flow in gear hobbing of helical gears. *Proceedings of DET2007 4th International Conference on Digital Enterprise Technology Bath, United Kingdom*. 2007. P. 34-43. doi: 10.1016/j.cirpj.2008.06.004.
3. Грицай І. Є., Сліпчук А. М. Power Skiving як сучасний спосіб нарізання зубчастих коліс та особливості його моделювання. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвідомчий науково-технічний збірник*. Львів. 2022. № 56. С. 11-18. doi: 10.23939/istcipa2022.56.011.
4. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power Skiving of internal gear. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 56. P. 1277-1285. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.022.
5. Inui M., Huang Y., Onozuka H., Umezū N. Geometric simulation of power Skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 48. P. 520-527. doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.078.
6. McCloskey P., Katz A., Berglind L., Erkorkmaz K., Ozturk E., Ismail F. Chip geometry and cutting forces in gear power Skiving. *CIRP Annals*. 2019. Vol. 68. №1. P. 109-112. doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.085.
7. Spath D., Hühsamet A. Skiving for high-performance machining of periodic structures. *CIRP Annals*. 2002. Vol. 51. №1. P. 91-94. doi: 10.1016/S0007-8506(07)61473-5.
8. Bouzakis K. D., Lili E., Michailidis N., Friderikos O. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. *CIRP Annals*. 2008. Vol. 57. № 2. P. 676-696. doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.001.
9. Chen X. C., Li J., Lou B. C. A study on the design of error-free spur slice cutter. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 68. P. 727-738. doi: 10.1007/s00170-013-4794-3.
10. Zhengyang H., Chuang J., Xiaozhong D. Research on the profile modification of power Skiving tool for internal gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 121. № 5-6. P. 3463-3475. doi: 10.1007/s00170-022-09318-6.
11. Tsai C. Y. Integrated mathematical approach for design and manufacturing of power-Skiving tool for interference-free involute internal gear cutting. *Mechanism and Machine Theory*. 2023. Vol. 180. P. 105172. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105172.
12. Stadtfeld H. J. Power Skiving of cylindrical gears on different machine platforms. *Gear Technology*. 2014. Vol. 31. № 1. P. 52-62.
13. Guo E., Shi Z., Hu L., Zhang E., Ren X. Design method of a multi-blade Skiving tool for gear Skiving. *Mechanism and Machine Theory*. 2022. Vol. 173. P. 104848. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104848.
14. Грицай І. Є. *Теоретико-прикладні основи комплексних наукових досліджень процесу нарізання зубчастих коліс*. Львів. Сполум, 2009. 254 с.

References (transliterated)

1. Vargas B., Zapf M., Klose J., Zanger F., Schulze V. Numerical modelling of cutting forces in gear Skiving.

- Procedia CIRP*, 2019, Vol. 82, pp. 455-460, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.039.
2. Bouzakis K. D., Friderikos O., Tsiafis I. Fem-supported simulation of chip formation and flow in gear hobbing of helical gears. *Proceedings of DET2007 4th International Conference on Digital Enterprise Technology Bath*, United Kingdom. 19-21 September 2007, pp. 34-43, doi: 10.1016/j.cirpj.2008.06.004.
 3. Hrytsay I. Ye., Slipchuk A. M. Power Skiving as a modern method of gear cutting and features of its modeling. *Avtomatyzatsiya vyrobnychyykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. Ukrayins'kyi mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk*. [Automation of production processes in mechanical engineering and instrument engineering. Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection.]. L'viv, 2022, 56, p. 11-18, doi: 10.23939/istcipa2022.56.011.
 4. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power Skiving of internal gear. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, Vol. 56, pp. 1277-1285, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.022.
 5. Inui M., Huang Y., Onozuka H., Umezu N. Geometric simulation of power Skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. *Procedia Manufacturing*, 2020, Vol. 48, pp. 520-527, doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.078.
 6. McCloskey P., Katz A., Berglind L., Erkorkmaz K., Ozturk E., Ismail F. Chip geometry and cutting forces in gear power Skiving. *CIRP Annals*, 2019, Vol. 68, 1, pp. 109-112, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.085.
 7. Spath D., Hühsamet A. Skiving for high-performance machining of periodic structures. *CIRP Annals*, 2002, Vol. 51, 1, pp. 91-94, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61473-5.
 8. Bouzakis K. D., Lili E., Michailidis N., Friderikos O. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. *CIRP Annals*, 2008, Vol. 57, 2, pp. 676-696, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.001.
 9. Chen X. C., Li J., Lou B. C. A study on the design of error-free spur slice cutter. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, Vol. 68, pp. 727-738, doi: 10.1007/s00170-013-4794-3.
 10. Zhengyang H., Chuang J., Xiaozhong D. Research on the profile modification of power Skiving tool for internal gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, Vol. 121, 5-6, pp. 3463-3475, doi: 10.1007/s00170-022-09318-6.
 11. Tsai C. Y. Integrated mathematical approach for design and manufacturing of power-Skiving tool for interference-free involute internal gear cutting. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, Vol. 180, pp. 105172, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105172.
 12. Stadtfeld H. J. Power Skiving of cylindrical gears on different machine platforms. *Gear Technology*, 2014, Vol. 31, 1, pp. 52-62.
 13. Guo E., Shi Z., Hu L., Zhang E., Ren X. Design method of a multi-blade Skiving tool for gear Skiving. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, Vol. 173, pp. 104848, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104848.
 14. Hrytsay I. Ye. *Teoretyko-prykladni osnovy kompleksnykh naukovykh doslidzhen' protsesu narizannya zubchastykh kolis*. [Theoretical and applied foundations of complex scientific studies of the gear cutting process], L'viv, Spolom, 2009. p. 254.

Відомості про авторів (About authors)

Сліпчук Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0003-0584-6104, e-mail: andsl@ukr.net

Slipchuk Andrii – Candidate of Technical Sciences, PhD, Lviv Polytechnic National University, Docent of the Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, c. Lviv, Ukraine, ORCID: orcid.org/0000-0003-0584-6104, e-mail: andsl@ukr.net

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сліпчук А. М. Моделювання недеформованої стружки утвореної під час нарізання внутрішнього зубчастого вінця методом "POWER SKIVING". *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 26-33. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.04.

Please cite this article as:

Slipchuk A. Simulation of undeformed chip formed during cutting for internal crown tooth by the "POWER SKIVING" method. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 26–33, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.04.

*Надійшла (received) 01.08.2023
Прийнята (accepted) 10.09.2023*

УДК 621.331

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.05

ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНОЇ ШВИДКОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ МОБІЛЬНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ З КОМП'ЮТЕРНИМ ЗОРОМ

Б. В. ВОРОБІЙОВ, С. О. СЕНЧЕНКО*, Я. О. КИРИЛЕНКО, Я. В. ЛІХНО, Л. ХАНЬ, Ю. М. КУТОВИЙ

Автоматизовані електромеханічні системи, НТУ "ХПІ", м. Харків, УКРАЇНА

* e-mail: Serhii.Senchenko@ieee.khpi.edu.ua

АНОТАЦІЯ Представлено підхід до інтеграції алгоритмів комп'ютерного зору в систему керування тяговими електроприводами залізничного транспорту. Він демонструє використання алгоритмів комп'ютерного зору для обчислення лінійної швидкості як альтернативи звичайним датчикам, таким як одометри коліс, GPS, DGPS та інерційні датчики, які можуть виявитися неефективними на слизькій поверхні та на низьких швидкостях. Як наслідок, ця стаття зосереджена на використанні лінійної швидкості як зворотного зв'язку в системі керування для підвищення енергоефективності під час старту та зупинки та запобігання пробуксовці коліс. Система керування електроприводом була успішно впроваджена та випробувана на робототехнічній платформі, розробленій для моделювання динамічної поведінки в реальних сценаріях залізничного транспорту. У статті детально описано процес розробки цієї робототехнічної платформи, яка використовується для імітації динамічних умов реального світу на залізничному транспорті. Запропонований алгоритм керування оцінкою швидкості оцінено на спеціально розробленому випробувальному стенді, що виявило його здатність прогнозувати швидкість з відносно високим ступенем точності. Крім того, представлений алгоритм оптичного потоку для оцінки швидкості, який оцінюється за допомогою спеціально розробленої випробувальної установки, що вказує на сильну кореляцію між прогнозованою швидкістю транспортного засобу та вимірюваннями точних оптичних кодерів. Дослідження також визначає оптимальний розмір вікна функції для оцінки швидкості оптичного потоку в реальному часі. Таким чином, цей підхід демонструє значний потенціал для точної оцінки швидкості. Поточні експерименти проводяться в різних реальних умовах, а майбутні дослідження спрямовані на розробку надійної автономної системи вимірювання швидкості. Інтеграція сучасних цифрових технологій комп'ютерного зору не тільки покращує тягові характеристики електроприводів, але й розширює можливості тягових електроприводів, щоб відповідати суворим вимогам промислового обладнання.

Ключові слова: тяговий електропривод; двигун постійного струму; пробуксовка коліс; комп'ютерний зір; робототехнічна платформа; датчик швидкості; одноплатний комп'ютер.

MEASUREMENT OF LINEAR VELOCITY USING A MOBILE ROBOTIC PLATFORM WITH COMPUTER VISION

B. VOROBIOV, S. SENCHENKO, Y. KYRYLENKO, Y. LIKHNO, L. KHAN, Yu. KUTOVYI

Automated electromechanical systems, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT This article presents an approach to integrating computer vision algorithms into the control system of traction electric drives in rail transport. It demonstrates the utilization of computer vision algorithms for calculating linear velocity as an alternative to conventional sensors like wheel odometers, GPS, DGPS and inertial sensors, which may prove ineffective on slippery surfaces and at low speeds. As a result, this article focuses on employing linear velocity as feedback within the control system to enhance power efficiency during starting and stopping and to prevent wheel slip. The electric drive control system has been successfully implemented and tested on a robotics platform designed for simulating dynamic behaviors in real rail transports scenarios. The article details the development process of this robotics platform, which is employed to mimic real-world dynamic conditions in rail transport. The proposed control algorithm for speed estimation is assessed using a specially designed test bench, revealing its capability to predict speed with a relatively high degree of accuracy. Additionally, an optical flow algorithm for velocity estimation is introduced and evaluated through a specially designed test rig, indicating a strong correlation between the predicted vehicle speed and the measurements from precision optical encoders. The study also determines the optimal feature window size for real-time optical flow rate estimation. In summary, this approach exhibits significant potential for accurate speed estimation. Ongoing experiments are being conducted under various real-world conditions, with future research aimed at developing a dependable autonomous system for speed measurement. The integration of modern digital computer vision technologies not only enhances the traction characteristics of electric drives but also extends the capabilities of traction electric drives to meet the rigorous demands of industrial equipment.

Keywords: traction electric drive; DC motor; wheel slip; computer vision; robotics platform; speed sensor; single-board computer.

Вступ

Для виконання завдань руху під час маневрування, рушання з місця та гальмування

важлива оцінка фактичної швидкості руху залізничного транспорту. У цих режимах можуть виникати динамічні режими, що викликають негативні наслідки. При рушанні або зупинці

(гальмуванні) – буксуванні коліс при маневруванні або русі залізничного транспорту в звичайному режимі може виникнути фрикційне коливання [1-4]. Щоб уникнути перерахованих негативних ефектів важливо високоточне вимірювання таких параметрів руху, як швидкість і прискорення.

Традиційно одометрія коліс, GPS, DGPS та інерційні датчики використовуються для визначення швидкості залізничного транспорту та, можливо, його траєкторії. Незважаючи на популярність і корисність вищевказаних методів і датчиків, вони страждають від дрейфу, низької роздільної здатності або обмеженої застосовності. Показники одометрії коліс погіршуються при наявності ковзання залізничного транспорту. GPS і DGPS страждають від низької роздільної здатності та низької швидкості оновлення, тому вони непридатні для маневрів у режимах низької швидкості. У той час як інерційні датчики схильні до високого рівня шуму, особливо на низьких швидкостях, і на точність цих датчиків впливає, якщо потрібні оцінки швидкості та положення через необхідну одинарну та подвійну інтеграцію за часом [5-8].

За останнє десятиліття кілька дослідників досягли значних успіхів у використанні різних методів обробки зображення та зору для навігації, уникнення перешкод і керування наземними транспортними засобами. Більшість дослідників використовують методи обробки зображень для створення 3D-простору з 2D-зображень, виявлення перешкод або вилучення руху з отриманих послідовностей зображень. Нещодавно було розроблено багато навігаційних алгоритмів, які можуть обчислювати шлях робота та відносно надійно генерувати карти неструктурованих середовищ. Найбільш помітним є прогрес у методах навігації на основі SLAM. Однак ця стаття зосереджена на оцінці швидкості, яка застосовна для оцінки ковзання для залізничного транспорту.

Мета роботи

Розробити і промоделювати точний і надійний алгоритм оцінки швидкості залізничного транспорту з використанням техніки оптичного потоку та стереокамери для отримання точних значень. Цей метод заснований на використанні стереокамери, яка сканує місцевість і точно прогнозує швидкість залізничного транспорту. Потім виміряні сигнали можна використовувати для оцінки параметрів ковзання залізничного транспорту в реальному часі. Пропонується, щоб залізничний транспорт був оснащений стереокамерою, спрямованою до землі, яка отримувала зображення поверхні, по якій він рухається. Оскільки перевірка працездатності такої системи на реальному залізничному

транспорті є дуже складним завданням. Вирішено зібрати лабораторну установку у вигляді роботизованої платформи для колісних транспортних засобів з дистанційним керуванням.

Роботизована платформа

Експеримент з перевірки працездатності системи керування електроприводом залізничного транспорту з інтегрованим алгоритмом розрахунку лінійної швидкості з використанням реальної імітаційної моделі. Для цього була зібрана роботизована платформа колісного робота, яка показана на рис. 1.

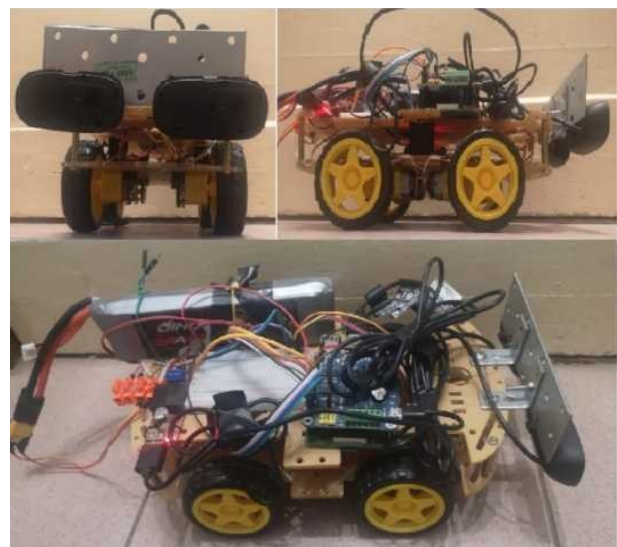


Рис. 1 – Збірний експериментальний майданчик для дослідження та моделювання системи керування тяговим електроприводом залізничного транспорту

Експериментальна платформа складається з чотирьох незалежних двигунів постійного струму, до яких підключений оптичний датчик швидкості. Структурна схема одного з вузлів електроприводу показана на рис. 2. Інші три вузли мають однакову структуру і використовують той самий двигун постійного струму, датчик швидкості та ШІМ-контролер.

Для реалізації системи керування роботизованою платформою обрано одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3B+. Raspberry Pi 3B+ включає всі необхідні інтерфейси, такі як GPIO, USB і Ethernet для підключення датчиків і генерації керуючих сигналів до ШІМ-контролера.

Датчик для оцінки лінійної швидкості представлений у вигляді стереокамери. Стереокамеру зібрали з двох однакових веб-камер і закріпили на роботизованій платформі. Основна мета стереокамери – отримати точне положення об'єктів на кадрах за допомогою алгоритмів

триангуляції. Крім того, стереокамера допомагає прив'язати знайдені об'єкти до отриманого кадру з реальними розмірами в одиницях SI. Структурна схема всієї роботизованої платформи показана на рис. 3.

Алгоритми комп'ютерного зору вимагають великої обчислювальної потужності. Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3B+ не дозволяє працювати з комп'ютерним зором у реальному часі. Для вирішення цієї проблеми ми вирішили перенести

виконання алгоритмів комп'ютерного зору на окремий більш потужний комп'ютер. Для виконання алгоритмів керування реалізовано розподілену клієнт-серверну модель. Клієнт-серверна структура дистанційного керування роботизованою платформою, представлено на рис. 4.

Віддалений термінал керування та відображення значення швидкості був реалізований як графічний інтерфейс і показаний на рис. 5.

