МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



***Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку***

**ISSN 2412 – 5288 (Print)**
**ISSN 2414 – 9780 (Online)**
**DOI 10.32684/2412-5288-2022-2-21**

# ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ

2(21) 2022

**ОДЕСА**

**ISSN 2412 – 5288 (Print)**
**ISSN 2414 – 9780 (Online)**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

# ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ

Випуск 2(21) 2022

Заснований у 2012 році

Засновник: Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
65029, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1
Телефон: (048) 705-03-33, факс: (048) 705-04-31
E-mail: suitt@suitt.edu.ua Сайт: https://www.suitt.edu.ua.

Редакційна колегія

Голова редакційної колегії
Коломієць Леонід Володимирович (д.т.н., професор)
Заступник голови редакційної колегії
Братченко Геннадій Дмитрович (д.т.н., професор)

Аніскін Олексій (к.т.н., доцент, Республіка Хорватія)
Банзак Оксана Вікторівна (д.т.н., професор)
Боряк Костянтин Федорович (д.т.н., професор)
Ваганов Олександр Іванович (д.т.н., професор)
Величко Олег Миколайович (д.т.н., професор)
Габер Антоніна Анатоліївна (к.т.н., доцент)
Гасанов Юсиф Надир огли (д.т.н., професор, Азербайджанська Республіка)
Гордієнко Тетяна Богданівна (д.т.н., професор)
Горін Вадим Вікторович (д.т.н., с.н.с.)
Грабовський Олег Вікторович (к.т.н., доцент)
Діденко Віктор Дмитрович (д.ф.-м.н., професор)
Квасніков Володимир Павлович (д.т.н., професор)
Корсун Валерій Іванович (д.т.н., професор)
Кучерук Володимир Юрійович (д.т.н., професор)
Лещенко Олег Іванович (к.т.н., доцент)
Мілковіч Марін (к.т.н., професор, Республіка Хорватія)
Мілованов Валерій Іванович (д.т.н., професор)
Меленчук Тетяна Михайлівна (д.т.н., професор)
Передерко Анатолій Леонтійович (д.т.н.)
Салсеану Александру (д.т.н., професор, Румунія)
Семенова Алла Василівна (д.пед.н., професор)
Скачков Валерій Вікторович (д.т.н., професор)
Солдо Божо (д.т.н., професор, Республіка Хорватія)
Чундева-Блаєр Марія (д.т.н., професор, Республіка Північна Македонія)

Відповідальний секретар Братченко Геннадій Дмитрович

Внесений наказами МОН України від 02.07.2020 № 886 та від 24.09.2020 № 1188 до Переліку наукових фахових видань України (Кат. «Б»), галузь – технічні науки, спеціальності: 275, 151, 152.

Усі права застережено. Передруки дозволяються лише за згодою редакції. При цитуванні посилання обов'язкове.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 25210-15150ПР від 01.08.2022 р.

© Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

**ISSN 2412 – 5288 (Print)**
**ISSN 2414 – 9780 (Online)**

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ZBÌRNIK NAUKOVIH PRAC′ ODES′KOÏ DERŽAVNOÏ AKADEMÌÏ TEHNÌČNOGO REGULÛVANNÂ TA ÂKOSTÌ (COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE ODESA STATE ACADEMY OF TECHNICAL REGULATION AND QUALITY)
Issue 2(21) 2022

Founded in 2012

Founder: State University of Intelligent Technologies and Telecommunications
1 Kuznechna street, Odesa, 65029, Ukraine
Phone: (048) 705-03-33, fax: (048) 705-04-31
E-mail: suitt@suitt.edu.ua Websites: https://www.suitt.edu.ua.

Editorial board

Editor-in-Chief
Kolomiets Leonid (DSc, Professor, Ukraine)
Deputy Editor
Bratchenko Hennadii (DSc, Professor, Ukraine)

Aniskin Aleksej (PhD, Associate Professor, Republic of Croatia)
Banzak Oksana (DSc, Professor, Ukraine)
Boriak Kostiantyn (DSc, Professor, Ukraine)
Vahanov Oleksandr (DSc, Professor, Ukraine)
Velychko Oleh (DSc, Professor, Ukraine)
Gaber Antonina (PhD, Associate Professor, Ukraine)
Gordiyenko Tetyana (DSc, Professor, Ukraine)
Gorin Vadum (DSc, Associate Professor, Ukraine)
Hasanov Yusif Nadir Ogly (DSc, Professor, Azerbaijan Republic)
Hrabovskyi Oleh (PhD, Associate Professor, Ukraine)
Didenko Viktor (DSc, Professor, Ukraine)
Kvasnikov Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)
Korsun Valerii (DSc, Professor, Ukraine)
Kucheruk Volodymyr (DSc, Professor, Ukraine)
Leshchenko Oleh (PhD, Associate Professor, Ukraine)
Milković Marin (PhD, Professor, Republic of Croatia)
Milovanov Valerii (DSc, Professor, Ukraine)
Melenchuk Tetiana (DSc, Professor, Ukraine)
Perederko Anatoliy (DSc, Ukraine)
Salceanu Alexandru (DSc, Professor, Romania)
Semenova Alla (DSc, Professor, Ukraine)
Skachkov Valerii (DSc, Professor, Ukraine)
Soldo Božo (DSc, Professor, Republic of Croatia)
Cundeva-Blajer Marija (DSc, Professor, Republic of North Macedonia)

Secretary Bratchenko Hennadii

Introduced by orders of the MoES of Ukraine No. 886 dated 02.07.2020 and No. 1188 dated 24.09.2020 to the List of Scientific and Professional Publications of Ukraine (Cat. "B"), branch – technical sciences, specialties: 275, 151, 152.

All rights reserved. Reprints are permitted only with the permission of the editors. When citing, the link is mandatory.

Certificate of state registration KV No. 25210-15150PR dated August 1, 2022.

© State University of Intelligent Technologies and Telecommunications

## ЗМІСТ

**Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості** 5

О. І. Кисельова, к.пед.н., Л. В. Коломієць, д.т.н., А. Л. Передерко, д.т.н., О. В. Грабовський, к.т.н.
ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЕКСПЕРТИЗИ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ ..... 6

**Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення** 13

М. О. Катаєва, к.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н.
МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ СКАНУЮЧИМ ЗОНДОВИМ МІКРОСКОПОМ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ГЕОМЕТРІЇ ЗОНДУ …… 14

С. В. Кіфорук
ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА МЕХАНІЧНУ НАПРУГУ ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ ……..……..……..……..... 19

**Інформаційно-вимірювальна техніка, інформаційно-вимірювальні та транспортні технології** 27

В. П. Квасніков, д.т.н., А. П. Стахова, к.т.н.
СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИГНАЛУ ВІБРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ……..…… 28

С. С. Гутиря, д.т.н., В. П. Яглінський, д.т.н., В. В. Вовк
ПАРАМЕТРИЧНІ ВІДМОВИ І РАЦІОНАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ НАДІЙНОСТІ ПІДСИСТЕМ ВЕРСТАТА–РОБОТА …..……..……..……..…….. 34

Т. М. Меленчук, д.т.н., Н. М. Арцибашева, к.т.н., Д. О. Пуріч, к.т.н., О. В. Ковра, В. М. Меленчук, к.т.н.
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В ОДЕСЬКОМУ РЕГІОНІ …….. 42

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК …….. 50

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ ……... 51

# РОЗДІЛ 1

# Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості

УДК 37.013.3

**О. І. Кисельова,** к.пед.н., **Л. В. Коломієць,** д.т.н., **А. Л. Передерко,** д.т.н., **О. В. Грабовський,** к.т.н.

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса*

## ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЕКСПЕРТИЗИ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*У статті визначено основні теоретико-методологічні засади експертизи освітнього процесу закладу вищої освіти, узагальнено характеристики експертизи, класифіковано об'єкти і процеси приналежні освітньому процесу ЗВО, що підлягають експертному вивченню. Досліджено ряд загальнонаукових методологічних підходів, функцій та методів експертизи освітнього процесу, проаналізовано їхню ефективність та доцільність застосування в умовах освітнього процесу ЗВО. Доведено що, науково-методологічне обґрунтування впровадження технологій педагогічної експертизи засновано на зведені в єдину матрицю різних показників змісту освітньої діяльності ЗВО: змісту освіти, освітніх, розвиваючих і виховних цілей; аналізу освітніх ситуацій, методів, засобів, форм навчання і контролю; врахування зворотного і міждисциплінарних зв'язків; інтелектуального розвитку студентів; компетентності викладачів; інноваційності, полікомпонентності та професійної спрямованості навчання в ЗВО.*

***Ключові слова:*** *педагогічна експертиза, об'єкт, характеристика, функція, метод експертизи, загальнометодологічний підхід, освітній процес.*

**O. I. Kyselova,** PhD, **L. V. Kolomiets,** DSc, **A. L. Perederko,** DSc, **O. V. Hrabovskyi,** PhD

## THEORETICAL AND METHODOLOGICAL BASES OF EXPERTISE OF THE EDUCATIONAL PROCESS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

*The article defines the main theoretical and methodological foundations of the examination of the educational process of the university, it belongs to the cluster of humanitarian examinations - this is a kind of pedagogical examination, which consists of a number of procedures necessary for the creation and subsequent implementation of the results covered in the collective conclusion, expert assessment (or judgment) about the object under study (pedagogical object, phenomenon or process). The characteristics of pedagogical expertise, which are inherent not only to it, but also to other scientific methods of research, for example, objectivity, criticality, compliance of the assessed object with legislative norms, that is, they do not determine the essence of the method of pedagogical expertise, in contrast to such as: requirements, collectivity, predictability to experts. These are properties, the totality of which describes the essence of expertise as a scientific method. The objects of pedagogical expertise are conditionally divided into two categories: objects of the first order: the activities of the university, didactic research, the quality of education - these are generalized categories that combine objects of the second order (for example, the quality of education is determined by assessing students' knowledge, building their professiograms, using pedagogical technologies and methods etc., examinations of objects of the second order can be carried out at the same time. The functions of the examination of the educational process characterize it as an examination of the humanitarian direction and at the same time combine it with other methods of socially oriented and person-centered research. is based on various indicators of the content of the educational activities of the university, summarized in a single matrix: the content of education, educational, developmental and educational goals; analysis of educational situations, methods, means, forms of education and control; accounting for feedback and interdisciplinary links; intellectual development of students; competence of teachers; innovativeness, multicomponent and professional orientation of education at the university.*

***Keywords:*** *pedagogical expertise, object, characteristic, function, expertise method, general methodological approach, educational process.*

DOI 10.32684/2412-5288-2022-2-21-6-12

**Вступ.** В умовах економічних перетворень, євроінтеграційних процесів та військового стану система вищої освіти в Україні переживає складні часи реформування, яке має на меті збереження наукового та освітнього потенціалу українських ЗВО та оновлення форм, змісту, засобів та методів освітньої діяльності, відповідно до вимог сучасного суспільства, економічних та соціальних запитів. В цих умовах дотримання та підвищення якості освітньої діяльності виступає на перше місце серед завдань, які стоять перед українськими ЗВО. Якість освітньої діяльності забезпечується створенням системи внутрішнього забезпечення якості вищої освіти, що прописано в Законі України «Про вищу освіту» (ст.16), де визначено, що: «Система забезпечення закладами вищої освіти якості освітньої діяльності та якості вищої освіти (система внутрішнього забезпечення якості) передбачає щорічне оцінювання здобувачів вищої освіти, науково-педагогічних і педагогічних працівників ЗВО…» [1].

У вітчизняній науковій традиції існують ґрунтовні, перевірені часом методи, форми та засоби оцінювання якості освітньої діяльності, проте в нових умовах навчання та з урахуванням сучасних вимог до якості підготовки майбутніх фахівців у ЗВО необхідно впроваджувати принципово нові підходи. Цю проблему може вирішити впровадження експертних методів оцінки якості, оскільки вони враховують умови, форми і перебіг освітнього процесу, тобто надання релевантної, повної та об'єктивної інформації щодо складових освітнього процесу (викладання та учіння), компетентності науково-педагогічних працівників ЗВО, визначення рівня навчальних досягнень здобувачів вищої освіти, що дозволяє приймати та впроваджувати у практичну діяльність ефективні управлінські рішення, а також розробляти методики та концепції розв'язання освітніх проблем, зважаючи на необхідність інноваційних змін в освітній діяльності.

Саме тому особливого значення набуває експертиза освітнього процесу, адже заходи, передбачувані нею здатні визначити якість освітніх послуг та їх відповідність запитам суспільства. Вищій освіті України необхідні фахівці, спроможні об'єктивно, всебічно та конструктивно оцінювати зміст та якість освітніх послуг, проводити експертні та консультативні заходи щодо освітнього середовища для науково-педагогічних працівників вишів. Наразі проблема виявляється не тільки в нестачі експертів в галузі освіти, а й в недостатньому методологічному й методичному забезпеченні експертної оцінки. Як правило, в сучасних ЗВО експертна оцінка проводиться безсистемно, має фрагментарний, непрозорий характер, вона констатує факти, але не надає прогностичної інформації і, як наслідок, не забезпечує повною мірою контроль якості освітньої діяльності та розвиток вищої освіти.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Проблема експертизи в вищій освіті розкривається у працях М. Архангельського, О. Боднар, О. Величко, Г. Воробйова, С. Братченко, А. Габер, Т. Гордієнко, Л. Даниленко, В. Євланова, А. Єрмоли, В. Звєрєвої, Р. Ільясова, Г. Іванченко, Д. Леонтьєва, О. Касьянової, О. Кисельової, Г. Мкртичян, Л. Петренко, Г. Прозументова, Є. Стачєва, С. Тарасова та ін. Означені науковці в своїх працях визначають понятійний апарат дослідження, теоретичні та методичні засади педагогічної експертизи, системи та види експертиз, вимоги, що висуваються до компетентності експертів, технології, методи та засоби проведення експертизи, алгоритм та інструментарій експертних процедур [2-6].

Окрім того, в працях В. Андрущенко, В. Кременя, В. Лугового, В. Огнев'юка, М. Степко розкриваються питання розвитку і функціонування систем освіти в умовах глобалізації; в наукових доробках С. Гончаренко, Т. Десятова, І. Драннікова, О. Касьянової, Д. Леонтьєва, С. Сисоєвої досліджуються теоретичні, методологічні і методичні засади наступності в системі неперервної професійної освіти; праці Я. Болюбаш, В. Огнев'юк, Г. Мкртичян, Ж. Таланової, Г. Терещук, І. Тригуб, Є. Усової, Н. Федорової присвячені створенню якісного забезпечення загального європейського простору науки, освіти і культури; М. Богуславський, С. Бешелєв, М. Браун, В. Бухвалова, Ф. Гуревич, Л. Кронбах, Я. Плинер, К. Міскел, І. Тригуб, В. Черепанов досліджують структуру експертизи в освіті та експертизу педагогічних об'єктів [7-10].

Проте, теоретико-методологічні засади експертизи освітнього процесу, як педагогічної дефініції потребують подальшої розробки.

**Формулювання цілей статті:** визначити теоретико-методологічні засади експертизи освітнього процесу закладу вищої освіти, розкрити характеристики, об'єкти, загальнометодологічні підходи, функції та методи педагогічної експертизи.

**Виклад основного матеріалу з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Експертиза освітнього процесу, належить до кластеру гуманітарних експертиз, за визначенням М. Богуславського, – це різновид педагогічної експертизи, яка складається з ряду процедур,

необхідних для створення і подальшої реалізації результатів висвітлених в колективному висновку, експертної оцінки (або судження) про досліджуваний об'єкт (педагогічний об'єкт, явище або процес) [4]. Це особливий тип дослідження, де об'єктом вивчення є педагогічна практика у процесі розвитку. Існує багато поглядів та науково-обґрунтованих класифікацій теоретичних засад педагогічної експертизи, в даній публікації ми проаналізували найбільш інформативні і актуальні, які об'єднали і схематично представили, відповідно до їхньої функціональної приналежності, тобто проведення експертизи освітнього процесу ЗВО.

С. Братченко запропонував більш широке, загальнонаукове визначення, за яким експертиза – це особливий спосіб вивчення дійсності. Завдяки їй можна побачити, виміряти, зрозуміти і узагальнити те, що не піддається іншим методам вимірювання чи обчислення, експертиза здійснюється експертами, які мають відповідати певним умовам: незалежність, компетентність, об'єктивність тощо, адже саме їхня суб'єктивна оцінка, підкріплена об'єктивними результатами, та відповідальне рішення мають вирішальне значення [3]. Тому необхідно було з'ясувати основні характеристики експертизи, які відрізняють її від інших методів вимірювання застосованих в освіті (див. рис. 1).

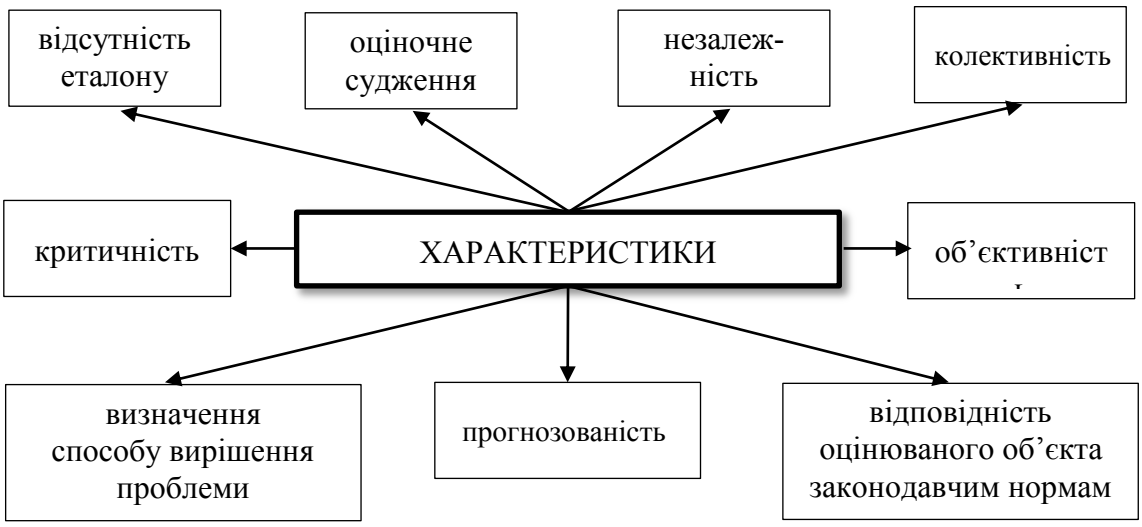



Рисунок 1 – Характеристики педагогічної експертизи

Серед означених характеристик є ті, які притаманні не тільки експертизі, але й іншим науковим методам дослідження, наприклад, об'єктивність, критичність, відповідність оцінюваного об'єкта законодавчим нормам, тобто вони не визначають сутність метода педагогічної експертизи, на відміну від таких, як: відсутність еталону, вимог що висуваються до експертів, колективності, прогнозованості. Це характеристики, сукупність яких визначає сутність експертизи як наукового методу.

Як зазначалося раніше, педагогічна експертиза може застосовуватись до різних об'єктів і процесів освітньої діяльності. Ми визначили і класифікували об'єкти приналежні освітньому процесу ЗВО. Основні з них представлені на рис. 2.

Умовно об'єкти педагогічної експертизи можна поділити на дві категорії: об'єкти першого порядку: діяльність ЗВО, дидактичні дослідження, якість навчання – це узагальнені категорії, які об'єднують об'єкти другого порядку (наприклад, якість навчання визначається шляхом оцінювання знань студентів, побудови їхніх професіограм, застосуванням педагогічних технологій і методик тощо), водночас окремо можуть проводитись експертизи об'єктів другого порядку.

Відповідно до об'єктів педагогічної експертизи, можна стверджувати, що вона носить творчий характер та множинний сценарій конструювання детермінованих процесів. Це діяльність яка включає не тільки точну оцінку впливу певних факторів та їхньої взаємодії, а й прогностичний компонент. Її особливостями виступають використання гуманітарної методології пізнання, гнучкість методів та засобів вивчення, практична орієнтованість, підтримуюча спрямованість.

Вона застосовується до відкритої, нестійкої системи (освіта, освітній процес, його складові), в умовах, коли: 1) спираючись на відомі закони розвитку неможливо передбачити поведінку системи в майбутньому; 2) неможливо експериментально

перевірити процес; 3) наявні неконтрольовані фактори впливу на систему і її розвиток; 4) наявність багатоваріантного сценарію вирішення проблеми; не має повної інформації, достатньої для прийняття рішення [7, 9].




Рисунок 2 – Об'єкти педагогічної експертизи

Методологічною основою експертизи в сфері освіти учені М. Богуславський, Д. Леонтьєв, І. Тригуб, Н. Федорова та ін. [4, 7, 9, 10] визначають ряд загальнонаукових методологічних підходів, функцій та методів експертизи освітнього процесу, основні з яких представлені на рисунках 3, 4 і 5.

Відповідно до пропонованих загальнометодологічних підходів, експертиза освітнього процесу поєднує, як загальнонаукові методологічні підходи, притаманні всім видам наукового дослідження (діяльнісний, аксіологічний), так і особистісно-орієнтовні складові, представлені герменевтичним та культурологічним підходами. Саме ця єдність відображає унікальність педагогічної експертизи, як методу наукового дослідження.

Функції експертизи освітнього процесу (рис. 4) характеризують її, як експертизу гуманітарного напряму і, водночас, поєднують з іншими методами соціально-спрямованих і людиноцентрованих досліджень.

Визначаючи методи експертної оцінки освітнього процесу ЗВО (рис. 5) ми проаналізували і узагальнили найбільш поширені, інформативні і економічно обґрунтовані. В останні роки набули особливої популярності групові експертні оцінки (ГЕО) представлені різними методами та їх поєднанням (мозковий штурм, оцінювання, комісії та ін.), ці методи обґрунтовано вважаються найбільш об'єктивними, оскільки групова робота суттєво знижує рівень суб'єктивних суджень, вони економічно вигідні і заощаджують час. Проте, вони не дозволяють повною мірою об'єктивно і ґрунтовно оцінити уміння і навички студентів, оскільки більшість з них спрямована на констатацію знань та узагальнення даних. Тому, з метою забезпечення компетентнісного підходу у процесі оцінки освітнього процесу, доцільно використовувати весь представлений комплекс методів, особливу увагу приділивши

технології по елементного аналізу. Її застосування дозволяє оцінити набуті студентом компетентності, рівень аналітичних і творчих здібностей через аналіз контрольних робіт побудованих за певним алгоритмом. Цей метод доволі трудомісткий і вимагає часових витрат, але дає змогу отримати найбільш повне уявлення про засвоєння необхідних компетентностей студентами ЗВО.




Рисунок 3 – Загальнонаукові методологічні підходи до проведення експертизи освітнього процесу ЗВО

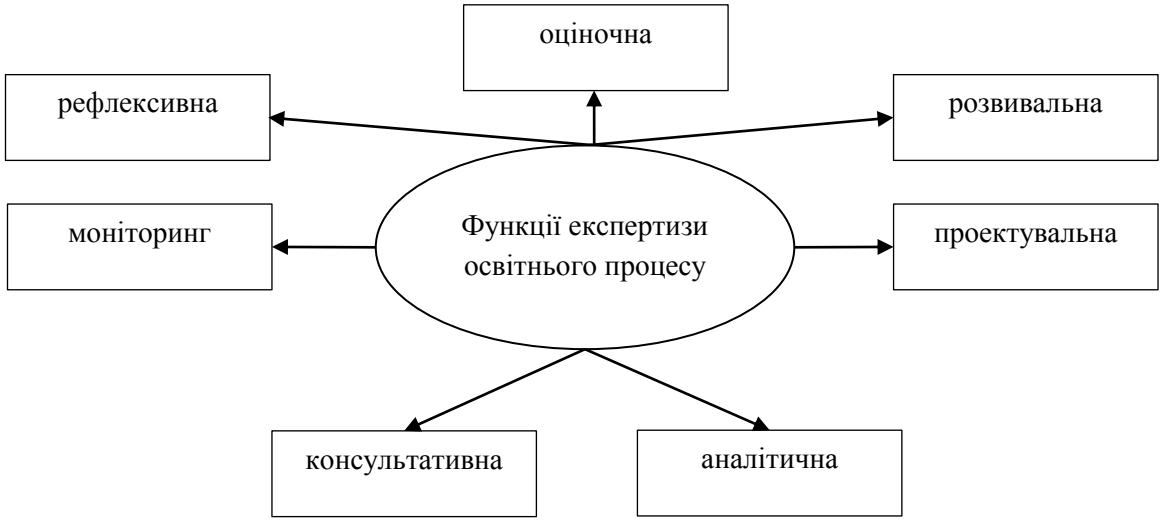



Рисунок 4 – Функції експертизи освітнього процесу ЗВО

**Висновки.** Аналіз наукової літератури та опрацьованих статистичних даних дозволив розкрити основні характеристики експертизи, класифікувати об'єкти і процеси приналежні освітньому процесу ЗВО. В ході дослідження було визначено ряд загальнонаукових методологічних підходів, функцій та методів експертизи освітнього процесу, проаналізовано їхню ефективність та доцільність застосування в умовах освітнього процесу ЗВО. Отже, впровадження технологій педагогічної експертизи ґрунтується на зведені в єдину матрицю різних показників освітньої діяльності ЗВО: змісту

освіти, освітніх, розвиваючих і виховних цілей; аналізу освітніх ситуацій, методів, засобів та форм навчання і контролю; врахування зворотного і міждисциплінарних зв'язків; інтелектуального розвитку студентів; компетентності викладачів та професійної спрямованості навчання в ЗВО.




Рисунок 5 – Методи експертної оцінки освітнього процесу ЗВО

**Список використаних джерел**

1. Про вищу освіту : Закон України від 01.07.2014 р. № 1556–VII. Дата оновлення: 01.01.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18. (дата звернення: 10.01.2023).

2. Величко О. М., Коломієць Л. В., Гордієнко Т. Б., Шевцов А. Г., Карпенко С. Р., Габер А. А. Групове експертне оцінювання та компетентність експертів / за загал. ред. д. т. н. О. М. Величка. Одеса : ВМВ, 2015. 230 с.

3. Братченко С. Л. Гуманитарная экспертиза образования: проведение и результат. *Професійна освіта.* Київ, 2014. № 2. С. 105-120.

4. Богуславский М. В. Научные основы историко-педагогической экспертизы инноваций в образовании. *Історико-педагогічний альманах*. Умань, 2015. № 1. С. 9-17.

5. Касьянова О. М. Технологія здійснення педагогічної експертизи загальної середньої освіти регіону у системі його соціально-економічного і культурно-духовного розвитку. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія «Педагогіка, соціальна робота»*. Ужгород, 2021. Вип. 22. С. 66-68.

6. Касьянова О. Педагогічна експертиза успішності студентів як передумова створення системи внутрішнього забезпечення якості вищої освіти. *Витоки педагогічної майстерності*. Полтава, 2016. Вип. 18. С. 146-153.

7. Леонтьев Д. А., Иванченко Г. В. Комплексная гуманитарная экспертиза: методология и смысл. Киев : Слово, 2018. 135 с.

8. Мкртычян Г. А. Психологическая экспертиза в инновационном образовании. Теория и практика. Харьков: Основа, 2016. 147 с.

9. Федорова Н. Ф. Про педагогічну експертизу. *Освіта та розвиток обдарованої особистості*. Київ, 2017. № 4 (59). С. 14-22.