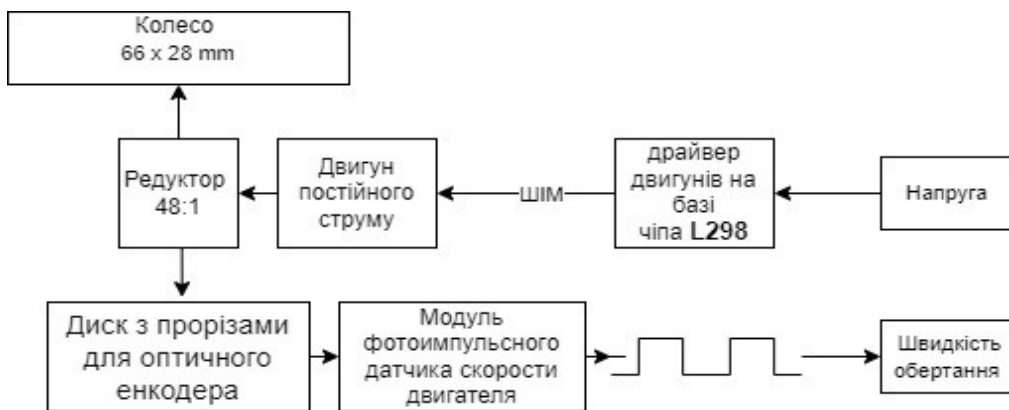


Рис. 2 – Структурна схема об'єкта керування



Рис. 3 – Структурна схема роботизованої платформи

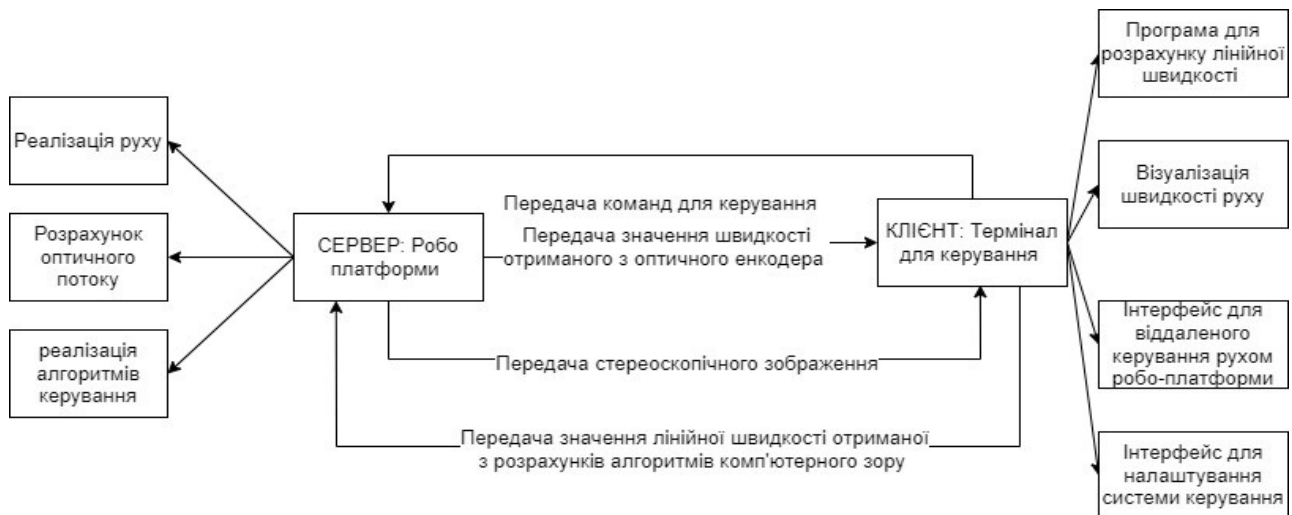


Рис. 4 – Клієнт-серверна структура дистанційного керування роботизованою платформою

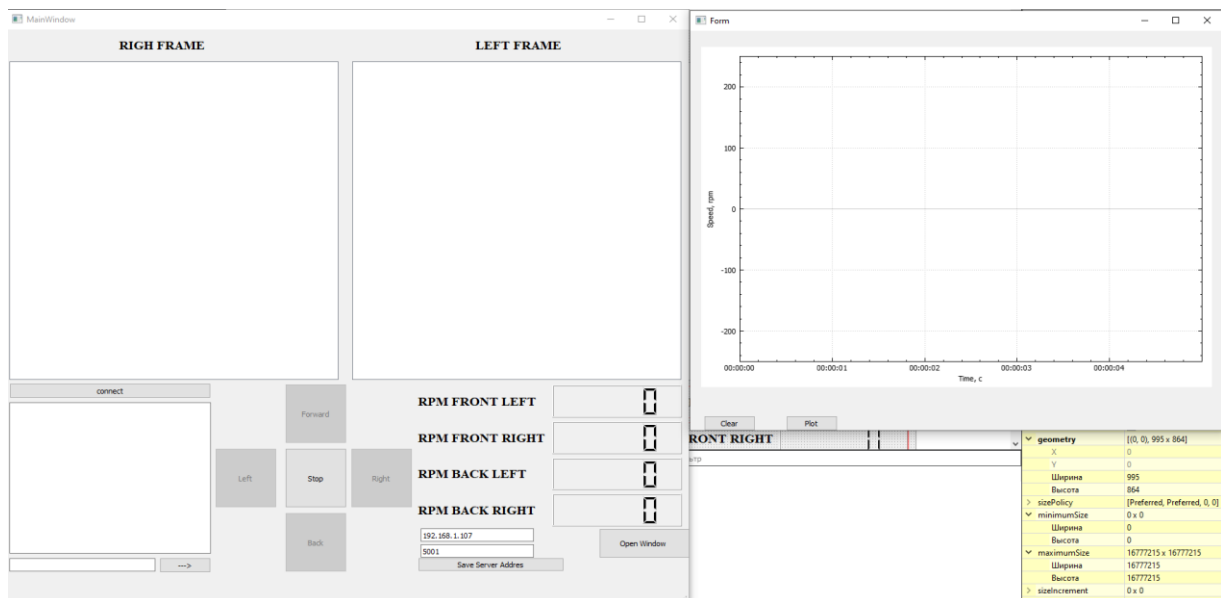


Рис. 5 – Програмне забезпечення для дистанційного керування роботизованою платформою

Віддалений термінал складається з двох вікон. Перші вікна використовуються для показу поточних наборів кадрів зі стереокамери та розміщення кнопок, які керують напрямком руху.

Реалізація програмного забезпечення виконується на C++ з використанням бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV [9,10] для створення графічної керуючої програми з використанням фреймворку QT.

Метод визначення лінійної швидкості

Велику кількість точок, що характеризують простір, у якому рухається залізничний транспорт, можна виділити шляхом запису змінних у часі послідовностей зображень за допомогою рухомої

камери. Послідовність зображень або відео – це серія двовимірних зображень, розташованих послідовно в часі. Оцінка руху тут визначається як оцінка зміщення та швидкості просторових точок у кадрі зображення відносно попереднього кадру в часовому ряді двовимірного зображення. Як показано, камера прикріплена до роботизованої платформи об'єктивом до рухомої поверхні. В ідеалі площина зображення перпендикулярна місцевості. Камери, розташовані в напрямку руху, визначаються як камери переднього огляду. Такий підхід в конструкції забезпечує виявлення змінних точок в полі зору камери на більш високих швидкостях.

Є два етапи для оцінки швидкості зібраної рухомої платформи. На першому етапі алгоритм

оптичного потоку використовується для оцінки оптичного потоку з пари зображень. Потім оптичний потік використовується для оцінки швидкості цієї платформи.

A. Алгоритм оптичного потоку

Алгоритм оптичного потоку визначає рух масивів яскравості, які, як передбачається, переміщуються під час руху об'єктів у послідовності зображень. Вихід оптичного потоку отримується у формі u_x і u_y компонентної швидкості, як показано на рис. 6. Загалом ми припускаємо, що картина оптичного потоку буде відповідати полю руху, хоча це не завжди вірно на практиці. Використовуючи деякі обмеження, такі як порівняння геометричних параметрів (форми), порівняння рівнів сірого та інтенсивності, функцію, знайдену на одному зображенні, зазвичай можна зіставити з ознакою на наступному зображенні.

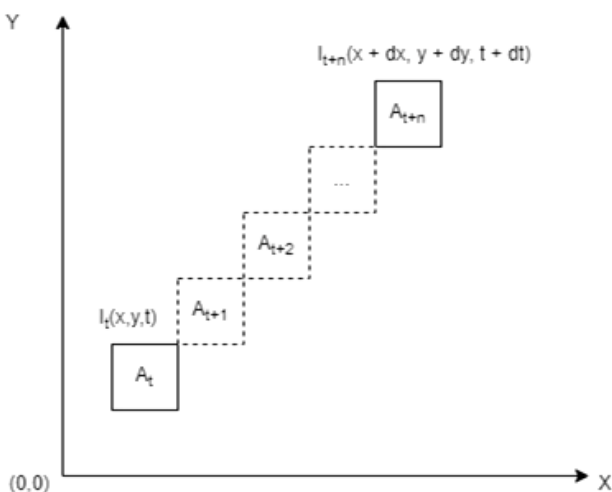


Рис. 6 – Особливості оптичного потоку та поле потоку

Основне припущення для оптичного потоку полягає в тому, що зовнішній вигляд сцени суттєво не змінюється між кадрами та що сцена плавно переходить від одного зображення до наступного. Потік часто локально рівномірний, однак на межах сцени можуть виникнути розриви. Інше припущення полягає в тому, що сцена складається з розширених досить гладких поверхонь, які рухаються жорстко або принаймні плавно спотворюються під час руху. Обсяг руху між кадрами невеликий і порівняно з розміром зображення, що означає, що вектори оптичного потоку малі для пари зображень. Хорн [11] зробив новаторську роботу з розробки методів оптичного потоку, заснованих на обчисленні просторово-часових відмінностей від послідовності зображень. З тих пір було розроблено багато методів і алгоритмів для визначення оптичного потоку, таких як диференціальні методи, методи

узгодження на основі області, методи на основі енергії та методи на основі фази [13].

Одним із таких алгоритмів є алгоритм оптичного потоку Канаде-Лукаса, який використовується, оскільки він надійний, точний, нечутливий до шуму та нерівномірних джерел світла та підходить для обчислень у реальному часі. У цьому методі нехай I_t буде зображенням у градаціях сірого, отриманим у момент часу t_t , і зображенням у градаціях сірого I_{t+1} у момент часу t_{t+1} . Нехай друге зображення переміститься на відстань $(\Delta x, \Delta y)$ відносно першого зображення протягом інтервалу часу між двома зображеннями Δt . Якщо масив просторових точок належить об'єкту A на зображенні I_t , і A є тим самим об'єктом, що й A , лише на зображенні I_{t+1} після часу Δt . Тоді можна побудувати вектори зміни об'єкта в часі, як показано на рис. 7.

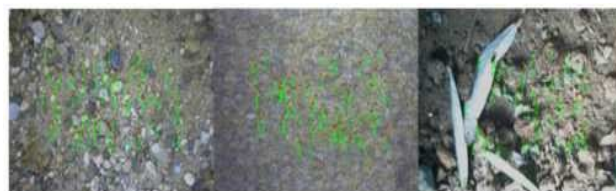


Рис. 7 – Оброблене поле оптичного потоку різного типу місцевості

B. Модель камери

Модель камери зображена на рис. 8, що дозволяє розрахувати залежність між положенням об'єкта в просторі та положенням його пікселя. У цьому дослідженні ми використали модель стереокамери, щоб встановити зв'язок між точками в 3D-просторі та точками на зображенні.

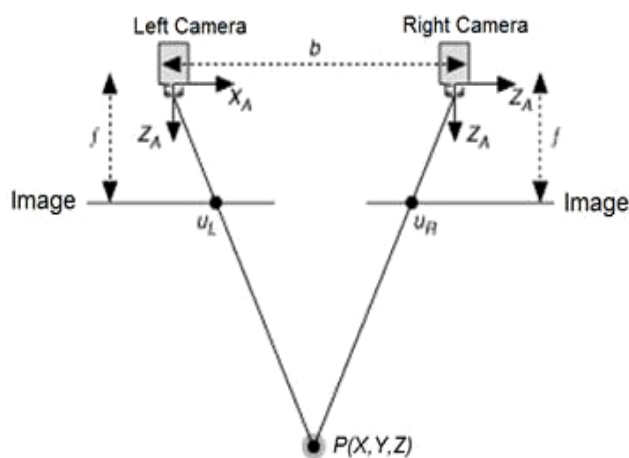


Рис. 8 – Схематична модель використаної стереокамери

Де $d = UL - UR$ різниця в положенні зображення однієї точки при проектуванні в перспективі на дві різні камери. Отже, глибина точки $Z=b \cdot f/d$, де b – відстань між двома камерами ліворуч і праворуч; f – фокусна відстань фотоапарата; X_A – вісь X камери; Z_A оптична вісь камери. P – фізична точка, визначена координатами X, Y і Z ; UL – проекція реальної фізичної точки P на зображення, зроблене лівою камерою; UR – це проекція реальної фізичної точки P на зображення, зроблене правою камерою.

С. Алгоритм розрахунку лінійної швидкості

Для одновимірної оцінки швидкості кожне вікно функції на одному зображенні рухатиметься з однаковою швидкістю. Якщо розглядається лише одне вікно функції, оцінена частота може коливатися через помилки вибірки. Таким чином, вибрано 10 вікон ознак, і середній оптичний потік d використовується для оцінки швидкості для кожної пари зображень. Потім розрахована швидкість фільтрується за допомогою ПР-фільтра низьких частот для подальшого усунення шуму. Процедура оцінки швидкості така:

- Виконайте ініціалізацію стереокамери. Процес внутрішнього калібрування камери: фокусна відстань f . Встановіть початкову змінну, яка визначає кількість кадрів для визначення швидкості та початкової висоти камери.
- Отримайте два послідовних зображення I_t і I_{t+1} .
- Кількість хороших властивостей для відстеження визначається методом, запропонованим у [12, 13]. Цей метод має тенденцію вибирати кутові елементи на зображенні, що зменшує обчислювальне навантаження для визначення оптичного потоку кожного пікселя в цілому зображенні.
- Застосуйте алгоритм оптичного потоку до I_t і I_{t+1} , щоб отримати швидкість руху об'єкта, яка є середнім оптичним потоком 20 пар кадрів.
- Розрахувати лінійну швидкість за запропонованим у [12, 13] методом, використовуючи рівняння. Розрахункова швидкість, отримана після застосування ПР-фільтра низьких частот.
- Повторіть описану вище процедуру для 20 послідовностей зображень. Далі ця процедура представлена на блок-схемі, показаній на рис. 9.

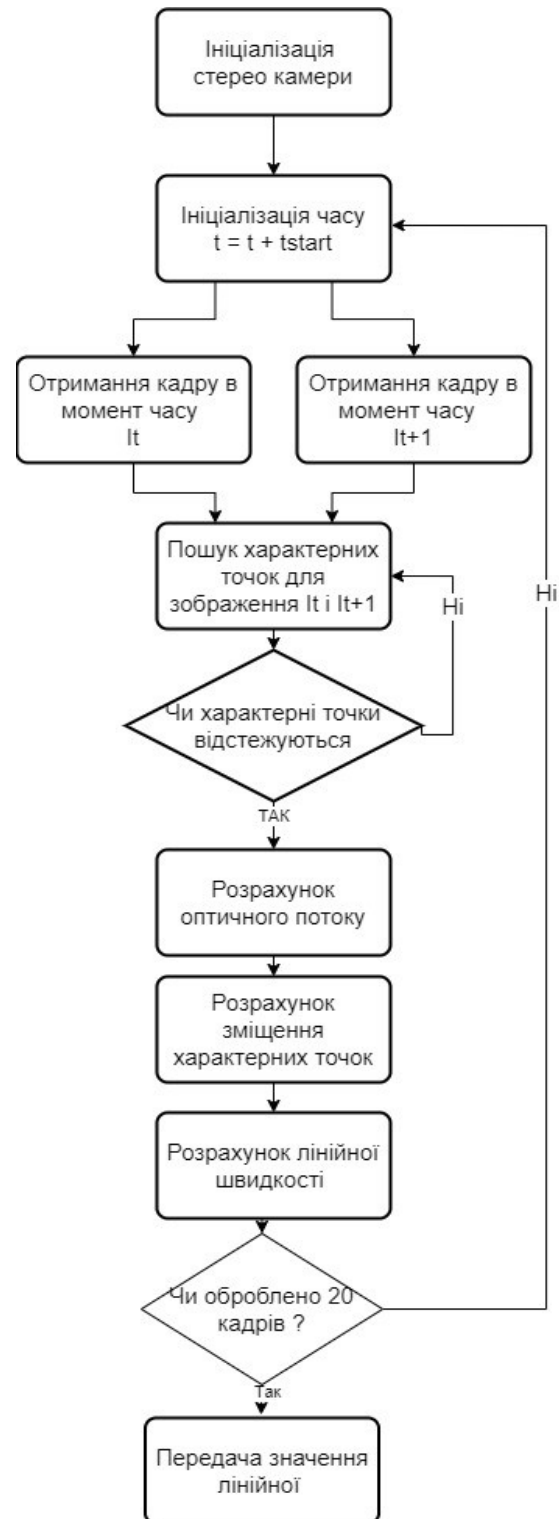


Рис. 9 – Алгоритм розрахунку лінійної швидкості

Регулятор швидкості електроприводу

Використання комп'ютерного зору в каналі керування електроприводом роботизованої платформи реалізовано шляхом інтеграції зворотного зв'язку на виході з блоку обробки

відеопотоку. Вихід блоку обробки відеопотоку формує значення лінійної швидкості. В якості регулятора для нашої роботизованої платформи був реалізований ПІД-регулятор. ПІД-регулятор є типовим блоком управління і широко використовується. ПІД-регулятор швидкості зі зворотним зв'язком із блогу обробки стереокамери, показаний на рис. 10.

Обговорення результатів

На рис. 11 показано три різних підходи до оцінки лінійної швидкості. Перший графік показує динаміку зміни лінійної швидкості отриману за допомогою симуляції та розрахунків в програмі MATLAB/Simulink. Другий графік демонструє зміну лінійної швидкості отриманої за допомогою оптичного енкадера і одометрії колеса робототехнічної платформи.