10. Тригуб І. І. Експертиза як складова професійної діяльності в галузі освіти: теоретичний аспект. *Освітологічний дискурс*. Київ, 2014. №1 (5). С. 218-226.

**References**

1. Pro vyshchu osvitu : Zakon Ukrainy vid 01.07.2014 r. # 1556–VII. Data onovlennia: 01.01.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18. (data zvernennia: 10.01.2023).

2. Velychko O. M., Kolomiets L. V., Gordienko T. B., Shevtsov A. H., Karpenko S. R., Haber A. A. Hrupove ekspertne otsiniuvannia ta kompetentnist ekspertiv / za zahal. red. d.t.n. O. M. Velychka. Odesa : VMV, 2015. 230 s.

3. Bratchenko S. L. Gumanitarnaya e'kspertiza obrazovaniya: provedenie i rezul'tat. *Profesiina osvita*. Kyiv, 2014. # 2. S. 105-120.

4. Boguslavskij M. V. Nauchnye osnovy istoriko-pedagogicheskoj e'kspertizy innovacij v obrazovanii. *Istoryko-pedahohichnyi almanakh.* Uman, 2015. # 1. S. 9-17.

5. Kasianova O. M. Tekhnolohiia zdiisnennia pedahohichnoi ekspertyzy zahalnoi serednoi osvity rehionu u systemi yoho sotsialno-ekonomichnoho i kulturno-dukhovnoho rozvytku. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Seriia «Pedahohika, sotsialna robota»*. Uzhhorod, 2021. Vyp. 22. S. 66-68.

6. Kasianova O. Pedahohichna ekspertyza uspishnosti studentiv yak peredumova stvorennia systemy vnutrishnoho zabezpechennia yakosti vyshchoi osvity. *Vytoky pedahohichnoi maisternosti*. Poltava, 2016. Vyp. 18. S. 146-153.

7. Leont'ev D. A., Ivanchenko G. V. Kompleksnaya gumanitarnaya e'kspertiza: metodologiya i smysl. Kiev : Slovo, 2018. 135 s.

8. Mkrtychyan G. A. Psixologicheskaya e'kspertiza v innovacionnom obrazovanii. Teoriya i praktika. Xar'kov: Osnova, 2016. 147 s.

9. Fedorova N. F. Pro pedahohichnu ekspertyzu. *Osvita ta rozvytok obdarovanoi osobystosti*. Kyiv, 2017. # 4 (59). S. 14-22.

10. Tryhub I. I. Ekspertyza yak skladova profesiinoi diialnosti v haluzi osvity: teoretychnyi aspekt. *Osvitolohichnyi dyskurs*. Kyiv, 2014. # 1 (5). S. 218–226.

*Надійшла до редакції 17.11.2022*

# РОЗДІЛ 2

# Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення

УДК 621.317

**М. О. Катаєва,** к.т.н., **Д. М. Квашук,** к.е.н.

*Національний авіаційний університет, м. Київ*

## МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ СКАНУЮЧИМ ЗОНДОВИМ МІКРОСКОПОМ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ГЕОМЕТРІЇ ЗОНДУ

*У статті аналіз впливу різних типів геометрії зонду скануючого зондового мікроскопу на особливості вимірювання топографії поверхні нанооб'єкта. На основі проведених досліджень запропоновано методи відновлення зображень СЗМ, які побудовані на математичній та комп'ютерній обробці даних СЗМ, що враховує конкретну форму наконечника зонду та дозволяє покращити метрологічні характеристики вимірювальної інформації.*

*Доведено, що найефективнішим способом цифрової корекції відображення топографії поверхні є чисельна деконволюція з використанням зображення наконечника, отриманого експериментально шляхом сканування тестових структур з добре відомою топографією та подальшою комп'ютерною обробкою даних. Запропоновано метод часткового відновлення топографії, який характеризується гнучкість до поставлених метрологічних задач і спрямований на підвищення швидкодії обчислювальних операцій із забезпеченням необхідної точності вимірювальної інформації.*

***Ключові слова:*** *нановимірювання, скануючий зондовий мікроскоп, топографія поверхні, метод вимірювання, форма зонду, режим сканування, деконволюція.*

**M. O. Kataieva**, PhD**, D. M. Kvashuk,** PhD

## METHODS OF INCREASING THE ACCURACY OF MEASUREMENT WITH A SCANNING PROBE MICROSCOPE DEPENDING ON THE GEOMETRY OF THE PROBE

*The article analyzes the influence of different types of probe geometry of a scanning probe microscope (SPM) on the features of measuring the surface topography of a nano-object. Based on the analysis, it was determined that the main drawback inherent in all modes of scanning probe microscopy is the finite size of the measuring probe tip, which cannot reach certain areas of the measuring surface during scanning, which is caused by the geometric characteristics of the probe shape. This leads to a significant deterioration of the spatial resolution and significant distortions in the SPM images when scanning surfaces with large unevenness of the ratio between the typical vertical and horizontal dimensions.*

*Based on the conducted research, the methods of restoration of SPM images are proposed, which are built on mathematical and computer processing of SPM data, which takes into account the specific shape of the probe tip and allows improving the metrological characteristics of the measurement information. It is proved that the SPM image and the experimentally obtained shape of the tip are two-dimensional arrays of discrete values, for which the derivative is an incorrectly determined value.*

*It is recommended that instead of deriving discrete functions during the numerical deconvolution of SPM images, during scanning with a constant average height, use the requirement for the minimum distance of the tip to the surface. It has been proven that the most effective way of digital correction of the surface topography is numerical deconvolution using the tip image obtained experimentally by scanning test structures with a well-known topography and subsequent computer processing of the data. A method of partial restoration of the topography is proposed, which is characterized by flexibility to the set metrological tasks and is aimed at increasing the speed of computing operations while ensuring the necessary accuracy of measurement information.*

***Keywords****: nanomeasurement, scanning probe microscope, surface topography, measurement method, probe shape, scanning mode, deconvolution.*

DOI 10.32684/2412-5288-2022-2-21-14-19

**Вступ**

Скануючий зондовий мікроскоп (СЗМ) є одним з основних інструментів у дослідженні та маніпуляціях з речовиною в атомному масштабі. Він може профілювати зразки в реальному три вимірному просторі з вертикальною роздільною

здатністю до 0,1 нм. В основі роботи СЗМ лежить силова взаємодія між зондом і поверхнею, для реєстрації якої використовуються спеціальні зондові датчики, що представляють собою пружну консоль (кантилевер) з вістрям зонда на кінці. Для дослідження можна використовувати широкий спектр матеріалів, включаючи напівпровідники, непровідні поверхні, ізолятори та біологічні зразки.

Для проведення метрологічних досліджень за допомогою СЗМ розроблено цілий ряд методів вимірювання та калібрувальних стандартів мікроскопа [1-8]. Але важливо усвідомлювати обмеження деяких методів метрології, коли вони використовуються в нанорозмірному режимі. Однією з важливих технічних проблем в скануючої зондової мікроскопії є необхідність прецизійного переміщення зонда і зразка з метою утворення робочого проміжку мікроскопа і вибору досліджуваного сектору поверхні нанооб'єкта.

**Аналіз публікацій та досліджень**

Незважаючи на можливість досягнення високого просторового дозволу, інформація про рельєф вимірюваного нанооб'єкта може неадекватно відображати реальні особливості поверхні, що є наслідком впливу інструменту дослідження на об'єкт і призводить до спостереження артефактів. Ці артефакти, як правило, легко враховуються на якісному рівні при інтерпретації СЗМ-результатів, однак специфіка ряду завдань може зажадати кількісних оцінок і методів відновлення реальної геометрії нанооб'єктів.

У процесі сканування можлива поява двох основних артефактів СЗМ: ефект «розширення профілю», обумовлений конволюцією зонда і вимірюваного нанооб'єкта, і ефект «заниження висот», обумовлений пружною деформацією досліджуваних нонооб'єктів.

Однак, як показали чисельні розрахунки, на поверхні зразка можна окремо спостерігати тільки атоми, рознесені не менше, ніж на ~ 0,4 нм. Тому досягнення атомного дозволу на щільно упакованих нереконструйованих поверхнях навіть за допомогою зонда з одним атомом на кінці теоретично неможливо. Однак для реконструйованих поверхонь, коли відстань між атомами верхнього шару може помітно перевищувати міжплощинна відстань в обсязі кристала, роздільне спостереження атомів цілком можливо. Зауважимо, що як раз дослідження поверхневих реконструкцій становить найбільший інтерес в сучасній фізиці поверхні і становить основну сферу додатків СЗМ, який, зокрема, і був винайдений Г. Біннінгом і Х. Рорером саме для вивчення реконструкції поверхні.

**Метою роботи** є аналіз варіантів впливу геометрії вістря зонду СЗМ на особливості типу сходів з метою підвищення якості отриманого вимірювального зображення. Розробка методу компенсації похибок, спричинених особливістю форми зонду та топографії вимірювального нанооб'єкта.

**Основна частина**

При відображенні різких особливостей геометрія зонда дуже важлива. Одним з недоліків, властивих всім режимам скануючої зондової мікроскопії, є кінцевий розмір наконечника зонда. Це призводить до істотного погіршення просторової роздільної здатності та значних спотворень у зображеннях СЗМ під час сканування поверхонь з великими нерівностями співвідношення сторін, тобто співвідношення між типовими розмірами вертикалі та горизонталі (рельєфу або наконечника).

При виявленні порівняно великих вимірюваних об'єктів якість зображень визначається геометрією вістря. Критичними є наступні параметри: радіус заокруглення кінця голки $r$ і відношення аспекту $Ar = L/W$ (відношення висоти зонда до діаметру основи).

Існує декілька варіантів впливу форми зонда зображення на особливості типу сходів, а саме: якщо радіус зонда $R$ приблизно дорівнює радіусу заокруглення r досліджуваних об'єктів – $R \approx r$.

На рис. 1 зображена геометрія досліджуваного об'єкта і конічного зонда в разі, коли $R \approx r$. Пунктирною лінією показана траєкторія руху зонда.

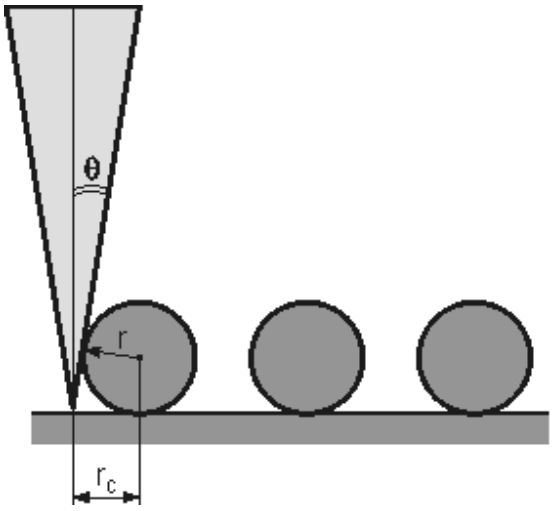



Рисунок 1 – Геометрія досліджуваного об'єкта і конічного зонда при $R \approx r$

Спостережуваний рельєф об'єктів, зображених на рис. 1, наведено на рис. 2.

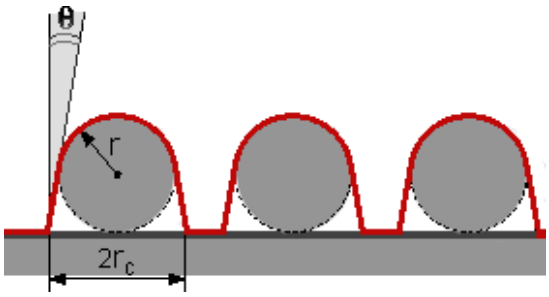



Рисунок 2 – Спостережуваний рельєф об'єктів

В даному випадку рух зонда по поверхні об'єкта можна розглядати як рух кулі радіуса $R$ по поверхні кулі радіуса $r$, Тобто зонд буде описувати дугу радіусом $R + r$. Елементарні геометричні розрахунки показують, що ширина поздовжнього розміру об'єкта в цьому випадку буде дорівнює

$$r_c = 2\sqrt{Rr}, \qquad (1)$$

а відносна висота об'єктів $(H)$ буде дорівнювати

$$H = r\left[1 - \sqrt{1 - \frac{r_c^2}{(R+r)^2}}\right]. \qquad (2)$$

Якщо мінімальна відстань між об'єктами $d$ – $2r$ менше ніж діаметр зонда $2r > d - 2r$ (рис. 4), то в процесі сканування в області між об'єктами, зонд буде проникати на максимальну глибину

$$\Delta H = r\left[1 - \sqrt{1 - \frac{(d/2)^2}{(R+r)^2}}\right], \qquad (3)$$

величини $H$ і $\Delta H$, показані на рис. 3, на якому зображений спостережуваний рельєф поверхні при заданих умовах, з урахуванням конволюції зонда і зразка.

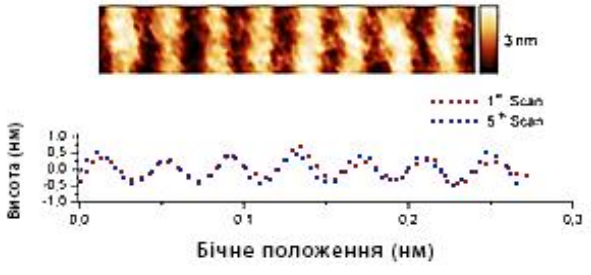



Рисунок 3 – Топографія вимірювального нанооб'єкта

В даному випадку розширення об'єкта відбулося на величину $(r_c - d/2)$. Крім того, кінцеві розміри зонда призводять до того, що він може не "пролізти" в вузькі впадини на поверхні зразка, занижуючи їх реальну глибину і ширину.

Якщо радіус зонда $R$ набагато менше радіуса заокруглення $r$ досліджуваних об'єктів – $R << r$.

На рис. 3 зображена геометрія досліджуваного об'єкта і конічного зонда в разі, коли $R << r$ та спостережуваний рельєф цього об'єкту на рис. 4.

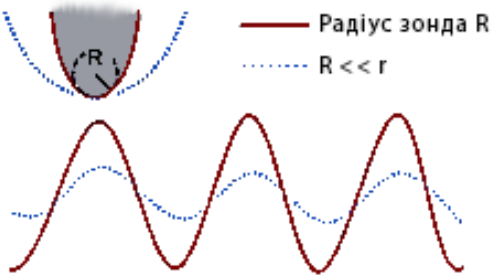



Рисунок 4 – Геометрія досліджуваного об'єкта і конічного зонда при R << r

Виходячи з даної геометрії легко показати, що в даному випадку ширина поздовжнього розміру об'єкта буде дорівнює

$$r_c = r(cos^2\theta + \sqrt{cos^2\theta + (1 + sin\theta)\left(\frac{-1 + tg\theta}{cos\theta}\right) + tg^2\theta}), \qquad (4)$$

де $\theta$ – половина кута розчину конуса. Відповідно, спостерігається рельєф поверхні в контактному режимі роботи приладу при заданих умовах зображений на рис. 4. В даному випадку розширення об'єкта відбулося на величину $2(r_c - r)$, а висота об'єкта залишилася колишньою – $2r$.

Зонд з великим радіусом починає взаємодіяти з поверхневими особливостями типу сходинки задовго до того, як центральна вісь зонда досягає особливості. Це можна бачити на прикладі відображення сходинки, показаному на рис. 5. При цьому, якщо наконечник зонда має закруглену форму, профіль сходинки також матиме округлений, а не гострий край (рис. 5, а).

Якщо використовується зонд пірамідальної форми, буде здаватися, що сходинка має кут, рівний куту зонда (рис. 5, б, в). Таким чином, для відображення цих особливостей, відношення сторін зонда є критичним. Зонди з великим відношенням сторін будуть вносити найменші спотворення.

При відображенні глибоких особливостей, типу канавок, форма зонда стає ще більш важлива. Дно цих особливостей може бути відображено тільки при використанні довгих і тонких зондів.

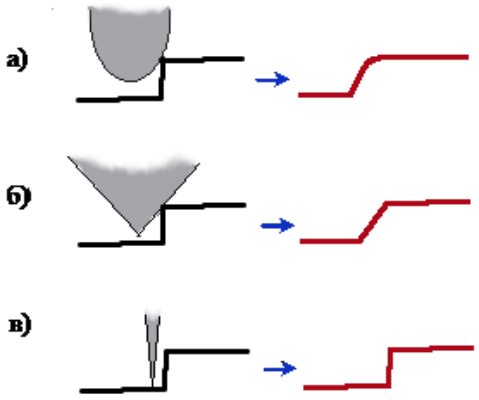



Рисунок 5 – Вплив форми зонда зображення на особливості типу сходів

Зонди з малими відносинами сторін не будуть досягати дна вузьких канавок (рис. 6, а). Особливості, які можуть бути відображені тільки довгими і тонкими зондами наведені на рис. 6, б.

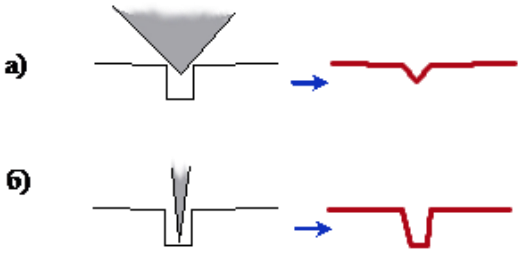



Рисунок 6 – Зонди з малим відношенням сторін

При відображенні малих опуклостей на плоскій поверхні (наприклад, квантових точок) загостреність використовуваного зонда впливає на ширину зображення. Як показано на рис. 7, зонд з великим радіусом вістря починає взаємодіяти з особливістю задовго до того, як центральна вісь зонда торкнеться зразка.

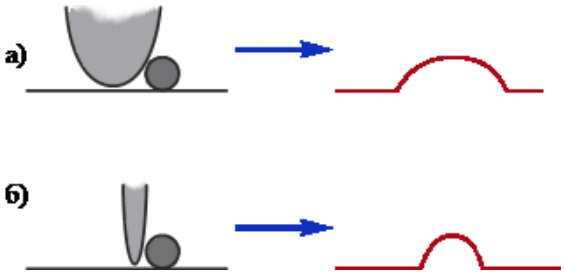



Рисунок 7 – Вплив різкості зонда на ширину зображення дрібних деталей на поверхні зразка

Зображення буде значно ширше, ніж реальна опуклість на поверхні зразка.

При цьому висота буде виміряна правильно, незалежно від геометрії зонда. Зонди для такого типу зразків повинні бути гострими, хоча вони не обов'язково повинні бути довгими, як при відображенні глибоких або різких особливостей.

Якщо зонд розташовується під відмінним від $90^o$ кутом до поверхні зразка, що виходить зображення буде спотвореним. При відображенні особливості, яка має рівні кути з кожного боку, одна сторона буде здаватися більш крутий, ніж інша (рис. 8).

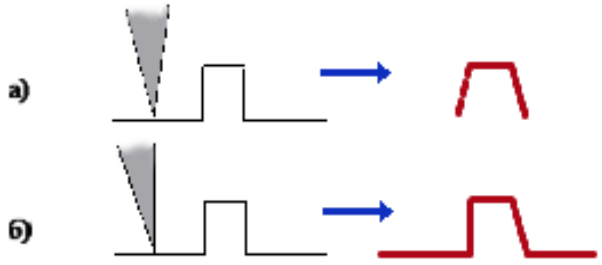



Рисунок 8 – Артефакти на зображенні викликані кутом між зондом і зразком

На рис. 8 артефакти на зображенні викликані кутом між зондом і зразком у наступних випадках: а) зонд розташований нормально до поверхні зразка; б) зонд розташований під кутом до нормалі поверхні зразка.

Режими відновлення зображень СЗМ, засновані на комп'ютерній обробці даних СЗМ, що враховує конкретну форму наконечника, дозволяють лише частково вирішити цю проблему [17, 18].

Найефективнішим способом відновлення є чисельна деконволюція [18] з використанням зображення наконечника, отриманого експериментально шляхом сканування тестових структур з добре відомою топографією.

Отримане зображення СЗМ являє собою «згортку» наконечника та поверхні. Одновимірний випадок процесу «згортки» проілюстрований на рис. 9.

Якщо форма наконечника описується функцією $P(x)$, а топографія поверхні описується функцією $R(x)$, то зображення СЗМ $I(x)$ задається наступним співвідношенням:

$$I\,(a)\;=\;R\,(x_k)\;-\;P\,(x_k-a),$$

за умови, що $\frac{dR}{dx} = \frac{dP}{dx}$ у точках контакту $x_k$.

де $a$ – зміщення наконечника в координатах поверхні.

На рис. 9 наведені наступні позначення: а) поверхня зразка $R(x)$ та початкове зображення $I(x)$, б) частково відновлене зображення $R'(x)$, з урахуванням форми наконечника $P(x)$.

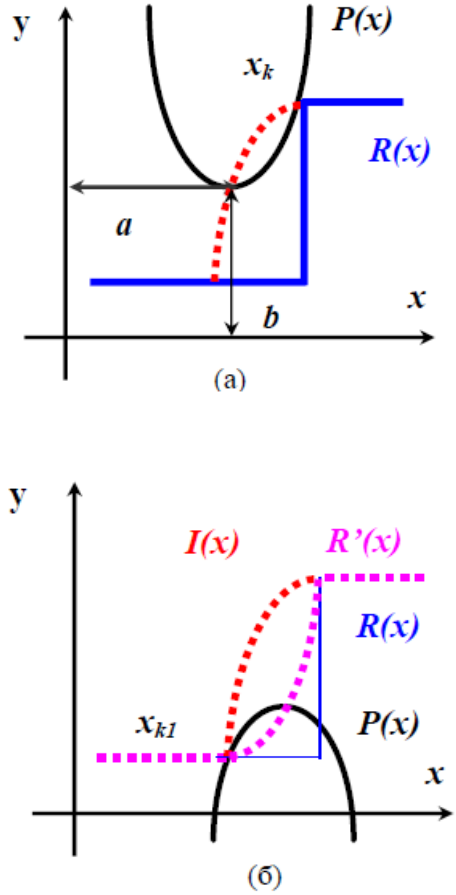



Рисунок 9 – Схематичне креслення процесу отримання та відновлення зображення.

Часткове відновлення початкової топографії поверхні здійснюється шляхом зворотного перетворення: зображення СЗМ, яке покроково сканується перевернутим наконечником. Тоді відновлене зображення топографії $R'(x)$ має вигляд

$$R'(x) = I(x_{k1}) - P(x - x_{k1}),$$

при умові, що $\frac{dI}{dx} = \frac{dP}{dx}$ у точках контакту $x_{k1}$, де $x_{k1}$ – абсциса точки дотику функції зображення СЗМ з функцією перевернутого наконечника (тобто із зворотними напрямками для осей $Y$ та $X$).

Слід зазначити, що повне відновлення поверхні зразка було б можливим лише за умови дотримання двох таких умов: по-перше, під час сканування наконечник торкнувся всіх точок поверхні, і, по-друге, наконечник завжди торкався лише одна точка поверхні.

Якщо під час сканування наконечник не може досягти якоїсь ділянки поверхні (наприклад, якщо зразок має звисаючі частини топографії), то можна виконати лише часткове відновлення топографії. Варто зазначити, що чим більше точок поверхні торкнувся зонд під час сканування, тим достовірніше можна реконструювати поверхню.

Доведено, що на практиці зображення СЗМ та експериментально отримана форма наконечника є двовимірними масивами дискретних значень, для яких похідна є неправильно визначеною величиною.

Тому на практиці замість виведення дискретних функцій під час чисельної деконволюції зображень СЗМ, під час сканування з постійною середньою висотою використовується вимога про мінімальність відстані наконечника зонда до поверхні

$$min\{I(x_{k1}) - P(x - x_{k1})\}.$$

У цьому випадку можна прийняти мінімальну відстань між точкою наконечника і відповідною точкою поверхні для даного положення наконечника відносно поверхні топографічної висоти. Ця вимога у своєму фізичному розумінні еквівалентна вимогам рівності похідних; однак це дозволяє шукати точки контакту між вістрям та поверхнею іншим, більш відповідним методом, що істотно скорочує час реконструкції топографії.

**Висновок**

При виявленні порівняно великих вимірюваних об'єктів якість зображень визначається геометрією вістря. Критичними є наступні параметри: радіус заокруглення кінця голки $r$ і відношення аспекту $Ar = L/W$ (відношення висоти зонда до діаметру основи).

Доведено, що зображення СЗМ та експериментально отримана форма наконечника є двовимірними масивами дискретних значень, для яких похідна є неправильно визначеною величиною. Рекомендовано замість виведення дискретних функцій під час чисельної деконволюції зображень СЗМ, під час сканування з постійною середньою висотою користуватися вимогою про мінімальність відстані наконечника зонда до поверхні нанооб'єкта.

На основі проведеного аналізу визначено, що під час сканування наконечник не може досягти певних ділянки поверхні, що викликано геометричними характеристиками форми зонду. У зв'язку з цим, запропоновано метод часткового відновлення топографії, який здійснюється шляхом зворотного перетворення: зображення СЗМ, яке покроково сканується перевернутим наконечником.

Доведено, що недоліки сканера, такі як гістерезис (різниця у прямих та зворотних рухах), повзучість та нелінійність, можуть бути частково компенсовані апаратним забезпеченням та вибо-

ром оптимальних режимів сканування. У будь-якому випадку зображення СЗМ містять залишкові спотворення, які важко видалити на апаратному рівні. Зокрема, оскільки рух сканера в напрямках *X* та *Y* впливає на відстань зонда - зразка (вісь *Z*), а зображення СЗМ представляють суперпозицію фактичної топографії та деякої поверхні другого (а іноді і вищого) порядку.

У цьому випадку можна прийняти мінімальну відстань між точкою наконечника і відповідною точкою поверхні для даного положення наконечника відносно поверхні топографічної висоти, що значно зменшить кількість небажаних артефактів у СЗМ-зображені та підвищить точність вимірювальної інформації.

**Список використаних джерел (References)**


1. The Scanning Probe Image Processor (SPIP) [Електронний ресурс]. URL: www.imagemet.com.
2. Nanosurf. Atomic force microscopy applications. URL: www.nanosurf.com/en/.
3. Equipment for real-time industrial applications. URL: http://www.digital-instruments.com/.
4. Said R. A. Microfabrication by localized electrochemical deposition: experimental investigation and theoretical modeling. *Nanotechnology*. 2004. Vol. 15, No. 7. P. 867. DOI: https://doi.org/10.1088/0957-4484/15/7/C01.
5. Nanosurf. Atomic force microscopy applications. URL: https://www.nanosurf.com/en/.
6. Equipment for real-time industrial applications. URL: http://www.digital-instruments.com/.
7. Garnaes J., Kofod N., Kühle A., Nielsen C., Dirscherl K., and Blunt L. Calibration of step heights and roughness measurements with atomic force microscopes. *Precision Eng.* 2003. No. 27. P. 91-98.
8. Butt H. J., Cappella B., Kappl M. Force Measurements With the Atomic Force Microscope: Technique, Interpretation and Applications. Surface *Science Reports*. 2015. No. 59. P. 1-152.
9. Johnson K. L. Contact Mechanics. Cambridge University Press, 2003.
10. Schwarz U. D. A Generalized Analytical Model for the Elastic Deformation of an Adhesive Contact Between a Sphere and a Flat Surface. *Journal of Colloid and Interface Science.* 2018. No. 261. P. 99-106.
11. Bhushan B., Peng W. Contact Mechanics of Multilayered Rough Surfaces. *Applied Mechanics Reviews*. 2002. No. 55. P. 435-480.
12. Schwarz U. D., Hölscher H., Wiesendanger R.. Atomic Resolution in Scanning Force Microscopy: Concepts, Requirements, Contrast Mechanisms, and Image Interpretation. *Physical Review B.* 2020. No. 62. P. 13089-13097.
13. Chi L. Nanotechnology, volume Nanostructured surfaces. Wiley-VCH, 2010.
14. Pires D., Hedrick J. L., De Silva A., and etc. Nanoscale Three-Dimensional Patterning of Molecular Resists by Scanning Probes. *Science*. 2010. No. 328. P. 732-735.
15. Waldbaur A., Rapp H., Länge K., Rapp B. E. Let There be Chip – Towards Rapid Prototyping of Microfluidic Devices One-Step Manufacturing Processes. *Analytical Methods*. 2011. No. 3. P. 2681-2716.
16. Nanosurf. Atomic force microscopy applications. URL: https://www.nanosurf.com/en/.
17. Equipment for real-time industrial applications. URL: http://www.digital-instruments.com/.