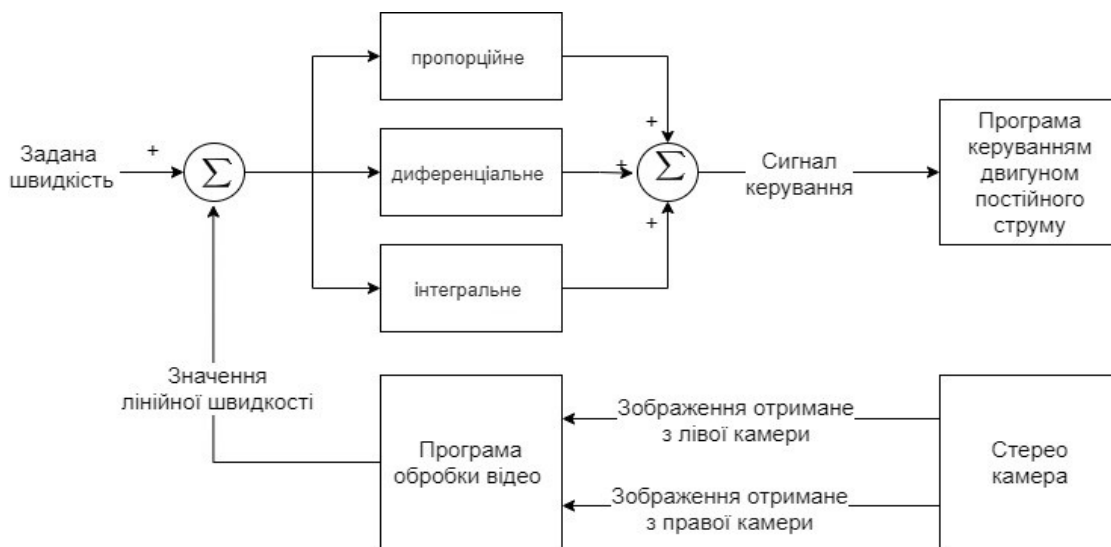


Рис. 10 – Регулятор потужності тягових двигунів для електроприводу роботизованої платформи з використанням комп'ютерного зору

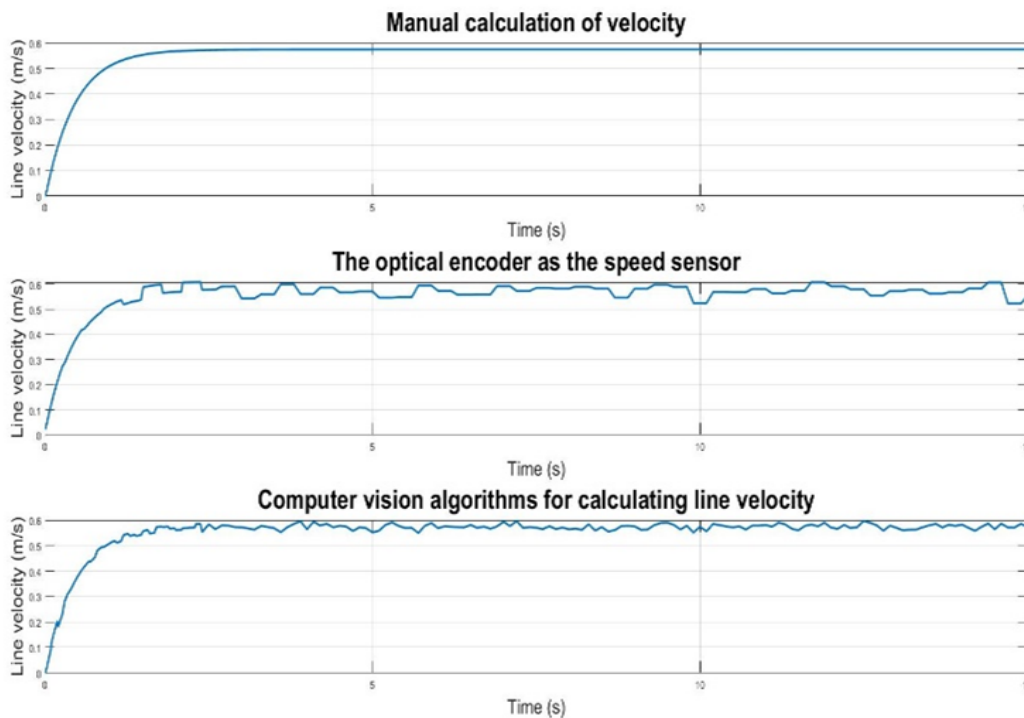


Рис. 11 – Експериментальні результати динаміки зміни лінійної швидкості роботоплатформи при використанні моделювання, оптичного енкадера та алгоритмів комп'ютерного зору

Результати виміру лінійної швидкості за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору продемонстровані на третьому графіку. Порівняння результатів показали працездатність використання алгоритмів комп'ютерного зору, так як похибка склала менше 2%.

Висновки

Запропонований алгоритм керування оцінкою швидкості та його доцільність оцінюється за допомогою спеціально розробленого випробувального стенду. Показано, що швидкість можна передбачити з відносно високою точністю.

Швидкості, виміряні точними оптичними енкадерами, порівнюються зі швидкостями, передбаченими алгоритмом оптичного потоку, показуючи дуже хорошу відповідність. Також було встановлено оптимальний розмір вікна ознак для оцінки швидкості оптичного потоку в реальному часі. Загалом підхід має потенціал для точної оцінки швидкості. Експерименти проводяться для різних реальних умов, а подальші дослідження будуть спрямовані на розробку надійної автономної системи вимірювання швидкості.

Впровадження сучасних цифрових технологій комп'ютерного зору дозволить не тільки покращити тягові характеристики електроприводу, а й розширити функціональні можливості тягового електроприводу в рамках високих вимог до промислового обладнання.

Список літератури

1. Клепиков В. Б. О фрикционных автоколебаниях в электроприводах. *Электричество*. 1986. № 4. С. 59-62.
2. Клепиков В. Б. *Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография*. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. 408 с.
3. Kyrylenko Y., Kutovyi Yu, Obruch I., Kunchenko T. Neural Network Control of a Frequency-Regulated Electric Drive of a Main Electric Locomotive. *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240880.
4. Kutovyi Yu., Kyrylenko Y., Obruch I., Kunchenko T. Application of Intelligent Control Systems in Electric Drives of Rail Vehicles. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 709-713. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570026.
5. Georgiev A., Allen P. K. Localization methods for a mobile robot in urban environments. *IEEE Transactions On Robotics And Automation*. 2004. Vol. 20, № 5. P. 851-864. doi: 10.1109/TRO.2004.829506.
6. Panzieri S., Pascucci F., Ulivi G. An outdoor navigation system using GPS and inertial platform. *IEEE-ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*. 2002 Vol. 7, № 2. P. 134-142. doi: 10.1109/TMECH.2002.1011250.

7. Lobo J., Dias J. Vision and inertial sensor cooperation using gravity as a vertical reference. *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*. 2003. Vol. 25, № 12. P. 1597-1608. doi: 10.1109/TPAMI.2003.1251152.
8. De Jong K. Genetic Algorithms: A 10 Year Perspective. *The First Int. Conf. on Genetic Algorithms: Proceedings*. 1985. P. 167 - 177.
9. Reinhard K. *An Introduction into Theory and Algorithms in Computer Vision*. 2014.
10. Howse J., Minichino J. *Learning OpenCV 4 Computer Vision with Python 3*. 3rd Edition. 2020.
11. Horn B. K. P. and Schunck B. G. Determining Optical flow. *Artificial Inteligence*. 1981. 17. P. 185-203. doi: 10.1016/0004-3702(81)90024-2.
12. Lucas B. D. and Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. Imaging Understanding Workshop*. 1981. P. 121-130.
13. Barron J. L., Fleet D. J., and Beauchemin S. S. Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*. 1994. Vol. 12, № 1. P. 43-77. doi: 10.1007/BF01420984.

References (transliterated)

1. Klepikov V. *O frikcionnyh avtokolebaniyah v elektroprividah* [About frictional selfoscillations in electric drives]. *Elektrichestvo*, 4, 1986, pp. 59-62.
2. Klepikov V. *Dinamika elektromehaniicheskikh sistem s nelinejnym treniem: monografija* [Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: monograph], *Kharkiv: NTU "KhPI"*, 2014. 408 p.
3. Kyrylenko Y., Kutovyi Yu., Obruch I., Kunchenko T. Neural Network Control of a Frequency-Regulated Electric Drive of a Main Electric Locomotive. *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240880.
4. Kutovyi Yu., Kyrylenko Y., Obruch I., Kunchenko T. Application of Intelligent Control Systems in Electric Drives of Rail Vehicles. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2021, pp. 709-713, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570026.
5. Georgiev A., Allen P. K. Localization methods for a mobile robot in urban environments. *IEEE Transactions On Robotics And Automation*, 2004, Vol.20, № 5, pp. 851-864, doi: 10.1109/TRO.2004.829506.
6. Panzieri S., Pascucci F., Ulivi G. An outdoor navigation system using GPS and inertial platform. *IEEE-ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, 2002, Vol. 7, 2, pp. 134-142, doi: 10.1109/TMECH.2002.1011250.
7. Lobo J., Dias J. Vision and inertial sensor cooperation using gravity as a vertical reference. *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 2003, Vol. 25, 12, pp. 1597-1608, doi: 10.1109/TPAMI.2003.1251152.
8. De Jong K. Genetic Algorithms: A 10 Year Perspective. *The First Int. Conf. on Genetic Algorithms: Proceedings*. 1985. P. 167 - 177.
9. Reinhard K. *An Introduction into Theory and Algorithms in Computer Vision*. 2014.
10. Howse J., Minichino J. *Learning OpenCV 4 Computer Vision with Python 3*. 3rd Edition. 2020.
11. Horn B. K. P., Schunck B. G. Determining Optical flow. *Artificial Inteligence*, 1981, 17, pp. 185-203, doi: 10.1016/0004-3702(81)90024-2.

12. Lucas B. D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. *Proc. Imaging Understanding Workshop*, 1981, pp. 121-130.
13. Barron J. L., Fleet D. J., and Beauchemin S. S. Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*, 1994, Vol. 12, 1, pp. 43-77, doi: 10.1007/BF01420984.

Відомості про авторів (About authors)

Воробійов Богдан Віталійович – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри АЕМС; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0264-354X>; e-mail: bohdan.vorobiov@khpі.edu.ua.

Vorobiov Bohdan – Ph. D., National technical university "Kharkiv polytechnic institute", head of the department AEMS; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0264-354X>; e-mail: bohdan.vorobiov@khpі.edu.ua.

Сенченко Сергій Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри АЕМС; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2471>; e-mail: Serhii.Senchenko@ieeee.khpі.edu.ua.

Senchenko Serhii – National technical university "Kharkiv polytechnic institute", postgraduate student of the department AEMS; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2471>; e-mail: Serhii.Senchenko@ieeee.khpі.edu.ua.

Кириленко Ярослав Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри АЕМС; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>; e-mail: Yaroslav.Kyrylenko@ieeee.khpі.edu.ua.

Kyrylenko Yaroslav – National technical university "Kharkiv polytechnic institute", assistant of the department AEMS; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>; e-mail: Yaroslav.Kyrylenko@ieeee.khpі.edu.ua.

Ліхно Ярослав Владленович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри АЕМС; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7082-7562>; e-mail: Yaroslav.Likhno@ieeee.khpі.edu.ua.

Likhno Yaroslav – National technical university "Kharkiv polytechnic institute", postgraduate student of the department AEMS; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7082-7562>; e-mail: Yaroslav.Likhno@ieeee.khpі.edu.ua.

Хань Лю – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри АЕМС; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8182-0040>; e-mail: seanhanzi@aliyun.com.

Khan Liu – National technical university "Kharkiv polytechnic institute", postgraduate student of the department AEMS; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8182-0040>; e-mail: seanhanzi@aliyun.com.

Кутовий Юрій Миколайович - к.т.н., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри АЕМС; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>; e-mail: yurii.kutovyi@khpі.edu.ua

Kutovyi Yurii - Ph.D, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor of the department AEMS; Kharkiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>; e-mail: yurii.kutovyi@khpі.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Воробійов Б. В., Сенченко С. О., Кириленко Я. О., Ліхно Я. В., Хань Л., Кутовий Ю. М. Вимірювання лінійної швидкості з використанням мобільної роботизованої платформи з комп'ютерним зором. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 34-42. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.05.

Please cite this article as:

Vorobiov B., Senchenko S., Kyrylenko Y., Likhno Y., Khan L., Kutovyi Yu. Measurement of linear velocity using a mobile robotic platform with computer vision. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 34-42, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.05.

*Надійшла (received) 01.08.2023
Прийнята (accepted) 06.09.2023*

УДК 620.179

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.06

РЕКОМЕНДОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ТОМОГРАФІЧНОГО КОНТРОЛЮ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

В. Р. КРИКУН, Ю. В. ХОМЯК*, М. Є. ПОЗНЯКОВА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА
e-mail: homyak.yv@gmail.com

АНОТАЦІЯ У роботі представлена детальна технологія проведення томографічного контролю у лабораторних умовах. Томографічний контроль є потужним інструментом для отримання високоякісних тривимірних зображень внутрішньої структури об'єктів. Розглянуто переваги методу, що включають недеструктивний характер контролю, високу роздільну здатність, точність вимірювань та здатність виявляти невидимі для людського ока дефекти. Основна увага приділена опису основних етапів проведення томографічного контролю, що рекомендовані для досягнення максимальної ефективності. Висвітлено можливі помилки, які можуть виникнути під час проведення томографічного контролю в лабораторних умовах, а також наведено шляхи їх усунення. Розглянуто оптимальні параметри, які необхідно враховувати під час проведення томографічного контролю, зокрема правильний вибір параметрів томографа, налаштування умов освітлення та правильне позиціонування об'єкта контролю. Детально описано процес обробки отриманих даних контролю, що допомагає забезпечити якісний аналіз інформації. Також проведено аналіз доцільності виконання стадій контролю, де порівнюються результати, отримані на різних етапах, та розглядається їхній вплив на кінцевий результат. Ця робота є цінним джерелом інформації для фахівців, які займаються томографічним контролем у лабораторних умовах. Описана технологія та рекомендації допоможуть підвищити якість та ефективність проведення томографічного контролю в їх роботі. Результати досліджень, представлені в статті, можуть сприяти поліпшенню процесу контролю, зниженню помилок і виявленню навіть найменших дефектів у зразках. У цілому, дана робота пропонує рекомендовану технологію проведення томографічного контролю в лабораторних умовах, враховуючи ключові аспекти, такі як переваги методу, етапи контролю, усунення помилок, оптимальні параметри, позиціонування об'єкта та обробка даних. Враховуючи ці рекомендації, фахівці зможуть забезпечити більш точний, ефективний і надійний томографічний контроль у своїй роботі. Отже, стаття стане цінним доповненням до наукової літератури з області недеструктивного контролю, сприятиме розвитку цього методу в лабораторних умовах.

Ключові слова: кількість проєкцій; аналіз пористості; металеві фільтри; високоабсорбуючі матеріали; розмір вокселю; позиціонування об'єкта; Фельдкамп артефакти.

RECOMMENDED TECHNOLOGY FOR TOMOGRAPHIC INSPECTION IN THE LABORATORY

V. KRYKUN, Yu. HOMYAK, M. POZNIAKOVA

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Paper presents a detailed technology of tomographic inspection in the laboratory. Tomographic inspection is a powerful tool for obtaining high-quality three-dimensional images of the internal structure of objects. The advantages of the method are considered, which include the non-destructive nature of the control, high resolution, measurement accuracy, and the ability to detect defects invisible to the human eye. The main attention is paid to the description of the main stages of tomographic inspection, which are recommended to achieve maximum efficiency. Possible errors that may occur during tomographic inspection in the laboratory are highlighted, and ways to eliminate them are provided. The optimal parameters that should be taken into account during tomographic inspection are considered, including the correct choice of tomograph parameters, setting of lighting conditions, and correct positioning of the object under inspection. The process of processing the obtained inspection data is described in detail, which helps to ensure high-quality information analysis. The authors also analyze the feasibility of the control stages, comparing the results obtained at different stages and considering their impact on the final result. This work is a valuable source of information for specialists involved in tomographic control in the laboratory. The described technology and recommendations will help to improve the quality and efficiency of tomographic inspection in their work. The research results presented in this article can improve the inspection process, reduce errors, and detect even the smallest defects in samples. In general, this paper offers a recommended technology for tomographic inspection in the laboratory, taking into account key aspects such as the advantages of the method, inspection stages, error elimination, optimal parameters, object positioning, and data processing. Taking these recommendations into account, specialists will be able to provide more accurate, efficient and reliable tomographic control in their work. Thus, this article will be a valuable addition to the scientific literature in the field of non-destructive testing, will help improve the quality of tomographic testing and promote the development of this important method in the laboratory.

Keywords: number of projections; porosity analysis; metal filters; highly absorbent materials; voxel size; object positioning; Feldkamp artifacts

Вступ

У сучасному світі технології контролю та діагностики розвиваються зі швидкістю світла, тому постійно з'являються нові методики та технології

дослідження. Одним з найбільш ефективних та популярних методів діагностики є томографічний неруйнівний контроль (ТНК). Цей метод дозволяє отримати детальні зображення внутрішньої структури

об'єктів та виявити різні види дефектів на ранніх стадіях виробництва.

У роботі розглянуто рекомендовану технологію проведення ТНК в лабораторних умовах. Вона передбачає використання спеціального обладнання, яке дозволяє проводити дослідження з високою точністю та швидкістю. Важливою складовою цієї технології є правильне розташування об'єкту контролю та використання фільтруючих екранів.

Описана технологія має широкий спектр застосування у різних галузях промисловості та матеріалознавства. Вона дозволяє отримати надійну та точну інформацію про стан об'єктів дослідження, що робить її незамінною для багатьох наукових та практичних завдань.

Томографічний контроль є незамінним методом дослідження, оскільки дозволяє отримати детальну інформацію про внутрішню структуру об'єктів та виявляти різноманітні дефекти. Цей метод діагностики використовується у багатьох галузях промисловості, включаючи автомобілебудування, літакобудування, електронну промисловість, нафтогазову галузь та інші.

Наприклад, в автомобілебудуванні томографічний контроль використовується для перевірки якості зварних з'єднань, виявлення дефектів у двигунах та інших вузлах автомобілів. У літакобудуванні томографічний контроль використовується для виявлення складних дефектів у композитних матеріалах та металевих сплавах, що забезпечує безпечну експлуатацію повітряних суден.

Також, томографічний контроль дозволяє виявляти невидимі дефекти у складних електронних компонентах, що можуть впливати на їх функціональність та ефективність. В нафтогазовій галузі томографічний контроль застосовується для виявлення дефектів у зварних з'єднаннях нафтогазопроводів та інших споруд, що забезпечує безпечну експлуатацію цих об'єктів.

Таким чином, томографічний контроль є важливим методом дослідження у промисловості, що дозволяє виявляти різноманітні дефекти та забезпечувати безпеку експлуатації об'єктів. Застосування цього методу дослідження дозволяє підвищити якість продукту та зменшити ризики виникнення аварій, що може забезпечити економічну та соціальну користь. Проте, проведення томографічного контролю у промислових умовах може бути складним і вимагати великої кількості ресурсів та знань. Тому важливо мати рекомендовану технологію проведення томографічного контролю, що дозволить забезпечити якість досліджень та зменшити ризик помилок.

Мета роботи

Мета роботи полягає у визначенні оптимальних технологічних підходів та методик для проведення томографічного контролю в лабораторних умовах.

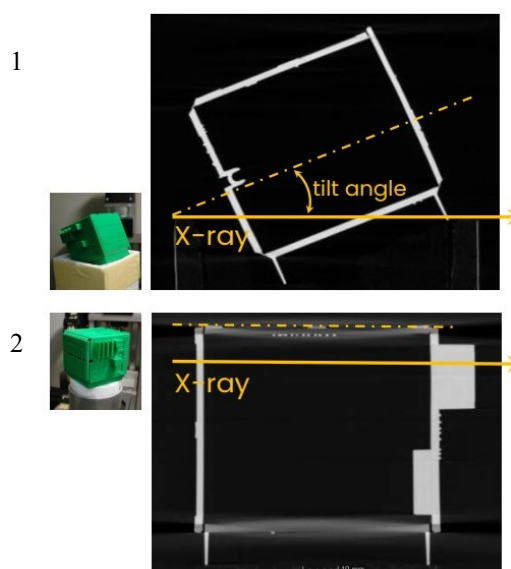
Стаття спрямована на систематизацію знань щодо рекомендованих технологій томографічного контролю у лабораторних умовах і надання практичних рекомендацій для науковців.