*Надійшла до редакції 12.12.2022*

УДК 621

**С. В. Кіфорук**

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса*

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА МЕХАНІЧНУ НАПРУГУ ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ

*Для забезпечення якості та надійності волоконно-оптичної лінії зв'язку на протязі запроектованого терміну служби в умовах експлуатації необхідно проводи постійний контроль технічного стану оптичного кабелю (ОК), в першу чергу, напруги у волокні. Механічні напруги в оптичному волокні за рахунок макро- та мікровигинів призводять до зміни коефіцієнта загасання сигналу.*

*В роботі проведено дослідження впливу температури навколишнього середовища на механічну напругу ($\sigma_{0x}$) діелектричного оптичного кабелю із силовими елементами із склопластику та арамідних ниток.*

*Отримана оцінка $\sigma_{0x}$ в кабелі при значенням температури від - 40 °С до 60 °С при постійних розтягуючих навантаженнях, яким відповідають видовження кабелю від 0,2 % до 0,6 %.*

*Дослідження $\sigma_{0x}$ показали, що механічні напруги ОК від збільшення температури зменшуються за рахунок від'ємного температурного коефіцієнта лінійного розширення арамідних ниток.*

***Ключові слова:*** *оптичне волокно, кабель, температурний коефіцієнт лінійного розширення, фіктивний модуль Юнга, фіктивна напруга.*

**S. V. Kiforuk**

## INFLUENCE OF THE AMBIENT TEMPERATURE ON THE MECHANICAL TENSION OF THE OPTICAL CABLE

*To ensure the quality and reliability of the fiber-optic communication line during the exploitation, it is necessary to constantly monitor the technical condition of the optical cable (OC), first of all, the tension in the fiber. Mechanical tensions in the optical fiber due to macro- and microbends lead to a change the signal's attenuation coefficient. Therefore, the study of the effect of the temperature of the operating environment of the optical cable on its mechanical tensions is relevant.*

*The purpose of the work is to determine the mechanical stress of the dielectric optical cable as a function of the temperature change ($t_x$) at constant values of the tension in the cable, which correspond to the corresponding elongation of the cable ($\varepsilon_p$).*

*The article investigates the effect of ambient temperature on the mechanical tensions in the cable ($\sigma_{0x}$). Conducted on the example of a cable type OKL-3-D1 of the domestic manufacturer "Odeskabel" with a dielectric central power element made of fiberglass of the "Polystal" type, and a peripheral power element – made of aramid threads "Twaron 2200-1055".*

*An estimate of the mechanical tension in this OC was obtained at different temperature values from -40 °C to 60 °C and at different elongations. For this purpose, the values of the temperature coefficient of linear expansion, Young's modulus of such a cable were obtained in the work. In the studies, the values of constant tensile loads of the cable, which correspond to its elongation from 0.2 % to 0.6 %, were used.*

*According to the results of the study, at a constant mechanical load of a given type of cable, which corresponds to its certain elongation $\varepsilon_p$ = 0.6 %, a decrease in mechanical tensions up to 7 % was obtained.*

*Due to the fact that the mechanical stress in the optical cable consists of two parts, the first of which depends on the mechanical loads, and the second depends on the temperature change of the cable's operating environment. According to the work [2], the first component is much larger than the second, but its changes, established in this work, in critical situations for fiber-optic communication lines are of significant importance, which must be taken into account during the design and operation of lines. In general, the study of $\sigma_{0x}$ made it possible to establish that the mechanical stresses of the OC de crease with temperature increase due to the negative temperature coefficient of linear expansion of the aramid threads.*

***Keywords:*** *optical fiber, cable, temperature coefficient of linear expansion, fictitious Young's modulus, fictitious tension.*

DOI 10.32684/2412-5288-2022-2-21-19-26

**Вступ**

Сучасні виробники кабельної продукції здатні виготовляти оптичні кабелі (ОК) дуже широкого спектру конструкцій, які можуть використовуватися при різних умовах в залежності від середовища експлуатації (кабельна каналізація, ґрунт, опори повітряних ліній та інше). В залежності від потреб замовника розробники ОК конструюють різні варіації кабелів з різними структурою осердя кабелю, силовими елементами та захисними покровами. При цьому силові елементи ОК застосовують із різних матеріалів, що дозволяють кабелю витримувати механічні навантаження з урахуванням кліматичних та механічних впливів навколишнього середовища.

Особливості розрахунку конструкції ОК обумовлюються, у першу чергу, наявністю в кабелі елементів з різних матеріалів, що мають різні значення температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) та модуля Юнга.

Відомо, що тверді тіла збільшують або зменшують свої розміри при нагріванні [1]. Кількісно теплове розширення або стискування матеріалу характеризується температурним коефіцієнтом лінійного розширення, який дорівнює відносній зміні лінійних розмірів тіла при зміні температури на 1 К.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення кожного з елементів ОК (трубок оптичного модуля чи профільованого сердечника, оптичних волокон (ОВ), оболонок, склопластикового чи стального центрального силового елемента (ЦСЕ)) має позитивне значення, а периферійного силового елементу (ПСЕ) із арамідних ниток – від'ємне значення. Отже, при зміні температури зміна довжини ОК не дорівнює зміні довжини окремих його елементів, і з цієї ж причини в елементах виникають різні механічні напруги.

Розрахунки конструкцій оптичних кабелів [2-4] та проектування волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) (наприклад, повітряних) на механічну міцність потребують визначення, в першу чергу, фіктивних температурного коефіцієнту лінійного розширення ($\alpha_0$), модуля Юнга ($E_0$) та максимальної напруги кабелю ($\sigma_{max}$) згідно до [5]. При цьому вивчення впливу механічних дій (розтягу, вигину та інше) та врахування температурних дій на механічну напругу ОК є актуальними та необхідними.

В даній роботі приводяться результати досліджень механічної напруги ОК при різних температурах навколишнього середовища експлуатації та відповідних величинах його видовження. Оцінювання величини дії температури на загальну напругу кабелю необхідна для порівняння з величинами напруг за рахунок механічних дій. Останнє дозволяє визначати, в першу чергу, механічні напруги в ОК, прокладених під землею та підвішених на опорах волоконно-оптичних ліній зв'язку, при змінах температури і навантаження.

**Аналіз літератури**

Як відомо, під час експлуатації підземних та повітряних ВОЛЗ оптичні волокна в кабелі знаходяться під певними напругами (локальними або розподіленими по їх довжині).

Причинами зміни величини напруги в ОВ кабелю можуть бути впливи температури навколишнього середовища та механічні дії, що з'являються при зменшенні радіусу вигину траси ВОЛЗ та збільшення механічних дій за рахунок його натягу або стискування.

Наприклад, до збільшення натягу ОК приводять збільшення розтягуючих навантажень у повітряних лініях зв'язку під дією власної ваги кабелю, голольоду, ожеледі та вітру.

Тому, під час експлуатації ВОЛЗ з'являється необхідність контролю технічного стану оптичного кабелю та, в першу чергу, напруг у волокні для забезпечення якості та надійності лінії на протязі заданого терміну служби в умовах її експлуатації.

Згідно [3] максимальне видовження ОК, що з'являється під дією надлишкових температурних і механічних напруг, призводить до видовження оптичних волокон, що перевищують прийняті при конструюванні кабелю задані значення ($\varepsilon_{ов}$ > (0,2-0,25) %).

Як відомо, надлишкові напруги приводять до появи багатозональних тріщин в матеріалі кварцового волокна, що, в свою чергу, приводить до його руйнування та зменшення терміну служби.

Згідно [5] максимально допустиме видовження ОК ($\varepsilon_{max}$) складається із суми двох складових: першої – допустимого видовження кабелю за рахунок його конструкції до величини при якій ОВ не подовжується; другої – допустимого видовження ОВ.

Як правило, при конструюванні ОК, максимальне видовження кабелю приймається до 1 %, а видовження ОВ до 0,25 %. Але згідно до [6, 7] реальне видовження волокна може виникати при експлуатації ОК більше його розрахункового значення.

В роботах [6, 7] приділена увага контролю надійності ОК з допомогою Бріллюенівської рефлектометрії. В цих роботах відтворена фізика впливу багатозональних тріщин в матеріалі кварцового ОВ на його надійність та розглянуто термін служби в залежності від механічної напруги в матеріалі та ділянки її розташування. Тобто, Бріллюенівський рефлектометр (БР) встановлює характер залежності терміну служби волокна від його натягу, а саме від дії механічних напруг.

Аналіз даних, отриманих за допомогою БР, дозволяє операторам лінії з великою точністю визначати місце розташування ділянки ОК з навантаженими волокнами, оцінювати рівень їх напруг та прогнозувати надійність (термін служби кабелю). В даних роботах приведені значення діапазону напруг в ОВ, виражених у видовженні.

В роботі [6] приведено, що Бріллюенівським рефлектометром «Можно выделить три диапазона напряжения: безопасное до 0,3 %, недопустимое более 0,6 % и промежуточное, требующее дополнительного анализа».

В роботі [8] показано, що якість та надійність експлуатації ВОЛЗ, як відмічалося раніше, залежить від великої кількості факторів. Одним із цих факторів являється якість заготовок для виготовлення ОВ, технологія витяжки ОВ та метрологічне забезпечення його показників під час експлуатації ОК. Останнє впливає на стійкість кабелю до механічних напруг під дією температури та механічних навантажень.

В роботі [9] розглянуто залежності часу життя оптичного волокна від розміру вигину. Запропоновано метод розрахунку відносного

видовження волокна в залежності від радіусу вигину. Надані рекомендації з вибору радіусу вигину волокна при проектуванні оптичних мереж з метою підвищення їх надійності. Але в роботі не вказано при яких температурних діапазонах проводяться дослідження.

В роботах [10, 11] приведені результати досліджень термомеханічної дії на геометричні розміри елементів і параметри ОК, але окремих досліджень по визначенню механічних дій на ОК не проводяться.

В роботах [4, 6, 7, 9-11] є велика бібліографія по врахуванню питань впливу умов експлуатації ОК на вибір його конструкції, але в них в цілому не розглянуто дослідження фіктивних механічних напруг ОК від зміни температури експлуатації при постійних розтягувальних навантаженнях, яким відповідають різні його видовження. Тому, в першу чергу, дослідження впливу навколишнього середовища на механічну напругу оптичного кабелю являється важливим. Останнє дасть можливість отримати оцінку впливу зміни температури середовища експлуатації ВОЛЗ на напругу в ОК заданої конструкції при постійному значенні його видовження.

В першу чергу, ці дослідження слід проводити для діелектричних самонесучих кабелів повітряних ВОЛЗ.

Тому перспективними слід ураховувати дослідження, присвячені визначенню механічної напруги в оптичних кабелях багатоволоконної конструкції з центральним та периферійним силовими елементами із склопластику і арамідних ниток відповідно.

**Мета роботи та задачі дослідження**

Метою роботи є визначення фіктивної механічної напруги діелектричного оптичного кабелю в залежності від зміни температури ($t_x$) при постійних значеннях напруги в кабелі, яким відповідають відповідні видовження кабелю ($\varepsilon_p$).

Задачею досліджень роботи є оцінка механічної напруги, що діє в ОК при різних температурах від – 40 °С до 60 °С та при різних видовженнях кабелю від (0,2-0,6) %.

**Розв'язання поставлених задач**

Для розв'язання поставлених задач в даній роботі використано метод згідно до [5] наближеного визначення температурного коефіцієнта лінійного розширення та модуля Юнга оптичного кабелю. Останнє пов'язане з наявністю в його багатомодульній конструкції елементів із різних матеріалів (кварц, полібутилентерефталат, поліетилен, склопластик, арамідні нитки та інше), що мають різні значення температурного коефіцієнта лінійного розширення та модуля Юнга. Тому температурний коефіцієнт лінійного розширення та модуль Юнга кабелю згідно цієї роботи називаються фіктивними, які дозволяють розраховувати конструкцію оптичного кабелю та проектувати ВОЛЗ на механічну міцність.

Фіктивний температурний коефіцієнт лінійного розширення кабелю згідно до [5] буде визначатися з умови рівноваги, за якої розтягуючі зусилля в усіх арамідних нитках будуть компенсовуватися зусиллями в інших елементах ОК, за виразом

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_a \cdot E_a \cdot S_a \cdot + \sum_{i=1}^{m} \alpha_i \cdot E_i \cdot S_i}{E_a \cdot S_a + \sum_{i=1}^{m} E_i \cdot S_i}, \qquad (1)$$

де $\alpha_0$ – фіктивний ТКЛР оптичного кабелю, $К^{-1}$;

$\alpha_a$, $\alpha_i$ – ТКЛР арамідних ниток та інших *i*-тих елементів ОК відповідно, $К^{-1}$;

$E_a$, $S_a$, $E_i$, $S_i$ – модуль Юнга, Н/мм$^2$, і площа поперечного перетину, мм$^2$, арамідних ниток та інших *i*-тих елементів ОК відповідно;

$m$ – кількість *i*-тих елементів ОК ($m = n - 1$, де $n$ – загальна кількість елементів кабелю).