Основна частина

Залежно від вимог виробництва та специфіки підприємства існує безліч томографів та технологій проведення томографічного контролю в лабораторних умовах. Розглянемо найуніверсальнішу технологію, яку можна використати майже при будь-якому томографічному контролі.

Перед проведенням ТНК варто ретельно оглянути об'єкт контролю (ОК), при наявності шлаку, окалини або інших забруднень його очищують. Розташування ОК виконується під нахилом, щоб уникнути Фельдкамп артефактів (рис. 1). Кут нахилу повинен бути більшим ніж кут розкриття проміння рентгенівської трубки томографа. Необхідно уникати ситуацій, коли зразок встановлений без нахилу, в іншому випадку горизонтальні поверхні після реконструкції будуть утворювати артефакти [1, 3, 8].

Фельдкамп артефакти (Feldkamp artifacts) – це артефакти, що можуть виникати під час проведення комп'ютерної томографії за методом реконструкції Фельдкампа.



- 1 – приклад правильного розташування ОК, на реконструкції видно, що усі грані чіткі та легко контрольовані;
2 – приклад неправильного розташування ОК, на реконструкції видно, що грані котрі були горизонтальні та паралельні променю рентгенівського випромінювання утворили переходи або Фельдкамп-артефакти

Рис. 1 – Приклад поширення променів рентгенівського випромінювання

Реконструкція Фельдкампа – один з методів реконструкції об'ємної моделі з серії 2D зображень, отриманих під час сканування. Цей метод використовується у більшості сучасних томографів. Він передбачає обчислення томографічних зображень на основі декількох проекцій з різних кутів.

Після правильного встановлення ОК у програмному забезпеченні для налаштування режиму сканування створюється проект з його унікальною назвою та налаштовуються параметри сканування. Для детектора треба обрати такі параметри: час експозиції, групування, чутливість. Також треба активувати такі параметри по можливості – зсув, посилення, піксельну маску. Для рентгенівського випромінювання треба обрати напругу та силу струму – вони обираються у діапазоні можливостей томографа та відповідно до розмірів ОК та матеріалу з якого він вироблений (табл. 1), але щоб гістограма співвідношення сірого мала відповідне співвідношення сірого, яке ми розглянемо пізніше. Фільтр – обирається відповідно до ОК який сканується, зазвичай це мідні, свинцеві та олов'яні пластини товщиною 0,5–1 мм. Фокус обирається відповідно до можливостей томографа і розмірів ОК та дефектів котрі нам треба знайти. Загалом, обирається великий, нормальний або малий фокус відповідно до можливостей томографа [4, 9].

Далі необхідно обрати область інтересу (ROI), керуючи маніпулятором (YS, ZS – осі). В якості ROI можна вибрати як весь зразок цілком, так і сегмент зразка, це обирається відповідно до потреб технічного процесу. Розмістити зразок на предметному столику таким чином, щоб область інтересу (ROI) завжди залишалася у полі зору детектору при обертанні зразка на 360°. Необхідний розмір вокселя (volume pixel) можна встановити зміною відстані між зразком та рентгенівською трубкою (Focus Object-Distance), що досягається пересуванням осі маніпулятора ZS. При положенні поблизу рентгенівської трубки або детектора обов'язково переконайтеся, що не станеться колізії зразка з трубкою або детектором під час обертання зразка на 360°. Після підбраного положення між рентгенівською трубкою та детектором запам'ятовується, зберігається розташування ОК [5, 6, 11].

Вибір параметрів рентгенівського випромінювання проводиться залежно від гістограми рівнів сірого. У разі інспекції (наприклад, аналіз пористості): 1) мінімальний рівень сірого у зразку має бути вищим за 100 при мінімальній чутливості; 2) максимальний рівень сірого на детекторі без зразка має бути нижчим, ніж 10 000; 3) відношення мінімального рівня сірого у зразку та максимального рівня сірого фону без зразка має бути між 2 та 20, у складних випадках можливо до 50. Для зразків з дуже високою поглинаючою здатністю можуть застосовуватись інші рекомендації.

Таблиця 1 – Рекомендовані параметри для високоабсорбуючих матеріалів

Типові стартові параметри при контролі високоабсорбуючих матеріалів					
Матеріал	Товщина	Напруга	Фільтр (мм)		
	(мм)		(кВ)	+Cu	+Sn
Пластик, вуглепластик	100–300	300	0–3,0	–	–
Алюміній, кераміка	10–250	450	0,5	0–0,5	0–2,0
Сталь	10–50	450	0,5	0–0,5	2,0–4,0
Сплав на основі нікелю	10–50	450	0,5	0–0,5	2,0–4,0

Збільшення, що характеризується розміром вокселя, встановлюється таким чином, щоб для зразка було досягнуто найкращу ефективну роздільну здатність (див. діаграму рис. 2) [3,4,5,12].

Калібрування детектору (рис. 3). Після встановлення параметрів сканування необхідно переконатися, що стан маніпулятора ЧПУ/CNC збережено:

- 1) перемістити зразок за межі зображення за допомогою ЧПУ/CNC;
- 2) вимкнути рентген і зачекати 30 секунд;
- 3) провести калібрування, тобто натиснути кнопку «detector calib»;
- 4) обрати Gain/Offset auto з двома точками гейн корекції;
- 5) встановити в калібруванні для усереднення (average) значення, яке в 20 разів і більше вище значення усереднення, яке буде використано для інспекції зразка;
- 6) натиснути кнопку «Acquire» ... зачекати ...;
- 7) перевірити гомогенність або рівномірність зображення без ОК;
- 8) перемістити ОК на місце сканування або натиснути «Move to acquire position».

Вибір оптимальної кількості проекцій, яка залежить від ширини детектора:

- 1) визначити, скільки пікселів по ширині займає зразок під час повного повороту;
 - 2) знайти оптимальну кількість проекцій у відповідній рентгенівській трубці таблиці;
 - 3) внести це значення у поле «Images» (рис. 4).
- Залежність оптимального кількості проекцій від розміру фокусу трубки (червона та синя лінія, рис. 5) та розміру вокселя на позиції сканування (вісь абсцис). Необхідно зазначити, що кількість проекцій розраховано для випадку коли зразок займає 100% ширину детектора. Якщо зразок займає детектор не повністю – це пропорційно зменшить кількість проекцій [3,5,7,10].

Після усіх цих процедур налаштування режиму сканування треба натиснути кнопку «START».

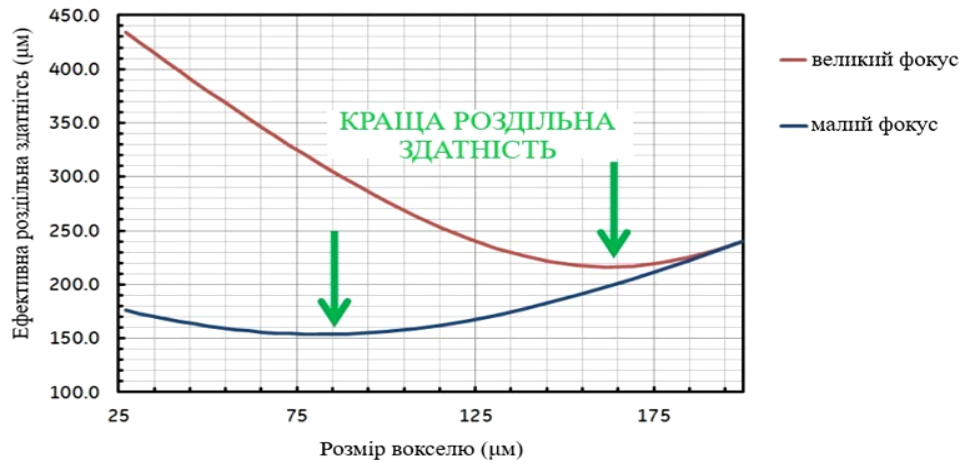


Рис. 2 – Діаграма відношення ефективної роздільної здатності до розміру вокселя

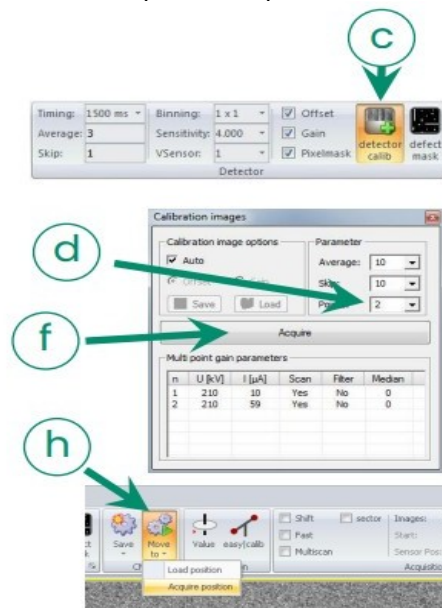


Рис. 3 – Приклад обрання параметрів для калібрування детектора

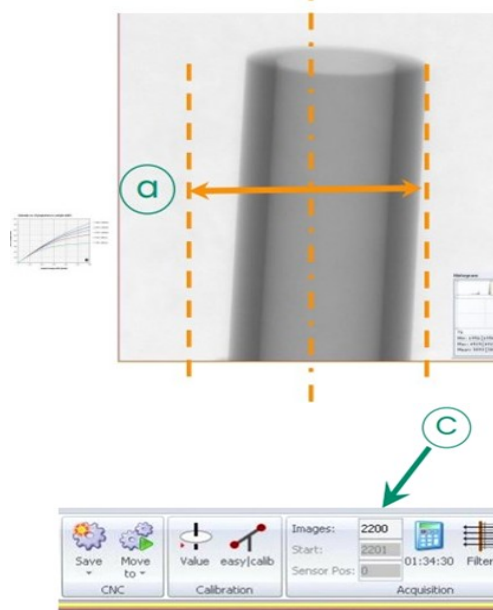


Рис. 4 – Приклад вибору оптимальної кількості проєкцій

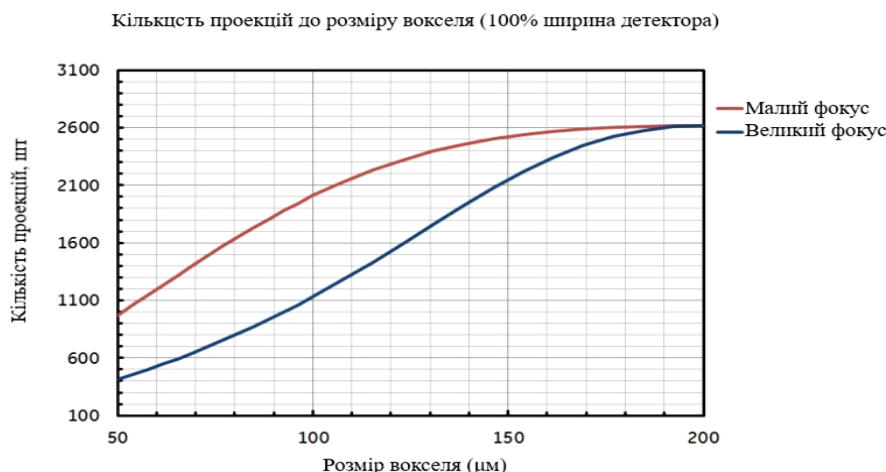


Рис. 5 – Діаграма співвідношення кількості проєкцій до розміру вокселя

У програмному забезпеченні реконструкції треба відкрити відповідний проєкт, який було створено та названо в попередніх кроках. Існує безліч модулів корегування та покращення якості реконструкції, такі як автокалібрування, оптимізація сканування і т.д. Ці модулі обираються відповідно вимогам технічного процесу та можливостям томографа.

Після всіх маніпуляцій з налаштуванням режиму реконструкції треба натиснути кнопку «START» та почати реконструкцію. Після завершення завантаження об'єму використовується спеціальне ПО для відтворення та інспекції 3D-моделі ОК та виявлення дефектів [2].

Висновки

Встановлення правильного режиму комп'ютерної томографії є важливим етапом підготовки до проведення томографічного контролю в лабораторних умовах. Це включає вибір оптимальних параметрів пристрою, таких як енергія рентгеновського випромінювання, потужність, час експозиції та інші налаштування, що забезпечують отримання якісних зображень тестових об'єктів.

Використання приведеної технології томографічного контролю в лабораторних умовах дозволяє отримати якісні результати досліджень, забезпечує точність та надійність вимірювань, дозволяє виявити дефекти тестових об'єктів на ранніх стадіях технічного процесу.

Рекомендована технологія проведення томографічного контролю в лабораторних умовах може бути використана в різних наукових та промислових галузях, таких як металургія, авіаційна промисловість, медична діагностика та багато інших, де вимагається високий рівень точності та надійності контролю.

Список літератури

- Pengfei Zh., Shuangfang L., Junqian L., Ping Zh., Liujuan X., Haitao X., Jie Zh. Multi-component segmentation of X-ray computed tomography (CT) image using multi-Otsu thresholding algorithm and scanning electron microscopy.

- Energy Exploration & Exploitation*. 2017. № 35, Iss. 3. P. 282–294. doi: 10.1177/014459871769009.
- Shengxin L., Zongxiu Wa., Linyan Zh. Experimental study on the cracking process of layered shale using X-ray microCT. *Energy Exploration & Exploitation*. 2018. № 36, Iss. 2. P. 185–351. doi:10.1177/0144598717736855.
- Philipp J., Stammen E., Dilger K. Advanced analytics of elastic adhesive bonds by means of in situ computed tomography. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2020. 234, Iss. 5. P. 405–519. doi:10.1177/0954408920912145.
- Rymarczyk T., Kozłowski E., Kłosowski G. Electrical impedance tomography in 3D flood embankments testing – elastic net approach. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2020. № 42, Iss. 4. P. 645–923. doi:10.1177/0142331219857374.
- Rosic N., Mollo M., Bernal C., Cosmi F. The effect of microstructure on the tensile and impact behaviour of short-glass fibre-reinforced polyamide 6.6 as assessed by micro-computed tomography. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2023. doi:10.1177/14644207231181315.
- Fedorko G., Molnár V., Dovica M., Tóth T., Fabianová J., Strohmmandl J., Neradilová H., Hegedűš M., Beluško M. *Analysis of defects in carcass of rubber-textile conveyor belts using metrotomography*. *Journal of Industrial Textiles*. 2018. № 47. Iss.7. P. 1427–1864. doi: 10.1177/1528083717710712.
- Philipp J., Stammen E., Dilger K. Particle tracking-based in-situ computed tomography measurement technique for advanced analytics of adhesive bonds. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2022. 0. doi:10.1177/09544089221111271.
- Kaliuzhnyi O. Y. Method of Principal Informative Components in Problems of Statistical Measurements of Signal Parameters (Systematic Review). *Radioelectronics and Communications Systems*. 2019. № 62. P. 541–558.
- Danyk A. Y., Sudakov O. O. Optimized Estimation of Scattered Radiation for X-ray Image Improvement: Realistic Simulation. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2020. Vol. 63. № 8. doi: 10.3103/S0735272720080014.
- Vikulin I. M., Gorbachev V. E., Nazarenko A. A. Radiation sensitive detector-based V. E. on field-effect transistors. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2017. 60. P. 401–404. doi: 10.3103/S0735272717090035.
- Sabaté-Llobera A., Reynés-Liompert G. and et al. Imaging Gallbladder Lesions: What Can Positron Emission

Tomography/Computed Tomography Add to the Conventional Imaging Approach? *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2023. № 47(3). P. 343–349.

12. Huber N. R., KJiwoo K., Shuai L., McCollough C., Lifeng Yu. Deep Learning–Based Image Noise Quantification Framework for Computed Tomography. *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2023. № 47(4), P. 603–607. doi: 10.1097/rct.0000000000001469.

References (transliterated)

1. Pengfei Zh., Shuangfang L., Junqian L., Ping Zh., Liujuan X., Haitao X., Jie Zh.. Multi-component segmentation of X-ray computed tomography (CT) image using multi-Otsu thresholding algorithm and scanning electron microscopy. *Energy Exploration & Exploitation*, 2017, no 35, iss.3, pp. 282–294, doi:10.1177/014459871769009.
2. Shengxin L., Zongxiu Wa., Linyan Zh. Experimental study on the cracking process of layered shale using X-ray microCT. *Energy Exploration & Exploitation*, no. 36, iss. 2, 2018, pp. 185–351, doi:10.1177/0144598717736855.
3. Philipp J., Stammen E., Dilger K. Advanced analytics of elastic adhesive bonds by means of in situ computed tomography. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*, 2020, no. 234, iss. 5, pp. 405–519, doi:10.1177/0954408920912145.
4. Rymarczyk T., Kozłowski E., Kłosowski G. Electrical impedance tomography in 3D flood embankments testing – elastic net approach. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2020, no. 42, iss. 4, pp. 645–923, doi:10.1177/0142331219857374.
5. Rosic N., Mollo M., Bernal C., Cosmi F. The effect of microstructure on the tensile and impact behaviour of short-glass fibre-reinforced polyamide 6.6 as assessed by micro-computed tomography. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2023, doi:10.1177/14644207231181315.
6. Fedorko G., Molnár V., Dovica M., Tóth T., Fabianová J., Strohmmandl J., Neradilová H., Hegedűš M., Beluško M. Analysis of defects in carcass of rubber–textile conveyor belts using metrotomography. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, no. 47, iss. 7, pp. 1427–1864, doi:10.1177/1528083717710712.
7. Philipp J., Stammen E., Dilger K. Particle tracking-based in-situ computed tomography measurement technique for advanced analytics of adhesive bonds. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2022, no 0, doi:10.1177/0954408922111271.
8. Kaliuzhnyi O. Y. Method of Principal Informative Components in Problems of Statistical Measurements of Signal Parameters (Systematic Review). *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, no. 62, pp. 541–558.
9. Danyk A. Y., Sudakov O. O. Optimized Estimation of Scattered Radiation for X-ray Image Improvement: Realistic Simulation. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2020, Vol. 63, no. 8, doi: 10.3103/S0735272720080014.
10. Vikulin I. M., Gorbachev V. E., Nazarenko A. A. Radiation sensitive detector-based V. E. on field-effect transistors. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2017, 60, pp. 401–404, doi: 10.3103/S0735272717090035.
11. Sabaté-Llobera A., Reynés-Liompart G. and et al. Imaging Gallbladder Lesions: What Can Positron Emission Tomography/Computed Tomography Add to the Conventional Imaging Approach? *Journal of Computer Assisted Tomography*, 2023, no. 47(3), pp. 343–349.
13. Huber Nathan R.; Kim Jiwoo; Leng Shuai; McCollough Cynthia; Yu Lifeng Deep Learning–Based Image Noise Quantification Framework for Computed Tomography. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 2023, no. 47(4), pp. 603–607, doi: 10.1097/rct.0000000000001469.

Відомості про авторів (About authors)

Крикун Вадим Романович – аспірант кафедри «Комп’ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: vadmkrkun8@gmail.com.

Крыкун Вадым – PhD student of the Department “Computer and Radio-Electronic Control and Diagnostic Systems”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv; e-mail: vadmkrkun8@gmail.com.

Хомяк Юрій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Комп’ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: homyak.yv@gmail.com.

Khomyak Yurii – candidate of technical sciences, associate professor, Head of Department of the Department “Computer and Radio-Electronic Control and Diagnostic Systems”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv; e-mail: homyak.yv@gmail.com.

Познякова Маргарита Євгенівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Комп’ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: poznyakova-me@ukr.net.

Pozniakova Marharyta – candidate of technical sciences, associate professor of Department “Computer and Radio-Electronic Control and Diagnostic Systems”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv; e-mail: poznyakova-me@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крикун В. Р., Хомяк Ю. В., Познякова М. Є. Рекомендована технологія проведення томографічного контролю в лабораторних умовах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 43-48. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.06.

Please cite this article as:

Krykun V., Khomyak Yu., Pozniakova M. Recommended technology for tomographic inspection in the laboratory. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 43-48, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.06.

*Надійшла (received) 03.08.2023
Прийнята (accepted) 07.09.2023*

УДК 358.31, 358.238, 629.122, 629.1.03, 629.1.07

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.07

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСУ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОЖЕЖ У БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЛЯХ У МІСТАХ УКРАЇНИ

О. Г. ПОЛІВАНОВ

кафедра інженерної та аварійно-рятувальної техніки, Національний університет цивільного захисту, м. Харків, УКРАЇНА
e-mail: nuczu.iart.polivanov@gmail.com

АНОТАЦІЯ Ефективність гасіння пожежі залежить від швидкості прибуття на місце пожежежно-рятувальних підрозділів та часу, який буде затрачено на подачу "першого" ствола (вогнегасної речовини) на локалізацію. Швидка подача вогнегасної речовини дає шанс локалізувати, а потім ліквідувати пожежу у початковій фазі, адже результат суттєво залежить від дій в «перші хвилини пожежі». Проведено поділ міських населених пунктів на відповідні групи за чисельністю населення та площею території із використанням методів кластерного аналізу. З кожної групи міст було відібрано по одному населеному пункту і далі по ним опрацьовані дані щодо пожеж за період 2020 року. Проаналізовано статистичні дані, які були отримані від оперативно-координаційних центрів ДСНС України в містах Київ, Харків, Полтава, Бердянськ, що характеризують процес гасіння пожеж, а саме час прибуття пожежежно-рятувальних підрозділів до місця пожежі, час локалізації пожежі та площу пожежі. Статистичні дані обирались тільки для багатоповерхових будівель. Встановлено взаємозв'язок наступних параметрів: площа горіння, поверх будівлі, час локалізації пожежі. Отримані статичні дані свідчать, що площа пожежі та час локалізації збільшується у середньому від 3,5 до 6 разів. Результат аналізу даних надає наочне розуміння необхідності удосконалення наявних засобів і способів (тактики) гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях. Запропоновано в основу тактики гасіння пожеж у багатоповерхових будинках використовувати імпульсний вогнегасник Тайфун-10, який перероблено у пневматичну гармату для дискретної доставки вогнегасних речовин, поміщених у спеціальний контейнер. Дискретна доставка вогнегасних речовин у контейнері дозволяє скоротити час локалізації пожеж у багатоповерхових будівлях за рахунок оперативності розгортання установки та точної подачі в віконний отвір безпосередньо в осередок пожежі.

Ключові слова: багатоповерхові будівлі; пожежегасіння; вогнегасні речовини; дискретна подача вогнегасних речовин.

STUDY OF FIRE LOCATION TIME IN HIGH-STORY BUILDINGS IN CITIES OF UKRAINE

O. POLIVANOV

department of engineering and emergency rescue equipment, National University of Civil Defence, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The effectiveness of extinguishing a fire depends on the speed of arrival of fire and rescue units at the scene and the time it will take to deliver the "first" barrel (extinguishing agent) to the location. The rapid supply of fire extinguishing agent gives a chance to localize and then eliminate the fire in the initial phase, although the result depends significantly on the action in the "first minutes of the fire". The urban settlements into appropriate groups based on population and territory using methods of cluster analysis were divided. One settlement was selected from each group of cities, and then data on fires for the period of 2020 was processed. The statistical data obtained from the operational coordination centers of the State Emergency Service of Ukraine in the cities of Kyiv, Kharkiv, Poltava, and Berdyansk, which characterize the process of extinguishing fires, namely the time of arrival of fire and rescue units at the scene of the fire, the time of localization of the fire and the area of the fire, were analyzed. Statistical data were selected only for high-rise buildings. The interrelationship of the following parameters was established: burning area, building floor, time of fire localization. The obtained static data indicate that the area of fire and the time of localization increases on average from 3.5 to 6 times. The result of the data analysis provides a clear understanding of the need to improve the available means and methods (tactics) of extinguishing fires in multi-story buildings. We proposed to use the Typhoon-10 impulse fire extinguisher, which has been converted into a pneumatic gun for the discrete delivery of fire extinguishing substances placed in a special container, as the basis of firefighting tactics in multi-story buildings. Discrete delivery of fire-extinguishing substances in a container allows to reduce the time of localization of fires in multi-story buildings due to the efficiency of deployment of the installation and accurate delivery through the window opening directly to the center of the fire.

Keywords: high-rise buildings; fire extinguishing; fire extinguishing substances; discrete supply of fire extinguishing substances.

Вступ

З розвитком технологій та устаткування, що використовується у будівництві, щорічно зростає кількість висотних будівель. Багатоповерхові будівлі належать до об'єктів з масовим перебуванням людей.

Крім того там знаходяться великі матеріальні цінності. Виникнення пожеж та надзвичайних ситуацій у цих будівлях може призвести до великих матеріальних збитків та загибелі людей. Саме цим і обумовлено особливу увагу до проблеми забезпечення безпеки людей в багатоповерхових

будівлях при виникненні пожежі. Масштабні пожежі, що сталися в останні роки довели необхідність переозброєння оперативно-рятувальних підрозділів новою технікою та засобами пожежогасіння. Одним з перспективних напрямків пожежогасіння у багатоповерхових будівлях [1] є застосування дискретної подачі вогнегасних речовин до осередку пожежі. Завдяки цьому способу, можливо знизити час локалізації пожежі, за рахунок подачі вогнегасних речовин у контейнерах з зовні будівлі через віконні отвори.

Мета роботи

Відомо, що чим більша площа пожежі, тим більше необхідно засобів пожежогасіння для успішної локалізації та ліквідації горіння. Але на сьогодні невідомі дані або статистика, завдяки яким можливо розрахувати кількість вогнегасних речовин для успішної локалізації пожежі. Отже невирішеною частиною проблеми гасіння пожеж у багатоповерхових будинках є встановлення зв'язку між такими параметрами, як площа горіння, поверхом будівлі де виникло загорання та часом локалізації пожежі. Зв'язок цих параметрів дозволить визначити кількість вогнегасної речовини, в залежності від поверху пожежі, під час використання способу дискретної доставки вогнегасних речовин.

Виклад основного матеріалу

У роботі [2] метою дослідження є підвищення ефективності ліквідації пожеж за рахунок скорочення часу виявлення осередку пожежі при використанні тепловізорів. Визначено час розвитку пожежі також було проведено аналіз значень часу прибуття підрозділів до місця пожежі час ліквідації пожеж, але поза увагою авторів залишилося дослідження площі пожеж.

Дослідниками [3] проаналізовано фактори, що впливають на пожежу висотних будівель також проведена оцінка пожежної небезпеки що є основним способом зниження та контролю пожеж в висотних будівель. Слід зауважити, що авторами не виявлено закономірності між поверхом будівлі, де виникла пожежа, площею гасіння та часом локалізації.

У роботі [4] запропоновано система пожежогасіння LY100 береться як приклад, щоб представити застосування пожежного дрона для контролю пожежі у висотних будинках. Недоліками даного способу пожежогасіння є: дорога вартість дрону, складність управління, потребується додаткове навчання оператора дрона, також постає питання доставки дрона до місця пожежі.

Авторами [5] цього дослідження полягало в тому, щоб забезпечити обізнаність і розуміння того, як пожежно-рятувальні служби використовують тактику у висотних будинках. У дослідженні також були розглянуті три приклади пожеж у висотних

будинках у двох країнах. У роботі [6] проведено параметричне дослідження стратегій евакуації в 32-поверховій типовій офісній будівлі під час різних сценаріїв впливу пожежі. Імітується рух пасажирів з усвідомленням ситуації та без нього. Оцінюється вплив таких критичних параметрів, як кількість поверхів, ширина шляхів виходу, розташування та кількість виходів на процес евакуації. Час, потрібний мешканцям для евакуації з будівлі, оцінюється за звичайних умов (щоб імітувати вправу евакуації при пожежі) і за реалістичного впливу пожежі.

Дослідниками [7] оцінюється пожежне навантаження та зростання пожежі для сучасних житлових квартир, використовуючи результати обстеження 50 багатоповерхових будинків у Стамбулі, Туреччина. Основу дослідження складають пожежні навантаження у житлових кімнатах, спальнях і кухнях.

У дослідженні [8] проаналізовано час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів до місця пожеж в висотні будівлі, запропоновано, щоб мінімальна вимога була такою: «принаймні одна пожежна машина з водою та одна автодрабина повинні прибути на місце пожежі висотної будівлі протягом 4 хвилин (240 с)».

Авторами [9] цієї роботи розробили підхід до моделювання реалістичної випадкової швидкості виділення тепла (HRR), створеного за допомогою процесу Гауса.

У [10] авторами дослідження проведені в надвисокій лікарні (17 поверх) у 2018–2019 роках. Проект було поділено на два етапи: 1) Підготовка 3D-моделі лікарні за допомогою програмного забезпечення для моделювання 3D CAD; 2) Техніка обчислювальної гідродинаміки (CFD) використовується для прогнозування динаміки пожежі (поширення диму, розподіл температури, швидкість виділення тепла та загальна енергія) у лікарні за допомогою Fire Dynamic Simulator (FDS).

У роботі [11] мета дослідження полягала в тому, щоб розробити систему індексів протипожежного захисту для вимірювання відповідності висотних житлових будинків протипожежним вимогам в еміраті Шарджа, а також розробити систему індексів для вимірювання ефективності реагування на пожежу, яка пов'язує два індекси, і чим вищий рівень відповідності, тим більше шансів на успішне реагування.

Отже, в результаті огляду літературних джерел [2–11] були виявлені питання, ще не досліджені іншими авторами, а саме взаємозв'язок між такими параметрами, як площа пожежі, поверх де вона виникла, та час локалізації такої пожежі. Це дозволяє сформулювати наступний напрямок досліджень, результат яких дозволить визначити кількість вогнегасної речовини, в залежності від поверху пожежі, при використанні тактики гасіння пожеж в багатоповерхових будівлях дискретної подачі вогнегасних речовин у контейнерах [12].

Міста можуть значно відрізнятися по чисельності населення та площі території, що впливає на кількість викликів підрозділів та час виконання окремих оперативних робіт. Враховуючи це, необхідно провести поділ міських населених пунктів на відповідні групи за чисельністю населення та площею території. Вказане дослідження проводилося на прикладі міських населених пунктів України. Загалом були зібрані статистичні дані про чисельність населення міських населених пунктів та площу їх територій. Вказані статистичні дані були отримані з офіційних сайтів Головних управлінь статистики в областях та офіційних сайтів міських рад. Загалом для дослідження були відібрані дані про 176 міських населених пунктів України. Поділ населених пунктів на групи проводився із використанням методів кластерного аналізу. Через те, що статистичні дані для проведення аналізу мали різні розмірності, на першому етапі було проведено нормування даних. Наступний етап досліджень передбачав проведення ієрархічного кластерного аналізу з побудовою вертикальної дендрограми. У якості міри відстані для

ознак кластеризації було обрано евклідову метрику, а з метою побудови ієрархічної структури був використаний метод Варда. За принципом наочності кластиризації за дендрограмою було визначено кількість кластерів. Їх кількість склала чотири. На третьому етапі досліджень було проведено перевірку точності отриманих за результатами ієрархічного кластерного аналізу результатів шляхом виконання повторного аналізу з використанням ітеративного методу групування *k*-середніх. Мірою відстані для ознак кластеризації під час використання вказаного методу групування була також евклідова метрика. В результаті проведення цього аналізу було виконано групування міських населених пунктів України на чотири групи за чисельністю населення та площею території. Різниця між визначеними кластерами за критерієм евклідової відстані наведена в табл. 1. Чисельність населених пунктів по визначеним групам та середні значення і середнє квадратичне відхилення показників за якими проводилося групування наведені в табл. 2.

Таблиця 1 – Евклідова відстань між кластерами

Номер кластеру	1	2	3	4
1	0	42,5447	74,9984	68,1881
2	6,52263	0	4,88304	3,63132
3	8,66016	2,20976	0	0,23931
4	8,25760	1,90560	0,48919	0

Таблиця 2 – Результати проведення кластерного аналізу ітераційним методом *k*-середніх

Номер кластеру	Кількість населених пунктів, які входять у групу	Середня чисельність населення міст, чоловік	Середнє квадратичне відхилення показника чисельності населення міст, чоловік	Середня площа міст, км ²	Середнє квадратичне відхилення показника площі міст, км ²
1	1	2965255	–	836	–
2	12	682725	366233	366,3	118,1
3	15	80207	30122	92,9	22,2
4	16	280365	60002	95,2	35,6

В склад першого кластеру ввійшло тільки одне місто – Київ. В другий кластер ввійшли міські населені пункти з чисельністю населення від 316492 до 1048958 чоловік та площею від 248,2 до 484,4 км². До цих міст належать, наприклад: Харків, Одеса, Львів, Луганськ, Донецьк, Дніпро та ін. Третій кластер складають міські населені пункти з чисельністю населення від 50085 до 110329 чоловік та площею від 70,7 до 115,1 км². До цієї групи міст ввійшли: Бахмут, Бердянськ, Довжанськ, Ірпінь,

Лисичанськ, Селидове, Покров та ін. Четвертий кластер складають міські населені пункти з чисельністю населення від 220363 до 340367 чоловік та площею від 59,6 до 130,8 км². Міськими населеними пунктами, які ввійшли до цього кластеру, наприклад, є: Вінниця, Житомир, Івано-Франківськ, Кременчук, Рівне, Полтава, Маріуполь, Суми, Чернігів та ін.

Наступним кроком було опрацювання статистичних даних, які характеризують процес

гасіння пожеж аварійно-рятувальними формуваннями міст. Дані були взяті з електронної системи ведення обліку пожеж та їх наслідків, яка використовується ДСНС України. З кожної групи міст було відібрано по одному населеному пункту і далі по ним опрацьовані дані щодо пожеж за період 2020 року. Для проведення досліджень були відібрані наступні міські населені пункти: Київ (1-й кластер), Харків (2-й кластер), Бердянськ (3-й кластер), Полтава (4-й кластер).

Обговорення результатів

У табл. 3 вказані дані щодо поверхів, де виникла пожежа, площі пожежі та часу ліквідації.

Графічні результати обробки статистичних даних у м. Харкові подано на рис. 1.

Аналізуючи графічну залежність, яка подана на рисунку 1, встановлено, що для м. Харків характерне збільшення часу локалізації пожежі, та відповідно збільшення її площі, при підвищенні поверху будівлі. Час локалізації при виникненні на 1 поверсі будівлі становить близько 10 хв, а площа пожежі приблизно

6 м². У разі виникнення пожежі на 9 поверсі час локалізації та площа пожежі збільшується майже у 3 рази, та становить 27 хв. Площа пожежі відповідно збільшується приблизно у 3,5 рази та становить майже 20 м². Отже результати свідчать, що при підвищенні висоти (поверху) зростає час локалізації і площа пожежі.

Графічні результати обробки статистичних даних у м. Київ подано на рис. 2.

Графік на рис. 2 свідчить, що час локалізації та площа пожежі мають характерність збільшуватися при підвищенні рівня (поверху) де виникла пожежа. Встановлено що найбільший час локалізації спостерігається при виникненні пожежі на 9 поверсі та становить майже 24 хв, площа пожежі відповідно складає 25,4 м². При зниженні рівня (поверху) виникнення пожежі час локалізації зменшується у 4 рази та становить 6 хв. Площа пожежі знижується у 6 разів, відповідно від 25 м² до 4,3 м².

Графічні результати обробки статистичних даних у м. Бердянськ подано на рис. 3.