Виходячи з виразу (1), згідно до [5] показано, що умовно конструкція ОК складається з двох частин.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення першої частини має від'ємне значення, а другої – додатне. Тоді згідно до [5] механічна напруга у двох частинах ОК різна і розподіляється пропорційно модулям Юнга (модулям пружності) відповідних матеріалів та їх площам поперечного перетину. Тоді, для спрощення розрахунку механічних напруг в ОК будемо користуватися поняттям фіктивної напруги ($\sigma_0$), віднесеною до усього кабелю.

Для такої конструкції оптичного кабелю значення фіктивної напруги при заданій температурі ($\sigma_{0x}$), у відповідності до [5] визначається по значенню допустимої напруги арамідних ниток при температурі 20 °С:

$$\sigma_{0x} = \left\{\sigma_a - \left(\alpha_a - \alpha_0\right) \cdot \Delta t \cdot E_a\right\} \cdot \frac{E_0}{E_a}, \qquad (2)$$

де $\sigma_{0x}$, $\sigma_a$ – фіктивна напруга ОК, при заданій температурі ($t_x$), напруга арамідних ниток при $t$ = 20 °С, Н/мм$^2$;

$\alpha_0$, $\alpha_a$ – фіктивний температурний коефіцієнт лінійного розширення оптичного кабелю та температурний коефіцієнт лінійного розширення арамідних ниток відповідно, $К^{-1}$;

$E_0$, $E_a$ – фіктивний модуль Юнга ОК та модуль Юнга арамідних ниток відповідно, Н/мм$^2$;

$\Delta t$ – перепад температур від вихідної ($t$ = 20 °C) до розрахункової ($t_x$) при визначенні напруженості в ОК ($\Delta t = t_x - t$).

В свою чергу $E_0$ у відповідності до [5] визначається за виразом

$$E_0 = \frac{E_a \cdot S_a + \sum_{i=1}^{m}(E_i \cdot S_i)}{S_a + \sum_{i=1}^{m}(S_i)}, \quad (3)$$

де $E_0$, $E_a$ – фіктивний модуль Юнга ОК та модуль Юнга арамідних ниток відповідно, Н/мм$^2$;

$S_a$, $S_i$ – площа поперечного розтину шару арамідних ниток та інших $i$-тих елементів ОК відповідно, мм$^2$.

Згідно до [5] напруга шару арамідних ниток при температурі 20 °C визначається за виразом:

$$\sigma_a = E_a \cdot \varepsilon_p, \quad (4)$$

де $\sigma_a$ – напруга шару арамідних ниток, Н/мм$^2$;

$E_a$ – модуль Юнга арамідних ниток, Н/мм$^2$;

$\varepsilon_p$ – видовження ОК.

Відповідно до [2, 5] площа склопластикового стержня і площа шару арамідних ниток визначаються за виразами:

$$S_{cc} = \frac{\pi \cdot d_{cc}^2}{4}; \quad (5)$$

$$S_a = \frac{LD}{\rho} \cdot m, \quad (6)$$

де $S_{cc}$, $S_a$ – площа поперечного перетину склопластикового стержня та шару арамідних ниток відповідно, мм$^2$;

$d_{cc}$ – діаметр склопластикового стержню, мм;

$LD$ – лінійна щільність однієї нитки, ТЕКС;

$\rho$ – щільність арамідної нитки, г/см$^3$;

$m$ – кількість ниток.

В якості прикладів в роботі приведені розрахунки значень: $\alpha_0$, $\sigma_{0x}$, $E_0$, $S_{cc}$, $S_a$ за виразами (1) – (6).

З метою визначення $\sigma_{max}$ використаємо вираз для визначення номінального значення розтягуючого зусилля оптичного кабелю згідно до [12]. На основі перетворення цього виразу було отримано формулу для визначення $\sigma_{max}$ у вигляді:

$$\sigma_{max} = \frac{F_n}{S_{cc} + S_a}, \quad (7)$$

де $\sigma_{max}$ – максимально допустима напруга ОК, Н/мм$^2$;

$F_n$ – номінальне допустиме розтягуюче зусилля ОК, Н;

$S_{cc}$, $S_a$ – площа поперечного перетину склопластикового стержня та шару арамідних ниток відповідно, мм$^2$.

Розрахунки значень $\alpha_0$, $\sigma_{0x}$, $E_0$, та $\sigma_{max}$ за вище приведеними формулами проводились на базі оптичного кабелю марки ОКЛ-З-Д1.

Дослідження напруг в оптичному кабелі марки ОКЛ-З-Д1, виробництва ПАТ «Одескабель», виконувалось за виразом (2) при наступних вихідних даних: діаметр оптичного модуля $d_{ом}$ = 2,5 мм; товщина трубки ОМ $t_{ом}$ = 0,2 мм; товщина захисної оболонки кабелю $\Delta_{об}$ = 2 мм; діаметр кабелю $D_к$ = 16,9 мм; арамідних нитках типу «Twaron 2200-1055» із щільністю ниток 1,45 г/мм$^3$ і кількістю ниток $m$ = 12, площі поперечного перетину шару арамідних ниток $S_a$ = 7,29 мм$^2$; склопластикового стержня типу «Polystal» $d_{cc}$ = 7,2 мм з площею поперечного перетину $S_{cc}$ = 5,72 мм$^2$. Згідно до [3] в табл. 1 наведені довідникові значення температурного коефіцієнта лінійного розширення та модулю Юнга матеріалів основних елементів ОК, які визначають його механічну міцність.

Таблиця 1 – Довідкові значення ТКЛР та модуля Юнга матеріалів основних елементів ОК

| № | Назва елементу | Матеріал елементу | ТКЛР, 1/К | Модуль Юнга, ГПа |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Трубка ОМ | Полібутілен-терефталат «Целанекс 2001» | $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ | 2,6 |
| 2 | ПСЕ | Арамідні нитки «Twaron 2200-1055» «з $LD$ = 8050 дтекс» | $-3 \cdot 10^{-6}$ | 104 |
| 3 | ЦСЕ | Склопластик «Polystal» | $6{,}6 \cdot 10^{-6}$ | 55 |
| 4 | Захисна оболонка | Поліетилен | $3{,}2 \cdot 10^{-4}$ | 0,621 |

Дослідження значень фіктивних температурного коефіцієнта лінійного розширення, модуля Юнга та фіктивних напруг кабелю були виконані за допомогою програмної реалізації в середовищі Python у відповідності до графічної моделі, представленої на рис. 1.

Дослідження $\sigma_{0x}$ були виконані в залежності від зміни температур $t_x$ від мінус 40 °C до 60 °C та видовженнях ОК від 0,2 % до 0,6 %.

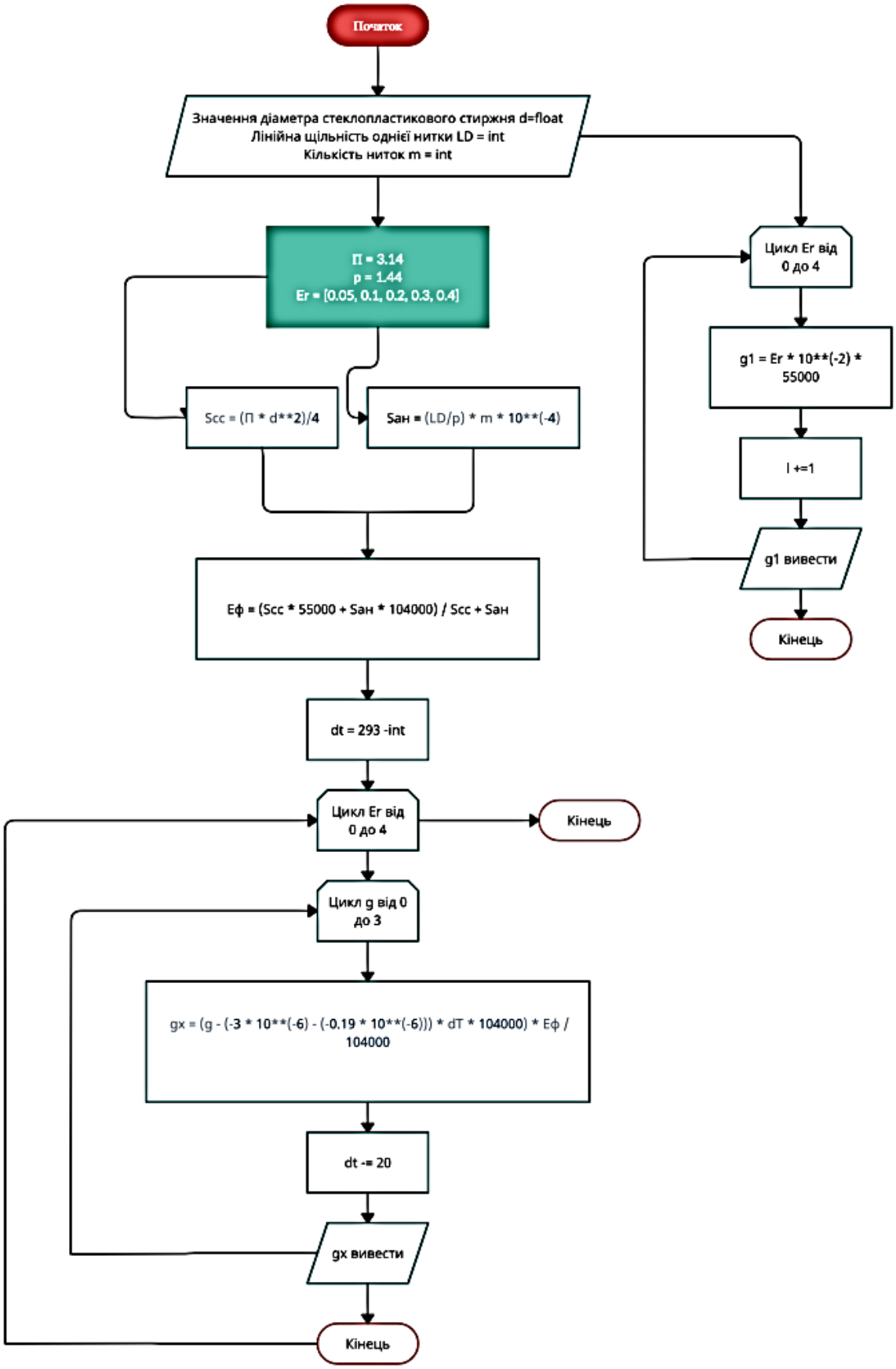



Рисунок 1 – Графічна модель досліджених $\sigma_{0x}$ оптичного кабелю з діелектричними силовими елементами

Залежності $\sigma_{0x}$ від температури в указаному діапазоні температур та різних видовженнях кабелю приведені на рис. 2.

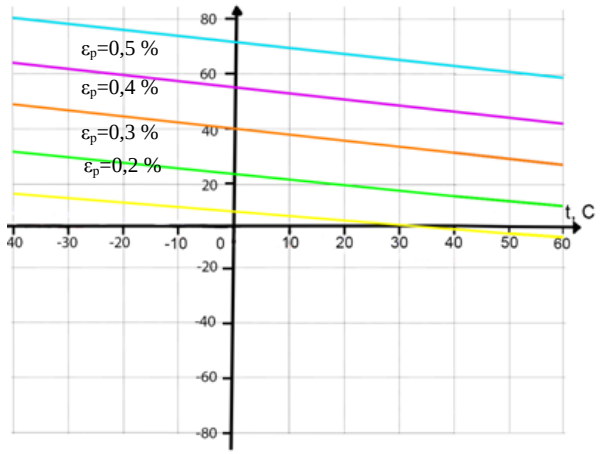



Рисунок 2 – Графіки залежностей $\sigma_{0x}$ від температури експлуатації та видовження оптичного кабелю

Аналіз результатів досліджень $\sigma_{0x}$ показав, що зі збільшенням температури навколишнього середовища його значення зменшуються, тобто зменшується його розтяг та розтяг оптичного волокна при одному і тому ж механічному навантаженні.

Останнє пояснюється впливом від'ємного значення температурного коефіцієнта лінійного розширення арамідних ниток на значення фіктивного температурного коефіцієнта лінійного розширення кабелю.

Порівняємо максимально допустиму напругу в оптичному кабелі марки ОКЛ-3-Д1, яка з'явиться в ньому при номінально допустимому розтягуючому зусиллі ($F_n$ = 3500 Н), згідно до норми зазначеної з технічних умовах на кабель [12].

Розрахунки $\sigma_{max}$ проводились при $F_n$ = 3500 Н згідно до [12] та $S_{cc}$ = 5,72 мм$^2$ і $S_a$=7,29 мм$^2$ і при $\varepsilon_p$ = 0,6 %.

Таким чином, результати розрахунку $\sigma_{max}$ при заданому значенні $F_n$ буде складати 269 Н/мм$^2$ при температурі 20 °С, а визначене значення $\sigma_{0x}$ при цій же температурі та $\varepsilon_p$ = 0,6 % згідно до рис. 2 – 69 Н/мм$^2$.

Отже, ці порівняння вказаних напруг кабелю показують, що значення напруги ОК, яке з'являється під дією температури при $\varepsilon_p$ = 0,6 % складає 25,65 % від величини $\sigma_{max}$ в найнесприятливіших умовах механічних навантажень, отриманої при номінальному значенні розтягуючого зусилля на оптичний кабель марки ОКЛ-3-Д1 величиною в $F_n$ = 3500 Н.

**Висновки**

У даній роботі проведені дослідження напруг в оптичному кабелі багатомодульної конструкції з центральним силовим елементом із склопластикового стержня та периферійним силовим елементом із арамідних ниток, що знаходиться під дією температурних впливів навколишнього середовища та постійним розтягуючим навантаженням.