Таблиця 3 - Результати обробки статистичних даних

Харків			Київ		
Поверх	Час локалізації	Площа пожежі	Поверх	Час локалізації	Площа пожежі
1	10,2	5,86	1	6,2	4,3
2	11,2	10,07	2	7,2	6,16
3	14,3	9,97	3	8,1	6,54
4	14,8	10,3	4	8,6	9,9
5	15,3	13	5	9,5	11,2
6	23,7	15,79	6	13,4	15,4
7	24,3	16,2	7	16,2	17,2
8	26,1	17,3	8	19,3	21,3
9	27,3	20,1	9	23,4	25,4
Бердянськ			Полтава		
Поверх	Час локалізації	Площа пожежі	Поверх	Час локалізації	Площа пожежі
1	6	3,3	1	10	6,25
2	5	5,2	2	12,25	8,1
3	8,5	11	3	13,5	9,3
4	9,75	11,2	4	15,6	11,2
5	11,1	13,2	5	17	14,1
6	23	16,3	6	20,2	16,4
7	28	20,5	7	24	18,1
8	29	22	8	24,5	19,2
9	27,2	20	9	25	22,1

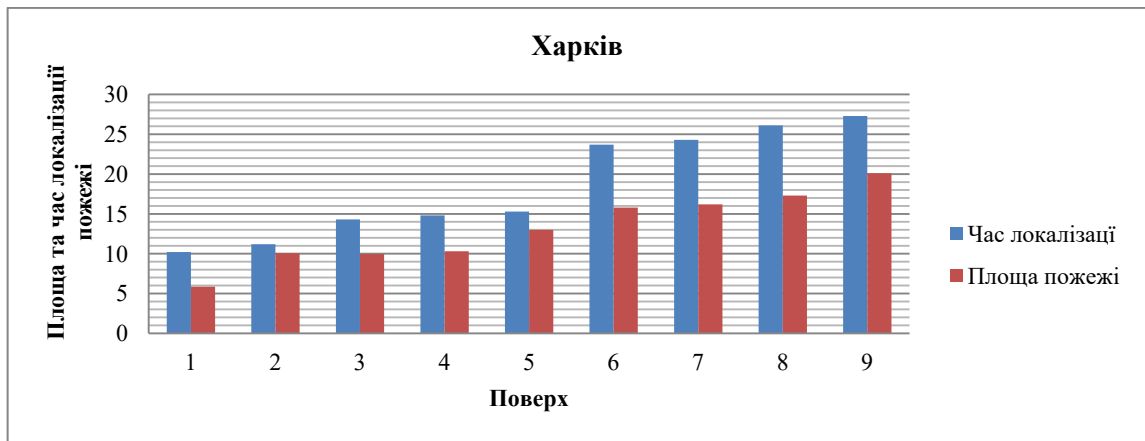


Рис. 1 - Залежність площі та часу локалізації пожежі від поверху, де вона виникла, м. Харків

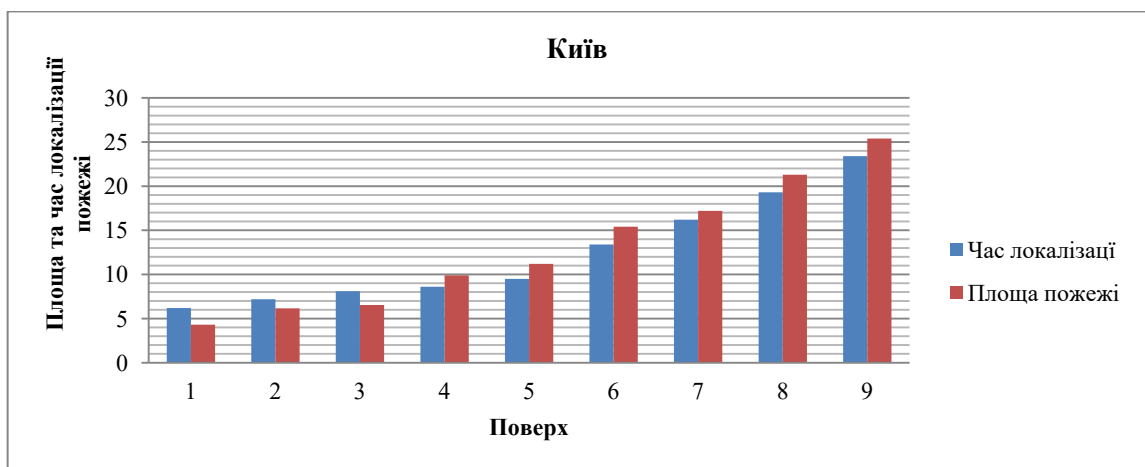


Рис. 2 - Залежність площі та часу локалізації пожежі від поверху де вона виникла, м. Київ

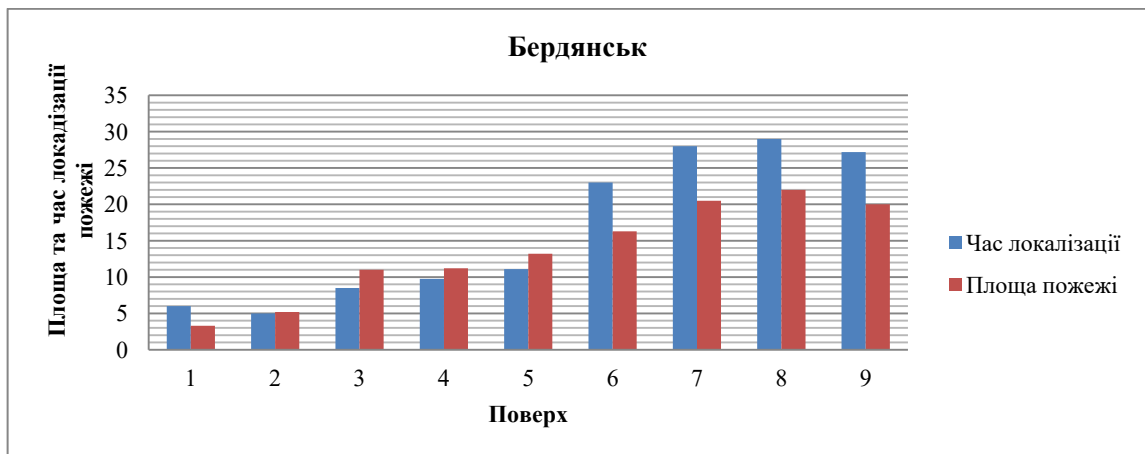


Рис. 3 - Залежність площі та часу локалізації пожежі від поверху де вона виникла, м. Бердянськ

Обробка статистичних даних у м. Бердянськ (рис. 3) дозволила встановити, з підвищення поверху де виникає пожежа, зростають також і час локалізації пожежі та її площа. Відповідно час локалізації при виникненні на 1 поверсі будівлі становить близько 6 хв, а площа пожежі приблизно 3 м². У разі

виникнення пожежі на 8 поверсі час локалізації та площа пожежі збільшується майже у 4 рази, та становить 27 хв. Площа пожежі відповідно збільшується майже у 7 разів та становить 22 м².

Графічні результати обробки статистичних даних у м. Полтава подано на рис. 4.

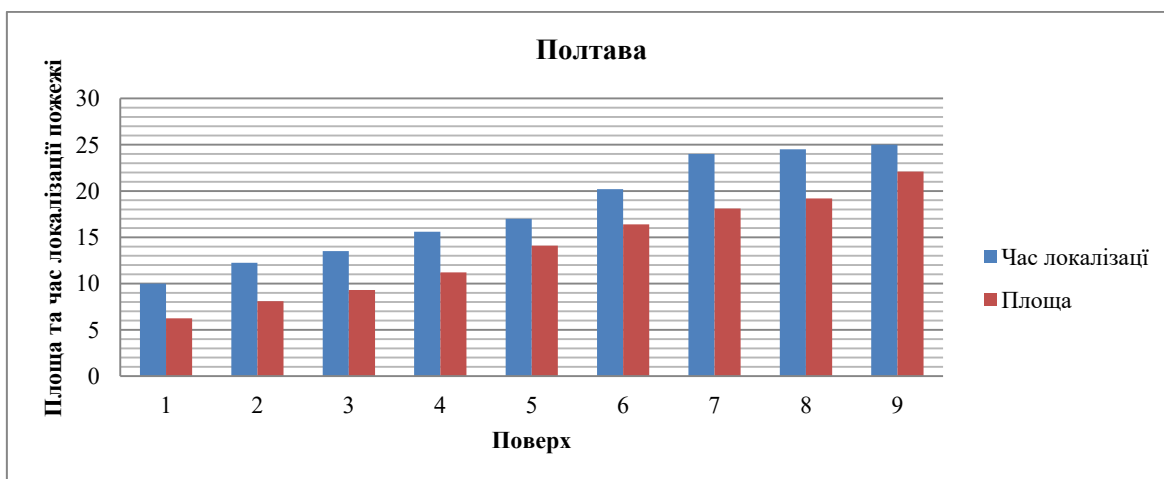


Рис. 4 - Залежність площі та часу локалізації пожежі від поверху де вона виникла, м. Полтава

У м. Полтава (рис. 4) також спостерігається збільшення часу локалізації пожежі та площі горіння, при підвищенні рівня (поверху) де виникла пожежа. Таким чином найменша площа горіння та найнижчий час локалізації спостерігається на 1 поверсі, відповідно 6,25 м² та 10 хв. У разі виникнення пожежі на 9 поверсі час локалізації становить 25 хв, що у 2,5 рази більше ніж на 1 поверсі. Стосовно площі горіння, вона відповідно збільшилась у 3,5 рази та становить майже 22,1 м².

Висновки

Проведено поділ міських населених пунктів на відповідні групи за чисельністю населення та площею території із використанням методів кластерного аналізу. Опрацьовано статистичні дані, які характеризують процес гасіння пожеж аварійно-рятувальними формуваннями міст. З кожної групи міст було відібрано по одному населеному пункту і далі по ним опрацьовані дані щодо пожеж за період 2020 року. Для проведення досліджень були відібрані наступні міські населені пункти: Київ (1-й кластер), Харків (2-й кластер), Бердянськ (3-й кластер), Полтава (4-й кластер).

Встановлено взаємозв'язок зв'язку наступних параметрів:

- площа горіння;
- поверх будівлі;
- час локалізації пожежі.

Для кожного з міст, що були оброблені спостерігається зростаюча динаміка стосовно площі пожежі та часу локалізації при підвищенні рівня (поверху) де виникла пожежа. Отримані статичні дані свідчать що площа пожежі та час локалізації збільшується у середньому від 3,5 до 6 разів, що зумовлює необхідність зменшення часу локалізації за рахунок подачі вогнегасних речовин у контейнерах (капсулах) зовні будівель. Результат аналізу даних надає можливість розрахувати кількість необхідної вогнегасної речовин під час використання дискретної

доставки вогнегасних речовин у контейнерах (капсулах). Результат аналізу даних надає наочне розуміння необхідності удосконалення наявних засобів і способів (тактики) гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях. Нами запропоновано в основу тактики гасіння пожеж у багатоповерхових будинках використовувати імпульсний вогнегасник Тайфун-10, який перероблено у пневматичну гармату для дискретної доставки вогнегасних речовин, поміщених у спеціальний контейнер. Дискретна доставка вогнегасних речовин у контейнері дозволяє скоротити час локалізації пожежі у багатоповерхових будівлях за рахунок оперативності розгортання установки та точної подачі в віконний отвір безпосередньо в осередок пожежі.

Список літератури

1. Kalinovskyi A., Polivanov O. Computer modeling of the trajectory delivery container with fire extinguisher substance for multi-story building. *Polish journal of science*. Warszawa, Poland, 2023. P. 24-28. doi: 10.5281/zenodo.8242545.
2. Гасанов Х. Ш. Підвищення ефективності ліквідації пожеж за рахунок скорочення часу виявлення осередку пожежі. Дисертація. 2018.
3. Song L. Z., Zhu J., Liu S. T., Qu Z. J. Recent Fire Safety Design of High-Rise Buildings. *J. Urban Dev. Manag.* 2022. № 1(1). P. 50-57. doi: 10.56578/judm010106.
4. Wang K., Yuan Y., Chen M., Lou Z., Zhu Z., Li R.. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*. 2022. №5(3). P. 75. doi:10.3390/fire5030075.
5. Arewa A. O., Ahmed A., Edwards D. J., Nwankwo C. Fire Safety in High-Rise Buildings: Is the Stay-Put Tactic a Misjudgement or Magnificent Strategy? *Buildings*. 2021. № 11(8). P. 339. doi:10.3390/buildings11080339.
6. Kodur V. K. R., Venkatachari S., Naser M. Z. Egress Parameters Influencing Emergency Evacuation in High-Rise Buildings. *Fire Technol.* 2020. № 56. P. 2035–2057. doi: 10.1007/s10694-020-00965-3.
7. Ugur Dundar, Serdar Selamet. Fire load and fire growth characteristics in modern high-rise buildings. *Fire Safety*

- Journal*. 2023. № 135. P. 2-13. doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103710.
8. Liu D., Xu Z., Yan L., Wang F. Applying Real-Time Travel Times to Estimate Fire Service Coverage Rate for High-Rise Buildings. *Applied Sciences*. 2020. № 10(19) P. 6632. doi: 10.3390/app10196632.
 9. Bilyaz S., Buffington T., Ofodike A. Ezekoye. The effect of fire location and the reverse stack on fire smoke transport in high-rise buildings. *Fire Safety Journal*. 2021. № 126. doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103446.
 10. Rahmani A., Salem M. Simulation of Fire in Super High-Rise Hospitals Using Fire Dynamics Simulator (FDS). *Electronic Journal of General Medicine*. 2020. № 17(3). em200. P 1-5. doi: 10.29333/ejgm/7848.
 11. Omar M., Mahmoud A., Aziz S. B. Fire Safety Index for High-Rise Buildings in the Emirate of Sharjah, UAE. *Fire* 2023. № 6. P. 51. doi: 10.3390/fire6020051.
 12. Поліванов О. Експериментальне дослідження дискретної доставки вогнегасної речовини в осередок пожежі. *Grail of Science*. 2023. 30. P. 119–121. doi: 10.36074/grail-of-science.04.08.2023.017.
 4. Wang K., Yuan Y., Chen M., Lou Z., Zhu Z., Li R. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*, 2022, 5(3), pp. 75. doi:10.3390/fire5030075.
 5. Arewa A. O., Ahmed A., Edwards D. J., Nwankwo C. Fire Safety in High-Rise Buildings: Is the Stay-Put Tactic a Misjudgement or Magnificent Strategy? *Buildings*, 2021, 11(8), pp. 339, doi:10.3390/buildings11080339.
 6. Kodur V. K. R., Venkatachari S., Naser M. Z. Egress Parameters Influencing Emergency Evacuation in High-Rise Buildings. *Fire Technol.*, 2020, 56, pp. 2035–2057, doi: 10.1007/s10694-020-00965-3.
 7. Ugur Dundar, Serdar Selamet. Fire load and fire growth characteristics in modern high-rise buildings. *Fire Safety Journal*, 2023, 135, pp. 2-13, doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103710.
 8. Liu D., Xu Z., Yan L., Wang F. Applying Real-Time Travel Times to Estimate Fire Service Coverage Rate for High-Rise Buildings. *Applied Sciences*, 2020, 10(19), pp. 6632, doi: 10.3390/app10196632.
 9. Bilyaz S., Buffington T., Ofodike A. Ezekoye. The effect of fire location and the reverse stack on fire smoke transport in high-rise buildings. *Fire Safety Journal*, 2021, 126, doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103446.
 10. Rahmani A., Salem M. Simulation of Fire in Super High-Rise Hospitals Using Fire Dynamics Simulator (FDS). *Electronic Journal of General Medicine*, 2020, 17(3), em200, pp. 1-5, doi: 10.29333/ejgm/7848.
 11. Omar M., Mahmoud A., Aziz S. B. Fire Safety Index for High-Rise Buildings in the Emirate of Sharjah, UAE. *Fire*, 2023, 6, pp. 51, doi: 10.3390/fire6020051.
 12. Polivanov O. Eksperymentalne doslidzhennia dyskretnoi dostavky vohnehasnoi rehovyny v oseredok pozhezhi. *Grail of Science*, 2023, 30, pp. 119–121, doi: 10.36074/grail-of-science.04.08.2023.017.

References (transliterated)

1. Kalinovskiy A., Polivanov O. Computer modeling of the trajectory delivery container with fire extinguisher substance for multi-story building. *Polish journal of science*. Warszawa, Poland, 2023, pp. 24-28, doi:10.5281/zenodo.8242545.
2. Hasanov Kh. Sh. Pidvyshchennia efektyvnosti likvidatsii pozhezhi za rakhunok skorochennia chasu vyivlennia oseredku pozhezhi. Dysertatsiia. 2018.
3. Song L. Z., Zhu J., Liu S. T., Qu Z. J. Recent Fire Safety Design of High-Rise Buildings. *J. Urban Dev. Manag.* №1(1), 2022, pp. 50-57, doi: 10.56578/judm010106.
4. Wang K., Yuan Y., Chen M., Lou Z., Zhu Z., Li R. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*, 2022, 5(3), pp. 75. doi:10.3390/fire5030075.
5. Arewa A. O., Ahmed A., Edwards D. J., Nwankwo C. Fire Safety in High-Rise Buildings: Is the Stay-Put Tactic a Misjudgement or Magnificent Strategy? *Buildings*, 2021, 11(8), pp. 339, doi:10.3390/buildings11080339.
6. Kodur V. K. R., Venkatachari S., Naser M. Z. Egress Parameters Influencing Emergency Evacuation in High-Rise Buildings. *Fire Technol.*, 2020, 56, pp. 2035–2057, doi: 10.1007/s10694-020-00965-3.
7. Ugur Dundar, Serdar Selamet. Fire load and fire growth characteristics in modern high-rise buildings. *Fire Safety Journal*, 2023, 135, pp. 2-13, doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103710.
8. Liu D., Xu Z., Yan L., Wang F. Applying Real-Time Travel Times to Estimate Fire Service Coverage Rate for High-Rise Buildings. *Applied Sciences*, 2020, 10(19), pp. 6632, doi: 10.3390/app10196632.
9. Bilyaz S., Buffington T., Ofodike A. Ezekoye. The effect of fire location and the reverse stack on fire smoke transport in high-rise buildings. *Fire Safety Journal*, 2021, 126, doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103446.
10. Rahmani A., Salem M. Simulation of Fire in Super High-Rise Hospitals Using Fire Dynamics Simulator (FDS). *Electronic Journal of General Medicine*, 2020, 17(3), em200, pp. 1-5, doi: 10.29333/ejgm/7848.
11. Omar M., Mahmoud A., Aziz S. B. Fire Safety Index for High-Rise Buildings in the Emirate of Sharjah, UAE. *Fire*, 2023, 6, pp. 51, doi: 10.3390/fire6020051.
12. Polivanov O. Eksperymentalne doslidzhennia dyskretnoi dostavky vohnehasnoi rehovyny v oseredok pozhezhi. *Grail of Science*, 2023, 30, pp. 119–121, doi: 10.36074/grail-of-science.04.08.2023.017.

Відомості про авторів (About authors)

Поліванов Олександр Геннадійович – викладач кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки, Національний університет цивільного захисту, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6396-1680; e-mail: nuczu.iart.polivanov@gmail.com.

Polivanov Oleksandr - department of engineering and emergency rescue equipment, National University of Civil Defence, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6396-1680; e-mail: nuczu.iart.polivanov@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Поліванов О. Г. Дослідження часу локалізації пожеж у багатоповерхових будівлях у містах України. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 49-55. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.07.

Please cite this article as:

Polivanov O. Study of fire location time in high-story buildings in cities of Ukraine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 49-55, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.07.