Результати досліджень $\sigma_{0x}$ дозволили установити, що:

– з ростом температури напруга в кабелі зменшується, що пояснюється впливом модуля Юнга та температурного коефіцієнта лінійного розширення арамідних ниток на фіктивні значення температурного коефіцієнта лінійного розширення та модуля Юнга оптичного кабелю;

– напруга оптичного кабелю в температурному діапазоні від – 40 °С до 60 °С зменшується до 7 % при максимальному видовженні ОК 0,6 %.

Таким чином, при експлуатації ОК вплив температури навколишнього середовища на механічну напругу кабелю потрібно враховувати обов'язково, особливо при умовах експлуатації кабелю близьких до екстремальних. В першу чергу, зміни $\sigma_{0x}$ необхідно враховувати при розрахунках механічної міцності повітряних волоконно-оптичних ліній зв'язку.

**Список використаних джерел**

1. Янг Г., Фрідман Р. Фізика для університетів. Френсіс Сірс і Марк Земанські: Пер. з англ. Львів, Наутілус, 2018. 1536 с., іл.

2. Бондаренко О. В. Розробка методу розрахунку стійкості діелектричних оптичних кабелів до розтягуючих навантажень. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Донецьк, 2009. Вип. 17 (148). С. 64-68.

3. Иоргачев Д. В., Бондаренко О.В., Дащенко А. Ф., Усов А. В. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация. Монография. Одесса: «Астропринт», 2000. 536 с.

4. Бондаренко О. В., Степанов Д. М., Багачук Д. Г., Тіхонов В. І., Вербицький О. О. Методика забезпечення конструктивної стійкості підземних оптичних кабелів до розтягувальних навантажень. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: технічні науки.* 2016. Вип. 4. С. 5-11.

5. Бондаренко О. В. Метод определения температурного коэффициента линейного расширения и модуля Юнга диэлектрического оптического кабеля. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. Донецьк, 2009. Вип. 9 (158). С. 25-29.

6. Акопов С. Г., Васильев Н. А., Поляков М. И. Использование бриллюэновского рефлектометра при испытаниях оптического кабеля на растяжение. *Ligthwave Russian Edition*. 2006. № 1. С. 23-25.

7. Ніколов К. О. Рефлектометричні методи оцінки стану оптичних волокон на мережах зв'язку. *Телекомунікаційні та інформаційні технології.* 2015. № 1. С. 83-88. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2015_1_16.

8. Корчевський О. С., Коломієць Л. В., Ваганов О. І. Визначення метрологічних показників оптичного волокна. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2005. Вип. 1 (6). С. 58-63. DOI: 10.32684/2412-5288-2015-1-6-58-63.

9. Манько О. О., Николов К. О. Особенности прокладки и надежность новых типов оптических волокон. *Научные труды ОНАС им. А. С. Попова*. Одесса, 2015. Вып. 1. С. 112-117.

10. Бондаренко О. В., Степанов Д. М. Влияние термомеханического воздействия на длину оптического волокна в трубке оптического модуля. *Научный журнал «Труды БГТУ»*. Минск, 2018. № 2, серия 3. С. 43-46.

11. Бондаренко О. В., Степанов Д. М. Температурний вплив на геометричні розміри елементів та параметри конструкції оптичного кабелю. *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*. Одеса, 2017. Вип. 2. С. 20-27.

12. ТУ У 05758730.007-97 («Кабелі зв'язку оптичні для магістральних, зонових та міських мереж зв'язку»): 1997. [Чинні від 10.12.1997]. Одеса: ОЦСМС, 1997. 65 с.: табл. 23. (Технічні умови ВАТ «Одескабель»).

## References

1. H. Yanh, R. Fridman Fizyka dlia universytetiv. Frensis Sirs i Mark Zemanski: Per. z anhl. Lviv, Nautilus, 2018. 1536 s., il.

2. Bondarenko O. V. Rozrobka metodu rozrakhunku stiikosti dielektrychnykh optychnykh kabeliv do roztiahuiuchykh navantazhen. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriia: «Obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia»*. Donetsk, 2009. Vyp. 17 (148). S. 64-68.

3. Iorgachev D. V., Bondarenko O. V., Dashhenko A. F., Usov A. V. Volokonno-opticheskie kabeli. Teoreticheskie osnovy, konstruirovanie i raschet, texnologiya proizvodstva i e'kspluataciya. Monografiya. Odessa: «Astroprint», 2000. 536 s.

4. Bondarenko O. V., Stepanov D. M., Bahachuk D. H., Tikhonov V. I., Verbytskyi O. O. Metodyka zabezpechennia konstruktyvnoi stiikosti pidzemnykh optychnykh kabeliv do roztiahuvalnykh navantazhen. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriia: tekhnichni nauky*. 2016. Vyp. 4. S. 5-11.

5. Bondarenko O. V. Metod opredeleniya temperaturnogo koe'fficienta linejnogo rasshireniya i modulya Yunga die'lektricheskogo opticheskogo kabelya. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriia: «Elektrotekhnika i enerhetyka»*. Donetsk, 2009. Vyp. 9 (158). S. 25-29.

6. Akopov S. G., Vasil'ev N. A., Polyakov M. I. Ispol'zovanie brillyue'novskogo reflektometra pri ispytaniyax opticheskogo kabelya na rastyazhenie. *Ligthwave Russian Edition*. 2006. № 1. S. 23-25.

7. Nikolov K. O. Reflektometrychni metody otsinky stanu optychnykh volokon na merezhakh zviazku. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii*. 2015. # 1. S. 83-88. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2015_1_16.

8. Korchevskyi O. S., Kolomiets L. V., Vahanov O. I. Vyznachennia metrolohichnykh pokaznykiv optychnoho volokna. *Zbìrnik naukovih prac' Odes'koï deržavnoï akademìï tehnìčnogo regulûvannâ ta âkostì*. 2015. Vyp. 1 (6). S. 58-63. DOI: 10.32684/2412-5288-2015-1-6-58-63.

9. Man'ko O. O., Nikolov K. O. Osobennosti prokladki i nadezhnost' novyx tipov opticheskix volokon. *Nauchnye trudy ONAS im. A. S. Popova*. Odessa, 2015. Vyp. 1. S. 112-117.

10. Bondarenko O. V., Stepanov D. M. Vliyanie termomexanicheskogo vozdejstviya na dlinu opticheskogo volokna v trubke opticheskogo modulya. *Nauchnyj zhurnal "Trudy BGTU"*. Minsk, 2018. № 2, seriya 3. S. 43-46.

11. Bondarenko O. V., Stepanov D. M. Temperaturnyi vplyv na heometrychni rozmiry elementiv ta parametry konstruktsii optychnoho kabeliu. *Naukovi pratsi ONAZ im. O. S. Popova*. Odesa, 2017. Vyp. 2. S. 20-27.

12. TU U 05758730.007-97 («Kabeli zviazku optychni dlia mahistralnykh, zonovykh ta miskykh merezh zviazku»): 1997. [Chynni vid 10.12.1997]. Odesa.: OTSiM, 1997. 65 s.: tabl. 23. (Tekhnichni umovy VAT «Odeskabel»).

*Надійшла до редакції 10.07.2022*

# РОЗДІЛ 3

# Інформаційно-вимірювальна техніка, інформаційно-вимірювальні та транспортні технології

УДК 53.08:620.178.5

**В. П. Квасніков,** д.т.н., **А. П. Стахова,** к.т.н.

*Національний авіаційний університет, м. Київ*

## СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИГНАЛУ ВІБРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

*У роботі аналізується актуальне питання своєчасного виявлення та попередження небезпечного стану відповідальних машин та механізмів з використанням вібраційної діагностики, як перспективного методу. Передбачається визначення несправного стану за даними вимірювань вібрації та наступне визначення характеру несправності за даними аналізу сигналів вібрації, з використанням перетворення Фур'є. Пропонується проводити обробку вихідного сигналу з датчика, який надходить на персональний комп'ютер, де за допомогою діагностичної програми на базі MATLAB проводиться спектральний аналіз сигналу виміряної вібрації.*

***Ключові слова :*** *вібрація, перетворення Фур'є, амплітуда, частота, фаза, спектр сигналу.*

**V. P. Kvasnikov,** DSc, **A. P. Stakhova,** PhD

## SPECTRAL ANALYSIS OF VIBRATION SIGNAL USING FOURIER TRANSFORM

*The paper analyzes the topical issue of timely detection and prevention of a dangerous state of critical machines and mechanisms using vibration diagnostics as a promising method. It is proposed to use the method of analysis of vibration spectra in order to identify malfunctions, by processing the output signal from the sensor, which is sent to a personal computer, where a spectral analysis of the measured vibration signal is performed using a diagnostic program based on MATLAB. It is proposed to use spectral analysis, which is a traditional method of vibration diagnostics. It is supposed to determine the faulty state according to vibration measurement data and then to determine the nature of the fault according to the vibration signals analysis using the Fourier transform. It is proposed to process the output signal from the vibration sensor to a personal computer, where a spectral analysis of the measured vibration signal is carried out using a diagnostic program based on MATLAB. The use of FFT algorithms is due to a decrease in the number of operations performed, and, consequently, an increase in performance. It is shown that the decomposition of a complex signal in a Fourier series gives the components of the spectrum, which are, in narrow-band analysis, the harmonic components of the complex signal. It has been determined that narrowband spectral analysis allows detecting a larger number of faults or defects and is used for monitoring and in-depth diagnostics of equipment. Knowing the frequencies at which malfunctions of the kinematic pairs of machinery are manifested, the amplitude of the spectrum components can be used to assess their state. It was determined that spectral analysis is widely used in the processing of vibration diagnostics data, being the main and classical method of analysis. To optimize the duration of the test, it is necessary to take into account the relationship between the spectrum bandwidth and the signal accumulation time. The pass-through characteristic reflects the dependence of the signal level on time at a certain frequency, illustrating the process of signal accumulation during narrow-band spectral analysis. The narrower the analysis strip, the longer the measurements take.*

***Keywords:*** *vibration, Fourier transform, amplitude, frequency, phase, signal spectrum.*

DOI 10.32684/2412-5288-2022-2-21-28-33

**Вступ**

Необхідність підвищення ефективності виробничої діяльності характеризується збільшенням інтенсивності використання технологічних систем та обладнання, зростанням енергетичних потужностей, внаслідок чого відбувається формування негативного впливу на надійність та безпеку промислового обладнання. Належний своєчасний огляд та ремонт обладнання дозволяє на ранніх стадіях визначати дефекти обладнання для збільшення терміну його експлуатації та підвищення надійності роботи. Завдання визначення несправностей в

механізмах є важливим, але часто громіздким і трудомістким.

Існує багато методів діагностики обладнання, і одним із методів сучасної діагностики є вібраційна діагностика [1-4]. Вібродіагностика в даний час набула широкого застосування, оскільки вібраційні процеси досить повно відображають технічний стан багатьох деталей і механічних вузлів [2-4]. Методи вібродіагностики спрямовані на виявлення та ідентифікацію таких несправностей агрегату, які впливають на його вібрацію.

Вібраційна діагностика дозволяє ідентифікувати не тільки дефектний вузол обладнання, але і сам дефект [3]. Застосування систем вібродіагностики дозволяє визначати дефект ще на стадії зародження, уникнувши аварійних зупинок машинного обладнання. Вібраційні процеси, що виникають у процесі функціонування машин і обладнання, високоінформативні, досить повно відображають технічний стан багатьох деталей і вузлів.

Найбільш поширена технологія, що передбачає визначення несправного стану за даними штатних контрольних вимірювань вібрації з наступним визначенням характеру несправності за даними вібраційних досліджень, з подальшим проведенням гармонічного аналізу вібраційних сигналів [5].

У зв'язку з тим, що на низьких частотах сигнал вібрації з датчика можна порівняти з величиною шумів вимірювальної електроніки, особливу увагу слід приділити виділенню корисного сигналу. Для цього використовується вузькосмуговий спектральний аналіз [5]. В основі такого типу аналізу лежить принцип розкладання часової реалізації сигналу в частотний спектр з рівномірним кроком по частоті за допомогою перетворення Фур'є [5].

**Аналіз останніх досягнень і публікацій**

Для оцінки параметрів вхідного сигналу використовуються різні методи оцінки стаціонарних, нестаціонарних та нелінійних даних, що базуються на простому припущенні, що будь-які сигнали складаються з різноманітних простих внутрішніх видів коливань та відрізняються апріорними та адаптивними базисами розкладання [6–7]. Для аналізу квазідетермінованих та випадкових дискретних електричних вимірювальних сигналів у багатьох предметних областях проблемою є кінцівка інтервалу вимірювання та приховані періодичні, майже періодичні та ангармонічні сигнали, що потребує застосування поряд з часовою формою також частотної та частотно-часової форм подання [8]. Наприклад, якщо частоти складових відомі, то для визначення невідомих амплітуд та фаз складного сигналу можна застосувати алгоритм, який використовує дискретне синус-косинусне перетворення Фур'є [9]. У роботі [10] розглянуто цифровий спосіб визначення початкової фази гармонічного сигналу при частоті відліків менше частоти Найквіста. При флуктуаціях параметрів гармонічних складових у роботі [11] отримано оцінки середньої потужності сигналу з флуктуацією фаз складових гармонічних коливань та аналітичні вирази для розподілу зазначеної оцінки.

Метод, що використовує швидке перетворення Фур'є (ШПФ), дозволяє проводити розділення та оцінку параметрів складових вхідного сигналу і дає стійке розкладання сигналу на прості складові за відсутності апріорних відомостей про частоти сумарного сигналу. У роботі [12] описано алгоритм оцінки амплітуди, а роботі [13] наведено складний алгоритм обчислення амплітуд і фаз досліджуваного сигналу з двох складових.

Мета статті – розробити метод аналізу спектрів вібрації з метою ідентифікації несправностей, шляхом аналізу простих періодичних складових вхідного вібраційного сигналу при спектральному аналізі з використанням ШПФ, для подальшої обробки вихідного сигналу з датчика, який надходить на персональний комп'ютер, де за допомогою діагностичної програми на базі MATLAB проводиться спектральний аналіз сигналу виміряної вібрації.