Надійшла (received) 16.08.2023
Прийнята (accepted) 13.09.2023

УДК 637.54:365.82

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.08

EFFECTS OF AGARICUS BISPORUS AND FLAMMULINA VELUTIPES MUSHROOMS ON QUALITY OF CHICKEN BATTERS

T. FOTINA^{1*}, XIONG ANQI², O. KOSHEL³, S. SABADASH³, R. YANKOVSKIY³

¹Faculty of Veterinary Medicine, Sumy National Agrarian University, Sumy, UKRAINE

²School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, CHINA

³Faculty of Food Technologies, Sumy National Agrarian University, Sumy, UKRAINE

*e-mail: eshkina97@gmail.com

ABSTRACT It was noted the modern tendencies of the cultivated mushrooms using as a fat substitutes in the technology of low-fat meat products. It was stated that variety of low-calorie, low-fat foods have come to the fore, and quickly become the mainstream of the future development of food. The mushrooms are worldwide cultivated and rich in protein, vitamins, dietary fiber, amino acids, polysaccharides, minerals, but low in fat and calories. In order to develop low-fat meat products, the compound of *Agaricus bisporus* and *Flammulina velutipes* mushrooms were used as fat substitute to replace the pork-back fat in chicken batters. The amino acids content of these mushrooms allows receiving a nice flavor and can be used in the minced meat. It was used a chicken meat as a well-liked raw material for emulsified products. For preparation of meat batters was used chicken breast, salt and sodium tripolyphosphate. The chicken meatballs were prepared with the cultivated mushrooms as fat-substitutes. The mushrooms were compounded to replace fat in chicken batters, and the effect of compounding these mushrooms on the quality of chicken mince was investigated to find the optimal ratio of fat replacement. The cooking loss, water holding capacity, color, texture and rheological properties of chicken batters were studied. The results showed that the compound of *Agaricus bisporus* and *Flammulina velutipes* improved the texture, increased the water holding capacity, redness and yellowness, and reduced the cooking loss and brightness of chicken batters. When the ratio of *Agaricus bisporus* and *Flammulina velutipes* was 2:1 to replace 30% pork-back fat, chicken batters showed the best quality. In conclusion, the combination of *Agaricus bisporus* and *Flammulina velutipes* is a promising fat substitute in the development of low-fat meat products.

Keywords: cultivated mushrooms; *Agaricus Bisporus*; *Flammulina velutipes*; chicken meat; fat

ВПЛИВ ГРИБІВ AGARICUS BISPORUS І FLAMMULINA VELUTIPES НА ЯКІСТЬ КУРЯЧОГО ФАРШУ

T. I. ФОТИНА^{1*}, А. СЙОНГ², О. Ю. КОШЕЛЬ³, С. М. САБАДАШ³, Р. В. ЯНКОВСЬКИЙ³

¹Факультет ветеринарної медицини, Сумський національний аграрний університет, Суми, УКРАЇНА

²Коледж харчової науки, Хенанський інститут науки і технологій, Сінсянь, КИТАЇ

³Факультет харчових технологій, Сумський національний аграрний університет, Суми, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ Розглянуто сучасні тенденції використання культивованих грибів як жирозамінників у технології м'ясних продуктів зі зниженим вмістом жиру. Встановлено, що різноманітність низькокалорійної їжі з низьким вмістом жиру вийшла на перший план і швидко стала основним напрямком майбутнього розвитку харчової продукції. Гриби, які використовувалися під час дослідження, культивуються в усьому світі та багаті білком, вітамінами, харчовими волокнами, амінокислотами, полісахаридами, мінералами, проте мають низький вміст жиру та невисоку калорійність. Для розробки м'ясних продуктів за зниженим вмістом жиру суміш грибів *Agaricus bisporus* та *Flammulina velutipes* використовувалася для заміни свинячого жиру в курячому фарші. Вміст амінокислот у грибах дозволяє отримати приємний смак і використовувати їх у фарші. Було використано куряче м'ясо, як популярну сировину для емульгованих продуктів. Для приготування м'ясного фаршу використовували курячу грудку, сіль і триполіфосфат натрію. З використанням культивованих грибів, як жирозамінника, були виготовлені курячі фрикадельки. Гриби були використані для заміни жиру в курячому фарші, було досліджено вплив суміші грибів на якість курячого фаршу, з метою визначення оптимального співвідношення такої заміни. Було вивчено теплові втрати, водоутримувальну здатність, колір, консистенцію та реологічні властивості курячого фаршу. Результати показали, що суміш *Agaricus bisporus* і *Flammulina velutipes* покращила текстуру, збільшила водоутримувальну здатність, колірні характеристики, а також зменшила втрати при тепловій обробці та яскравість курячого фаршу. Встановлено співвідношення *Agaricus bisporus* і *Flammulina velutipes*, що становило 2:1 для заміни 30% свинячого жиру, коли курячий фарш виявив найвищі показники якості. Таким чином, поєднання *Agaricus bisporus* і *Flammulina velutipes* є перспективним для заміни жиру при розробці м'ясних продуктів зі зниженим вмістом жиру.

Ключові слова: культивовані гриби; *Agaricus Bisporus*; *Flammulina velutipes*; м'ясо курки; жир

Introduction

Health issues become particularly important with the development of society. As one of the three major

nutrients in food, fat provides human body with the nutrients they need, but excessive intake of fat can lead to hypertension, myocardial infarction, stroke and other serious diseases and also easily lead to metabolic

syndrome, neuropsychiatric disorders and other diseases in obese people. Therefore, a variety of low-calorie, low-fat foods have come to the fore, and quickly become the mainstream of the future development of food [1]. However, fat has important influence on the physical properties of food, such as appearance, flavor, texture and rheology during food processing, the reduction or removal of fat will result in significant decrease in food quality. In view of this, the use of fat substitutes to develop and produce low-fat products that are as consistent as possible with the taste of traditional full-fat products has become a major development trend in the production of low-fat food products, showing great challenges and development potential [2].

Agaricus Bisporus (Ab) and *Flammulina velutipes* (Fv) mushrooms are cultivated worldwide and rich in protein, vitamins, dietary fiber, amino acids, polysaccharides, minerals, but low in fat and calories [3,4].

One of the most well-liked emulsified meat items around the world is chicken products. Typically, a chicken sausage comprises 20–35% fat, which is crucial for the water holding capacity, cooking loss, flavor, colour and textural qualities of emulsified products [1]. In this study, for the first time, Ab and Fv mushrooms were compounded to replace fat in chicken batters, and the effect of compounding Ab and Fv mushrooms on the quality of chicken mince was investigated to find the optimal ratio of fat replacement. Many studies have demonstrated that proteins and dietary fibers contribute to the formation of the gel system of minced meat [5,6]. The abundance of amino acids in Ab and Fv mushroom also adds flavor to minced meat. Therefore, Ab and Fv mushroom should be ideal fat substitutes. The results of this study can be used as a reference for the development of low-fat meat products.

The purpose of the work

The goal of the work is investigation of *Agaricus bisporus* and *Flammulina velutipes* as a valuable raw materials for fat substitutes in meat products.

Materials and Methods

Materials. Fresh chicken breast meat, pork-back fat, *Agaricus bisporus* (Ab) mushroom, *Flammulina velutipes* (Fv) mushroom, sugar, white pepper powder, sodium polyphosphate were obtained from Silpo Supermarket, Sumy, Ukraine. Methyl silicone oil was analytically pure grade.

Raw material treatment. Ab and Fv mushrooms were washed, dried (45°C for 12 h) and ground. Ab powder sieved through a 200 mesh sieve and Fv powder sieved through a 40 mesh sieve. The excess fat and connective tissue of the fresh chicken breasts and the excess connective tissue of pork-back fat were removed, and then chicken breasts meat and pork-back fat were

placed into vacuum bags respectively after being ground separately using a grinder with a 6 mm perforated plate, (MM-12, Guangdong, China). Then they were stored at -40°C.

Chicken batters preparation. The chicken meat and pork-back fat were thawed. The preparation of meat batters was carried out in an ice water bath as follows: chicken breast, salt and sodium tripolyphosphate were mixed in a cutter bowl (Joyoung S2-A808, Jinan, China) for 30 seconds. After a 3-minute break, the One-third of the ice water was added, and the mixture was then chopped for 30 seconds. Pork-back fat, Ab and Fv mushroom powder, white pepper powder, sugar, one-third of the ice water were added, and the mixture was then chopped for 2 minutes after a 3-minutes pause. Finally, the remaining one-third of the ice water was added, and the mixture was then chopped for 1 minute after a 3-minutes pause. The meat batters was placed into a 50 ml centrifuge tube and centrifuged at $500 \times g$ for 5 minutes to remove the residual air. The rheology was determined for the raw meat batters after the above treatments. The rest of the meat batters was boiled at 80 °C in a constant-temperature water bath for 30 minutes, and then cooled in the ice-water bath for 20 minutes. The cooked chicken batters were taken out for the determination of cooking loss, water holding capacity, color and texture.

Determination of cooking loss (CL). According to Choe et al. [7] with a slight modification, m_1 gram of raw chicken batters was placed into a 50ml centrifuge tube and cooked at 80°C. Next, the cooked chicken batters were weighed to obtain m_2 after absorbing the surface moisture with absorbent paper. Finally, the CL was calculated according to the following formula. For each formulation, the measurement was performed three times.

$$CL (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

Determination of water holding capacity (WHC). According to the method of Wang et al. [8] with a slight modification, about 10 g (m_1) of cooked chicken batters was wrapped in absorbent paper and placed into a 50 mL centrifuge tube and then centrifuged at 8000 r/min for 10 minutes. Next, cooked chicken batters was weighted after removing the absorbent paper to obtain m_2 . For each formulation, the measurement was performed three times.

Determination of color. According to the method of Zahari et al. [9] with a slight modification, the cooked chicken batters was cut into 2 cm cylinders. The colour of its center part was measured with CR-400 color meter, and the L^* value, b^* value and a^* value were recorded. Where L^* represented the brightness, a^* represented the redness, and b^* represented the yellowness. The colour of the Standard white colorimetric plate was $L^*=96.15$,

$a^*=0.70$, $b^*=1.83$. For each formulation, the measurement was performed five times.

Determination of texture profile analysis (TPA). According to the method of Li et al. [10] with a slight modification, the cooked chicken batters was cut into 2 cm small cylinders, and the hardness, springiness, cohesiveness and chewiness of chicken batters were measured by a texture analyzer with a P36R probe at 20°C. The texture properties of the sample were determined according to the following parameters: compression ratio, 50%; pre-test rate, 2.0mm/s; test rate, 2.0mm/s; post-test rate, 5 mm/s; test time, 5 s; trigger force, 5.0g. For each formulation, the measurement was performed three times.

Determination of rheological properties. According to the method of Xu et al.[11] with some modification, an appropriate amount of raw chicken batters was placed on the sample table of rheometer with a probe of p35TiL and a gap of 1 mm and sealed with silicone oil. Dynamic temperature scanning was carried out in the linear viscoelastic region of oscillation mode and 1% strain. Dynamic temperature scanning conditions as follows: the sample was held at 20 °C for 2 min; Heating procedure, 20~80 °C; heating rate, 2 °C/min. During the heating process, the sample was continuously shear in an oscillating mode and at a fixed frequency of 0.1 Hz, and the change of the storage modulus (G') during the dynamic scan was recorded. For each formulation, the measurement was performed three times.

Statistical analysis. The one-way ANOVA and means comparison test (Duncan) were used to examine the impact of the various formulations using SPSS 20.0 (IBM) statistical software, and the significance threshold was set at 5%. The data was expressed as mean \pm standard deviation.

Results and analysis

Effect of *Ab* and *Fv* mushrooms on the CL of chicken batters. Table 1 shows the effects of different proportions of *Ab* and *Fv* mushrooms on the CL of chicken batters. As can be seen from Table 2, compared to CK, the CL of chicken batters decreased significantly when adding *Ab* and *Fv* mushrooms ($P < 0.05$). There was no significant difference between the CLs of T₁, T₂, T₃ ($P > 0.05$). Meanwhile, T₄ had a significantly lower CL ($P < 0.05$). The low CL were attribute to the rich dietary fiber in the mushrooms, which has the ability to absorb water, showing high water retention [12].

Effect of *Ab* and *Fv* mushrooms on the WHC of chicken batters. Table 2 shows the effects of different proportions of *Ab* and *Fv* mushrooms on the WHC of chicken batters. As can be seen from Table 3 that WHC increases gradually with the

increase of the amount of *Ab* and *Fv* mushroom. WHC of T₁ group was significantly lower than that of CK group ($P < 0.05$), i.e., the WHC of batters with only the addition of *Ab* decreased. WHC of T₂ and T₃ groups was not significantly different from that of CK ($P > 0.05$), WHC of T₄ group was significantly higher than that of CK ($P < 0.05$). *Ab* and *Fv* mushrooms are rich in dietary fibers and carbohydrates. Dietary fiber dispersed in water can form a spherical gel solution, which can effectively enhance the water retention of chicken batters; carbohydrates combined with water molecules to form a reticulated gel that can retain a large amount of water [10]. This study showed that the addition of *Ab* and *Fv* compound effectively enhanced the WHC of chicken batters.

Effect of *Ab* and *Fv* mushrooms on colour of chicken batters. Table 3 shows the effects of different proportions of *Ab* and *Fv* mushrooms on the colour of chicken batters. From Table 4, it can be seen that the addition of *Ab* and *Fv* mushrooms complex decreased the brightness (L^*) and increased the yellowness (b^*) and redness (a^*) of chicken batters. As the amount of *Ab* and *Fv* mushrooms increased, the brightness decreased significantly ($P < 0.05$), and the yellowness and redness did not change significantly ($P > 0.05$). The main reason for this was the browning of *Ab* and *Fv* mushrooms during drying, which deepened their color and accordingly gave them a low brightness and high redness and yellowness [13].

Effect of *Ab* and *Fv* mushrooms on the TPA of chicken batters. Table 3 shows the effects of different proportions of *Ab* and *Fv* mushrooms on the TPA of chicken batters. From Table 4, it can be seen that *Ab* and *Fv* mushrooms changed the TPA of the chicken batters. The hardness and chewiness of the chicken batters increased significantly ($P < 0.05$) with the increase in the amount of *Ab* and *Fv* mushrooms, but there was no significant difference in chewiness between the T₃ and T₄ groups ($P > 0.05$). Springiness was significantly increased in T₂ group compared to CK ($P < 0.05$). The increase in hardness, chewiness and elasticity should be relative to the increased WHC and decreased cooking loss of the chicken batters due to the dietary fiber in the mushrooms [14]. The significant decrease in the cohesiveness of T₃ and T₄ groups compared to CK attribute to the ash contained in the mushrooms [6]. Taken together, the T₂ group showed improved firmness, chewiness and springiness without decreasing the cohesiveness of the chicken batters, and the T₂ group was the most effective in improving the TPA of the chicken batters.

Table 1 – Cooking loss of chicken batters

Treatments	CK	T1	T2	T3	T4
Cooking loss /%	2.98±0.25a	2.45±0.22b	2.23±0.11b	2.09±0.21b	1.61±0.20c

a-c Means within a line with different letters are significantly different (p < 0.05)

Table 2 – WHC of chicken batters

Treatments	CK	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
WHC/%	93.10±0.25bc	90.63±0.09d	92.77±0.20c	93.63±0.45b	94.55±0.37a

a-d Means within a line with different letters are significantly different (p < 0.05).

Table 3 – Colour of chicken batters

Treatments	L*	a*	b*
CK	87.89±0.30a	0.13±0.10b	12.63±0.47b
T ₁	69.01±0.58b	2.77±0.19a	16.46±0.41a
T ₂	68.34±0.59b	2.58±0.14a	16.21±0.26a
T ₃	64.63±1.14c	2.39±0.26a	16.69±0.25a
T ₄	61.76±0.38d	2.75±0.10a	16.25±0.21a

Effect of *Ab* and *Fv* mushrooms on the G' of chicken batters

Myofibrillar proteins and protein-protein interactions, particularly those involving the myosin protein, are constantly changing processes that are reflected in dynamic rheological properties. These processes are strongly related to the intramolecular and intermolecular binding in protein molecules. The matrix strength and elastic characteristics of the meat gel network are indicated by variations in the storage

modulus (G') [15]. As can be seen from Fig. 1, the changes of G' of chicken batters with different amount of *Ab* and *Fv* mushrooms had a similar trend, which was roughly divided into five stages. G' increased slightly (21~25 °C); G' slowly decreased (26~53 °C); G' continued to increase (54~59 °C), the myosin head polymerization in chicken batters made the reaction between proteins to form a weak gel in this stage[16]. G' appeared to fall sharply to

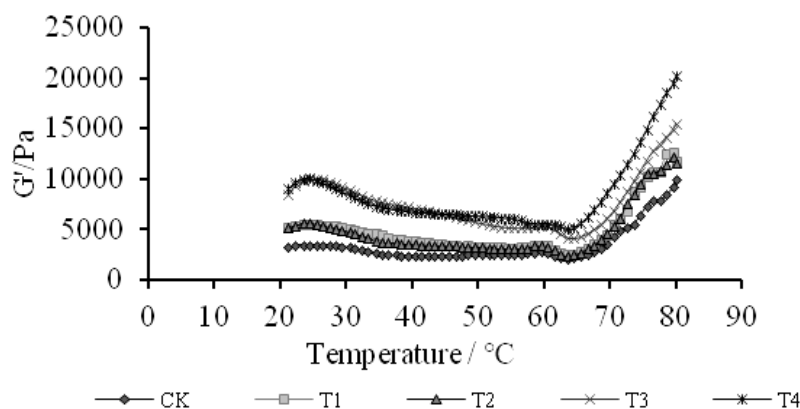


Fig. 1 – G' of chicken batters

reach the bottom (60~63 °C) due to the denaturation of the myosin tail in chicken batters, resulting in the

formation of the structure of the protein gel damage [5,17]. G' increased sharply (64~80 °C), the proteins

aggregated and formed a gel, and the semi-soluble gel formed an elastic gel after being heated, and then the chicken batters was transformed from a viscous-elastic sol-gel state to an elastic gel network structure in this stage [6,18]. Throughout the temperature rise, the G' of chicken batters with Ab and Fv mushrooms compound were greater than that of CK and increased with increasing mushroom amount. Higher G' values indicated a more compact meat gel structure, which was similar to the change in hardness values [19]. The addition of dietary fiber could effectively improve the solubility of proteins, thus increasing the G' value of the system, and the pattern of the change of its G' value is related to the gel denaturation temperature [10,20].

Conclusion

Partial replacement of pork-back fat in chicken batters with Ab and Fv mushrooms compound reduced cooking loss, increased redness and yellowness, decreased brightness and improved rheological properties of chicken batters. Water holding capacity, chewiness, hardness and springiness of chicken batters were increased, and the cohesiveness decreased significantly when fat substitution exceeded 30%. In conclusion: all the qualities of chicken batters were improved when Ab and Fv mushrooms were compounded at 2:1 to replace 30% of pork-back fat in chicken batters. Ab and Fv mushrooms compound is a promising fat substitute for producing low-fat meat products.

Список літератури

- Varga-Visi É., Toxanbayeva B. Application of fat replacers and their effect on quality of comminuted meat products with low lipid content: A review. *Acta Alimentaria*. 2017. № 46(2). P. 181-186. doi:10.1556/066.2016.0008.
- Zeng L., Ruan M., Liu J., Wilde P., Naumova E. N., Mozaffarian D., Zhang F. F. Trends in Processed Meat, Unprocessed Red Meat, Poultry, and Fish Consumption in the United States. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*. 2019. № 119(7). P. 1085-1098 e12. doi:10.1016/j.jand.2019.04.004.
- Ceron-Guevara M. I., Rangel-Vargas E., Lorenzo J. M., Bermudez R., Pateiro M., Rodriguez J. A., Sanchez-Ortega I., Santos E. M. Reduction of Salt and Fat in Frankfurter Sausages by Addition of *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus* Flour. *Foods*. 2020. № 9(760). doi:10.3390/foods9060760.
- Wenhong Wang C. L., Guanhua Du., Xiuling Zhang, Hongjie Zhang. Characteristics and Rheological Properties of Polysaccharide Nanoparticles from Edible Mushrooms (*Flammulina velutipes*). *Journal of food science*. 2017. № 82(3). P. 687-693. doi:10.1111/1750-3841.13626.
- Zhao Y., Zhou G., Zhang W. Effects of regenerated cellulose fiber on the characteristics of myofibrillar protein gels. *Carbohydrate polymers*. 2019. № 209. P. 276-281. doi:10.1016/j.carbpol.2019.01.042.
- Shi H., Zhou T., Wang X., Zou Y., Wang D., Xu W. Effects of the structure and gel properties of myofibrillar protein on chicken breast quality treated with ultrasound-assisted potassium alginate. *Food chemistry*. 2021. № 358. P. 129873. doi:10.1016/j.foodchem.2021.129873.
- Choe J., Kim H. Y. Quality characteristics of reduced fat emulsion-type chicken sausages using chicken skin and wheat fiber mixture as fat replacer. *Poultry science*. 2019. № 98(6). P. 2662-2669. doi:10.3382/ps/pez016.
- Wang Z., Sun Y., Dang Y., Cao J., Pan D., Guo Y., He J. Water-insoluble dietary fibers from oats enhance gel properties of duck myofibrillar proteins. *Food chemistry*. 2021. № 344. P. 128690. doi:10.1016/j.foodchem.2020.128690.
- Zahari I., Ferawati F., Helstad A., Ahlstrom C., Ostbring K., Rayner M., Purhagen J. K. Development of High-Moisture Meat Analogues with Hemp and Soy Protein Using Extrusion Cooking. *Foods*. 2020. № 9(6). doi: 10.3390/foods9060772.
- Li K., Liu J. Y., Fu L., Zhao Y. Y., Zhu H., Zhang Y. Y., Zhang H., Bai Y. H. Effect of bamboo shoot dietary fiber on gel properties, microstructure and water distribution of pork meat batters. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2020. № 33(7). P. 1180-1190. doi: 10.5713/ajas.19.0215.
- Xu X., Chen H., Zhang Q., Lyu F., Ding Y., Zhou X. Effects of Oil Droplet Size and Interfacial Protein Film on the Properties of Fish Myofibrillar Protein-Oil Composite Gels. *Molecules*. 2020. № 25(2). P. 289. doi: 10.3390/molecules25020289.
- Wang L., Guo H., Liu X., Jiang G., Li C., Li X., Li Y. Roles of *Lentinula edodes* as the pork lean meat replacer in production of the sausage. *Meat science*. 2019. № 156. P. 44-51. doi: 10.1016/j.meatsci.2019.05.016.
- Nan H., Zhou H., Li B., Stepanova T., Kondratiuk N. Effects of *Agaricus bisporus* alone or in combination with soybean oil or water as fat substitutes on gel properties, rheology, water distribution, and microstructure of chicken batters. *Food Science and Technology*. 2022. № 42. e116121. doi: 10.1590/fst.116121.
- Nan H., Stepanova T., Li B., Kondratiuk N. Effect of *Agaricus bisporus* on gel properties and microstructure of chicken batters. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2021. № 36(3). P. 170-178.
- Sha L., Liu S., Liu D. Effects of soybean protein isolate on protein structure, batter rheology, and water migration in emulsified sausage. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. № 44(9). P. 1-10. doi: 10.1111/jfpp.14711.
- Zhou Y., Dai H., Ma L., Yu Y., Zhu H., Wang H., Zhang Y. Effect and mechanism of psyllium husk (*Plantago ovata*) on myofibrillar protein gelation. *Lwt*. 2021. №138. P. 110651. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110651.
- Zhuang X., Jiang X., Zhou H., Han M., Liu Y., Bai Y., Xu X., Zhou G. The effect of insoluble dietary fiber on myofibrillar protein emulsion gels: Oil particle size and protein network microstructure. *Lwt*. 2019. № 101. P. 534-542. doi: 10.1016/j.lwt.2018.11.065.
- Wang X., Li Y., Zhou Y., Ma F., Li P., Chen C. Effect of resistant corn starch on the thermal gelling

- properties of chicken breast myosin. *Food Hydrocolloids*. 2019. № 96. № 681-687. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.06.013.
19. Kim T. K., Lee M. H., Kim S. M., Kim M. J., Jung S., Yong H. I., Choi Y. S. Physicochemical properties of reduced-fat duck meat emulsion systems: effects of preemulsification with vegetable oils and duck skin. *Poultry science*. 2021. № 100(2). P. 1291-1298. doi:10.1016/j.psj.2020.10.044.
20. Zhuang X., Zhang W., Liu R., Liu Y., Xing L., Han M., Kang Z. L., Xu X. L., Zhou G. H. Improved gel functionality of myofibrillar proteins incorporation with sugarcane dietary fiber. *Food Res Int*. 2017. № 100(1). P. 586-594. doi: 10.1016/j.foodres.2017.07.063.
- References (transliterated)**
1. Varga-Visi É., Toxanbayeva B. Application of fat replacers and their effect on quality of comminuted meat products with low lipid content: A review. *Acta Alimentaria*, 2017, Vol. 46, no 2, pp. 181-186, doi: 10.1556/066.2016.0008.
2. Zeng L., Ruan M., Liu J., Wilde P., Naumova E. N., Mozaffarian D., Zhang F. F. Trends in Processed Meat, Unprocessed Red Meat, Poultry, and Fish Consumption in the United States. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 2019, Vol. 119, no 7, pp. 1085-1098 e12, doi: 10.1016/j.jand.2019.04.004.
3. Ceron-Guevara M. I., Rangel-Vargas E., Lorenzo J. M., Bermudez R., Pateiro M., Rodriguez J. A., Sanchez-Ortega I., Santos E. M. Reduction of Salt and Fat in Frankfurter Sausages by Addition of Agaricus bisporus and Pleurotus ostreatus Flour. *Foods*, 2020, Vol. 9, pp 760, doi:10.3390/foods9060760.
4. Wenhong Wang C. L., Guanhua Du., Xiuling Zhang, Hongjie Zhang. Characteristics and Rheological Properties of Polysaccharide Nanoparticles from Edible Mushrooms (*Flammulina velutipes*). *Journal of food science*, 2017, Vol. 82, no 3, pp. 687-693, doi:10.1111/1750-3841.13626.
5. Zhao Y., Zhou G., Zhang W. Effects of regenerated cellulose fiber on the characteristics of myofibrillar protein gels. *Carbohydrate polymers*, 2019, Vol. 209, pp. 276-281. doi:10.1016/j.carbpol.2019.01.042.
6. Shi H., Zhou T., Wang X., Zou Y., Wang D., Xu W. Effects of the structure and gel properties of myofibrillar protein on chicken breast quality treated with ultrasound-assisted potassium alginate. *Food chemistry*, 2021, Vol. 358, pp. 129873, doi:10.1016/j.foodchem.2021.129873.
7. Choe J., Kim H. Y. Quality characteristics of reduced fat emulsion-type chicken sausages using chicken skin and wheat fiber mixture as fat replacer. *Poultry science*, 2019, Vol. 98, no 6, pp. 2662-2669, doi:10.3382/ps/pez016.
8. Wang Z., Sun Y., Dang Y., Cao J., Pan D., Guo Y., He J. Water-insoluble dietary fibers from oats enhance gel properties of duck myofibrillar proteins. *Food chemistry*, 2021, Vol. 344, pp. 128690, doi:10.1016/j.foodchem.2020.128690.
9. Zahari I., Ferawati F., Helstad A., Ahlstrom C., Ostbring K., Rayner M., Purhagen J. K. Development of High-Moisture Meat Analogues with Hemp and Soy Protein Using Extrusion Cooking. *Foods*, 2020, Vol. 9, no 6, doi:10.3390/foods9060772.
10. Li K., Liu J. Y., Fu L., Zhao Y. Y., Zhu H., Zhang Y. Y., Zhang H., Bai Y. H. Effect of bamboo shoot dietary fiber on gel properties, microstructure and water distribution of pork meat batters, *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2020, Vol. 33, no 7, pp. 1180-1190, doi:10.5713/ajas.19.0215.
11. Xu X., Chen H., Zhang Q., Lyu F., Ding Y., Zhou X. Effects of Oil Droplet Size and Interfacial Protein Film on the Properties of Fish Myofibrillar Protein-Oil Composite Gels. *Molecules*, 2020, Vol. 25, no 2, pp. 289, doi:10.3390/molecules25020289.
12. Wang L., Guo H., Liu X., Jiang G., Li C., Li X., Li Y. Roles of Lentinula edodes as the pork lean meat replacer in production of the sausage. *Meat science*, 2019, Vol. 156, pp. 44-51, doi:10.1016/j.meatsci.2019.05.016.
13. Nan H., Zhou H., Li B., Stepanova T., Kondratiuk N. Effects of Agaricus bisporus alone or in combination with soybean oil or water as fat substitutes on gel properties, rheology, water distribution, and microstructure of chicken batters. *Food Science and Technology*, 2022, Vol. 42, e116121, doi:10.1590/fst.116121.
14. Nan H., Stepanova T., Li B., Kondratiuk N. Effect of Agaricus bisporus on gel properties and microstructure of chicken batters. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2021, Vol. 36, no 3, pp. 170-178.
15. Sha L., Liu S., Liu D. Effects of soybean protein isolate on protein structure, batter rheology, and water migration in emulsified sausage. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020, Vol. 44, no 9, pp. 1-10, doi:10.1111/jfpp.14711.
16. Zhou Y., Dai H., Ma L., Yu Y., Zhu H., Wang H., Zhang Y. Effect and mechanism of psyllium husk (*Plantago ovata*) on myofibrillar protein gelation. *Lwt*, 2021, Vol. 138, pp. 110651, doi:10.1016/j.lwt.2020.110651.
17. Zhuang X., Jiang X., Zhou H., Han M., Liu Y., Bai Y., Xu X., Zhou G. The effect of insoluble dietary fiber on myofibrillar protein emulsion gels: Oil particle size and protein network microstructure, *Lwt*, 2019, Vol. 101, pp. 534-542, doi:10.1016/j.lwt.2018.11.065.
18. Wang X., Li Y., Zhou Y., Ma F., Li P., Chen C. Effect of resistant corn starch on the thermal gelling properties of chicken breast myosin. *Food Hydrocolloids*, 2019, Vol. 96, pp. 681-687, doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.06.013.
19. Kim T. K., Lee M. H., Kim S. M., Kim M. J., Jung S., Yong H. I., Choi Y. S. Physicochemical properties of reduced-fat duck meat emulsion systems: effects of preemulsification with vegetable oils and duck skin. *Poultry science*, 2021, Vol. 100, no 2, pp. 1291-1298, doi:10.1016/j.psj.2020.10.044.
20. Zhuang X., Zhang W., Liu R., Liu Y., Xing L., Han M., Kang Z. L., Xu X. L., Zhou G. H. Improved gel functionality of myofibrillar proteins incorporation with sugarcane dietary fiber. *Food Res Int*, 2017, Vol. 100, no 1, pp. 586-594, doi: 10.1016/j.foodres.2017.07.063.

Відомості про авторів (About authors)

Fotina Tetiana – Doc. of Sc., Professor, Department of Veterinary Examination, Microbiology, Zoohygiene and Safety and Quality of Animal Products, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5079-2390; e-mail: tif_ua@meta.ua.

Фотіна Тетяна Іванівна – доктор ветеринарних наук, професор, Сумський національний аграрний університет, завідувач кафедри ветсанекспертизи, мікробіології, зоогігієни та безпеки і якості продуктів тваринництва; м. Суми, Україна; ORCID: 0000-0001-5079-2390; e-mail: tif_ua@meta.ua.

Xiong Anqi – student of School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, China; e-mail: 409627205@qq.com.

Сйонг Анчі – студент коледжу харчової науки, Хенанський інститут науки і технології, Сінсянь, Китай; e-mail: 409627205@qq.com.

Koshel Olena – PhD, Associate Professor, Technology of Nutrition Department, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2184-2106; e-mail: koshelolena85@ukr.net.

Кошель Олена Юрївна – доктор філософії, доцент, Сумський національний аграрний університет, доцент кафедри технології харчування; м. Суми, Україна; ORCID: 0000-0002-2184-2106; e-mail: koshelolena85@ukr.net.

Sabadash Sergiy – PhD, Associate Professor, Department of Technology and Food Safety, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0371-8208; e-mail: s.v.sabadash@ukr.net.

Сабадаш Сергій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, доцент кафедри технологій та безпечності харчових продуктів; м. Суми, Україна; ORCID: 0000-0002-0371-8208; e-mail: s.v.sabadash@ukr.net.

Yankovskiy Roman – Technology of Nutrition Department, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine; e-mail: romka88099@gmail.com.

Янковський Роман Володимирович – Сумський національний аграрний університет, аспірант кафедри технології харчування; м. Суми, Україна; e-mail: romka88099@gmail.com.

Please cite this article as:

Fotina T., Xiong A., Koshel O., Sabadash S., Yankovskiy R. Effects of *Agaricus bisporus* and *Flammulina velutipes* mushrooms on quality of chicken batters. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 56–62, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.08.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Фотіна Т. І., Сйонг А., Кошель О. Ю., Сабадаш С. М., Янковський Р. В. Вплив грибів *Agaricus bisporus* і *Flammulina velutipes* на якість курячого фаршу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 56–62. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.08.

Надійшла (received) 18.08.2023
Прийнята (accepted) 13.09.2023

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

- Батигін Ю. В., Гаврилова Т. В., Шиндерук С. О., Чаплигін Є. О.** Резонансний підсилювач активної електричної потужності з додатковим джерелом напруги. Пропозиції, аналіз, числові оцінки 3
- Еттає Е. В., Ішай М. Е., Мінакова К. О., Асукуо Є. О., Одеї С. У.** оцінка енергетичної зонної структури напівгерселероного сплаву LiZnX ($X = \text{As}, \text{P}$ та Sb) за допомогою першого принципного розрахунку 11
- Єфіменко В. В., Олександренко В. П., Калмикова Н. Г., Руденко В. М. Єфіменко О. В.** Перспективи застосування фулеренових присадок у сучасних авіаційних оливах 17
- Сліпчук А. М.** Моделювання недеформованої стружки утвореної під час нарізання внутрішнього зубчастого вінця методом "POWER SKIVING" 26

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

- Воробійов Б. В., Сенченко С. О., Кириленко Я. О., Ліхно Я. В., Хань Л., Кутувий Ю. М.** Вимірювання лінійної швидкості з використанням мобільної роботизованої платформи з комп'ютерним зором 34
- Крикун В. Р., Хомяк Ю. В., Познякова М. Є.** Рекомендована технологія проведення томографічного контролю в лабораторних умовах 43
- Поліванов О. Г.** Дослідження часу локалізації пожеж у багатоповерхових будівлях у містах України 49

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Фотіна Т. І., Сйонг А., Кошель О. Ю., Сабадаш С. М., Янковський Р. В.** Вплив грибів *Agaricus bisporus* і *Flammulina velutipes* на якість курячого фаршу 56

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

- Batygin Yu., Gavrilova T., Shinderuk S., Chaplygin E.** The resonant amplifier of the active electrical power with additional voltage source. Suggestions, analysis, numerical estimates 3
- Ettah E. B., Ishaje M. E., Minakova K. A., Asuquo E. O., Odey S. U.** Evaluation of energy band structure of half-Heusler alloy LiZnX ($X = \text{As}, \text{P},$ and Sb) using first principle calculation 11
- Yefymenko V., Oleksandrenko V., Kalmykova N., Rudenko V., Yefimenko O.** Prospects for the use of fullerene additives in modern aviation oils 17
- Slipchuk A.** Simulation of undeformed chip formed during cutting for internal crown tooth by the "POWER SKIVING" method 26

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

- Vorobiov B., Senchenko S., Kyrylenko Y., Likhno Y., Khan L., Kutovyi Yu.** Measurement of linear velocity using a mobile robotic platform with computer vision 34
- Krykun V., Khomyak Yu., Pozniakova M.** Recommended technology for tomographic inspection in the laboratory 43
- Polivanov O.** Study of fire location time in high-story buildings in cities of Ukraine 49

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

- Fotina T., Xiong A., Koshel O., Sabadash S., Yankovskiy R.** Effects of *Agaricus bisporus* and *Flammulina velutipes* mushrooms on quality of chicken batters 56

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ".
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

№ 3(17)' 2023

Відповідальний редактор: Є. І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар: Р. С. Томашевський, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск: д-р техн. наук, проф. Р. С. Томашевський

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: vestnik.nsmi@khi.edu.ua

Підп. до друку «25» вересня 2023 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 7,0. Облік.вид.арк. 3,5.
Тираж 50 прим. Зам. № 382. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК №5478 від 21.08.2017
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