**Виклад основного матеріалу**

Спостерігаючи за зміною форми досліджуваного сигналу не завжди дозволяє отримати повну інформацію про зміни які несе сигнал. Малі спотворення в формі синусоїдальних коливань відповідають наявності у складі сигналу додаткових гармонічних складових. Вони маскуються потужною гармонікою несучої частоти і можуть бути отримані тільки з використанням спектрального аналізу. Усі методи спектрального аналізу поділяються на дві групи – аналогові та цифрові (обчислювальні).

Аналогові методи зазвичай використовують вузькосмугову фільтрацію сигналу для виділення гармонічних складових. Обчислювальні методи включають оцифрування сигналу та розрахунок спектра з використанням алгоритмів цифрової фільтрації або швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [5].

З найчастіше використовуваних засобів вимірювань, реалізованих з використанням

обчислювальної техніки, можна назвати аналізатори форми, спектральні аналізатори і аналізатори спектра обвідної. Функції аналізатора форми полягають у вимірюванні амплітуд та фаз окремих складових сигналу та у порівняльному аналізі форми окремих ділянок сигналу, початок та закінчення яких визначається кутом повороту валу.

Цифрові аналізатори виробляються під певну групу близьких за принципом обробки сигналів технологій, і лише деякі з них розраховані на використання всіх відомих технологій.

Як правило, у всіх видах аналізаторів передбачено вузькосмуговий спектральний аналіз сигналів і дуже рідко – спектральний аналіз обвідної смугового сигналу, необхідний для використання інформаційної технології за методом обвідної. Причина полягає в тому, що для такого виду аналізу при обмежених обсягах пам'яті в аналізаторі доводиться замість одного процесора, як це має місце в персональному комп'ютері, мати два паралельні процесори. Один із них, сигнальний, служить для попередньої обробки високочастотних сигналів у реальному часі.

До аналізаторів спектра також можна підключати інші вимірювальні прилади для більш детальної діагностики, тим самим досягаючи мінімуму витрат на моніторинг і діагностику великої кількості віддаленого один від одного обладнання.

На рис. 1 зображено приклад підключення вібродіагностичного обладнання. При цьому кількість блоків для вимірювань та аналізу сигналів у стаціонарних системах зазвичай визначається числом точок контролю та гранично допустимим інтервалом між вимірюваннями. Зазвичай, кількість датчиків в одному блоці може становити від одного до кількох десятків. У функції блока вимірювань входить аналіз вібрації або шуму, а також інших фізичних величин за програмою, що задається діагностичним центром. Алгоритми програми автоматично змінюються в залежності від результатів вимірювань та проведення діагностування, тобто від стану об'єкта контролю. Іноді функції блока вимірювань входить і порівняння результатів вимірювань та аналізу з порогами, що задають межі допустимої зміни діагностичних параметрів. Якщо ж допустимий час між періодичними вимірюваннями досить великий, у системі може використовуватися один блок, до якого датчики підключаються через електронні пристрої комутації сигналів. Блок вимірювань при цьому може конструктивно поєднуватися в один корпус з діагностичним центром.

Перспектива розвитку стаціонарних систем моніторингу пов'язана також із розвитком можливостей мікрокомп'ютерів. Результатом цього розвитку може стати розділення функцій між блоками вимірювань та діагностичним центром. Блок вимірювань може взяти на себе функції моніторингу, що звертається до діагностичного центру лише при появі дефектів з метою їхньої ідентифікації. За таких умов, одна система для діагностики може працювати з великою кількістю блоків, що проводять вимірювання в різних точках, контролюючи стан устаткування.

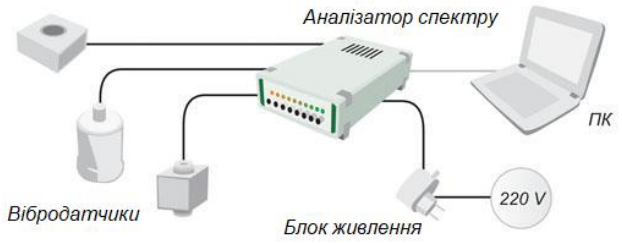



Рисунок 1 – Схема підключення вібродіагностичного обладнання

Основними діагностичними ознаками появи дефектів у системах моніторингу та діагностики є наступні:

- зростання амплітуди окремих складових у спектрі вібрації;
- зростання ефективного значення групи складових спектра вібрації у вибраній смузі частот;
- поява модуляції окремих гармонійних складових вібрації гармонійним або низькочастотним випадковим процесом;
- поява модуляції випадкових складових вібрації у вибраній смузі частот гармонійним або низькочастотним випадковим процесом;
- зміна форми періодичних коливань об'єкта, що супроводжується зміною співвідношення амплітуд складових в гармонійному ряді.

Для виявлення, ідентифікації виду та величини дефекту результати кількісної оцінки діагностичних параметрів порівнюються з еталонами бездефектних машин та їх вузлів, з еталонами різних дефектів.

Завдання вивчення як шкідливої, так і корисної вібрацій об'єднані загальним теоретичним апаратом, застосуванням однакових методів технічного розрахунку та однаковою апаратурою, що застосовується для проведення

контролю, вимірювання та аналізу вібраційних сигналів.

Механічні коливання можна розглядати у часовій області, у якій найважливішою є залежність амплітуд від часу (часовий розвиток). Ця залежність може бути детермінованою, тобто така, що піддається опису математичними виразами, або стохастичної, тобто такої, що допускає опис лише статистичними функціями.

Фізичними характеристиками механічних коливань частотної області є розподіл їх амплітуд по частоті, тобто, їхній частотний спектр. Характеристики коливань в цих двох областях пов'язані між собою перетворенням Фур'є.

Форма і частотний склад вібраційних процесів визначається характером збуджуючих сил і передачею цих збуджень до того місця, де розташовується первинний вимірювальний перетворювач. У більшості випадків форма сигналу має вигляд складних коливань, які містять детерміновану і випадкову складові вібраційного процесу. Як форма, так і спектральний склад сигналу залежать від вимірюваного параметра вібрацій. На практиці вимірюють переміщення, швидкість чи прискорення.

За допомогою середовища програмування MATLAB запропоновано проводити моніторинг і аналіз вібраційних параметрів та збереження результатів вібраційних досліджень. Середовище MATLAB [14, 15] дозволяє використовувати спектральний аналіз сигналу виміряної вібрації. Такий аналіз застосовують з метою виявлення складових в частотній області. Адекватною сферою його використання є дослідження різного виду стаціонарних сигналів, що складаються з суми складових з постійним періодом. Зазначений метод базується на прямому перетворенні Фур'є [5].

Специфіка проведення аналізу сигналу на основі перетворення Фур'є простежується при аналізі сигналів з постійним періодом (наприклад, гармонійного). Для цього дійсний сигнал [5]:

$$x(t) = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) = \\ = a_1 \cos(\omega_1 t) + b_1 \sin(\omega_1 t) \qquad (1)$$

з періодом $T$ розкладають в ряд Фур'є по кратних частотах. Цей ряд може бути представлений в тригонометричної формі [5]:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) = \\ = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t) \right], \qquad (2)$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)\, dt, \qquad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(n\omega_1 t)\, dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(n\omega_1 t)\, dt,$$

де $a_n$, $b_n$ – коефіцієнти.

У комплексній формі:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^* e^{jn\omega_1 t}, \qquad (4)$$

$$A_n^* = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{jn\omega_1 t} dt, \qquad (5)$$

де $A_n^*$ – комплексний коефіцієнт.

Для неперіодичного сигналу ряд Фур'є замінюється інтегралом Фур'є [5]:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S^*(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \qquad (6)$$

$$S^*(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt. \qquad (7)$$

Вираз (6) називається оберненим інтегральним перетворенням Фур'є, вираз (7) – перетворенням Фур'є. У цих перетвореннях замість амплітуди використовується поняття спектральної складової $S^*(\omega)$ сигналу.

В даний час широко використовуються різні дискретні алгоритми, що реалізують Фур'є-перетворення. Провівши дискретизацію $x(t)$ і виконавши відповідні заміни ( $\omega = 2\pi n / N$, де $N$ – кількість відліків на досліджуваному проміжку часу (0; $T$)), вирази (6) і (7) можна записати у наступному вигляді:

$$S_n^* = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j\frac{2\pi}{N}ni}; \qquad (8)$$

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \dot{S}_n^* e^{j\frac{2\pi}{N}ni}. \qquad (9)$$

Наведена вище система рівнянь вимагає виконання $N^2$ обчислювальних операцій. В силу того, що коефіцієнти у виразі (9) є сполученими, з'являється можливість розбиття вихідної матриці на матриці з кількістю елементів, що не перевищує $\log_2 N$, кожна з яких містить 2 ненульових числа. Подібне перетворення носить назву «швидке перетворення Фур'є». Подібний математичний апарат дозволяє проводити більш глибокі дослідження сигналів вібрації обладнання, проводити локалізацію сигналу в частотній області, що дозволяє представити сигнал у вигляді окремих адитивних складових. Дані складові мають характерні особливості для кожного окремого дефекту, що дозволяє не тільки інтегрально оцінити технічний стан обладнання, але й з певним ступенем достовірності ідентифікувати вид дефекту досліджуваного обладнання.

Було проведено імітаційне комп'ютерне моделювання, моделювався результуючий сигнал, що був утворений накладанням одиничних сигналів. На рис. 2 наведено результат моделювання результуючого сигналу.

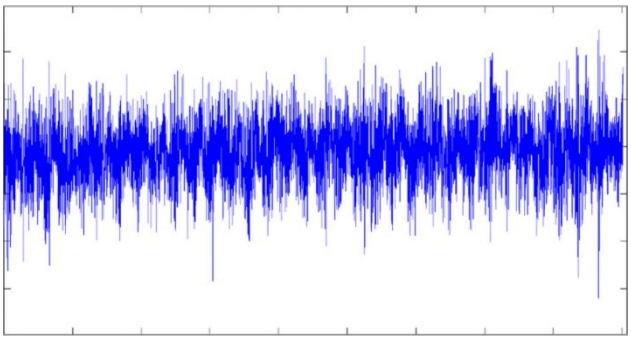


Рисунок 2 – Моделювання результуючого Сигналу

На рис. 3 наведено амплітудний спектр змодельованого результуючого сигналу.

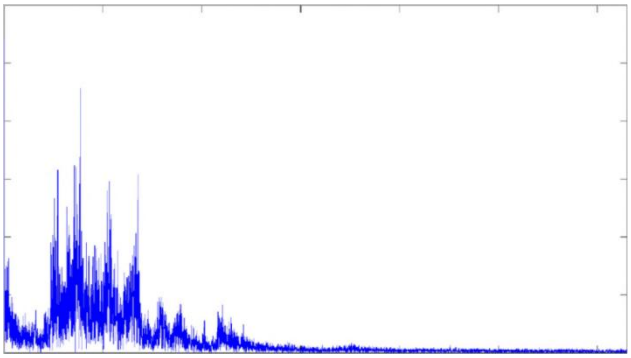


Рисунок 3 – Спектр змодельованого результуючого сигналу

**Висновки**

Вирішуючи завдання ідентифікації дефектів машинного обладнання в роботі було запропоновано використовувати аналіз сигналів вібрації з використанням перетворення Фур'є. Запропоновано проводити обробку вихідного сигналу з датчика, який надходить на персональний комп'ютер, де за допомогою діагностичної програми на базі MATLAB проводиться спектральний аналіз сигналу виміряної вібрації.

Проведення моделювання результуючого сигналу дозволяє отримати експериментальні дані щодо можливості ідентифікації різного виду несправностей на основі результатів спектрального аналізу. Розкладання складного сигналу в ряд Фур'є дає складові спектру, що представляють собою при вузькосмуговому аналізі гармонічні складові сигналу. Допущена думка, що вузькосмуговий спектральний аналіз дозволяє виявити більшу кількість несправностей або дефектів та використовується для моніторингу та глибокої діагностики обладнання. Знаючи частоти, на яких виявляються несправності кінематичних пар механізмів, за амплітудою складових спектра можна оцінити їх стан.

**Список використаних джерел**

1. Boreanaz G., Celiberti L., and Falasca V. (2007, January). In-plant fast diagnostics of vibration-acoustic quality of cars. In SAE 2007 Noise and Vibration Conference and Exhibition (No. 2007-01-2211).

2. Malla C., Panigrahi I. Review of condition monitoring of rolling element bearing using vibration analysis and other techniques. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2019, 7(4), pp. 407-414.

3. Tandon N., Choudhury A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*. 1999, 32(8), pp. 469-480.

4. Aherwar A. An investigation on gearbox fault detection using vibration analysis techniques: A review. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2012, 10(2), pp. 169-183.

5. Amick H., Bui S. K. Review of several methods for processing vibration data. *Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology*. 1992, 1619, pp. 253-264.

6. Mallat S. (2009). A wavelet tour of signal processing: the sparce way. AP Professional, Third Edition, London.

7. J. MAX et J.L. LACOUME, Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques, 5e édition, Masson 1996.

8. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Тенденции развития дискретных косвенных измерений параметров электрических сигналов. *Метрология*. 2017. № 1. С. 20-32.

9. Казанцев Ю. И., Музалевский В. Е., Пругло А. В. Метрологическое обеспечение измерений коэффициента гармоник низкочастотных радиотехнических сигналов. *Измерительная техника*. 2013. № 8. С. 45-49.

10. Лазо Ю. Н., Турыгин В. С. Цифровой способ определения начальной фазы гармонического сигнала при частоте отсчетов меньше частоты Найквиста. *Измерительная техника*. 2019. № 7. С. 64-57.

11. Засыпкин Ю. А., Розина О. Ю. Оценка средней мощности сигнала с флуктуацией фаз составляющих гармонических колебаний при апертурной неопределенности аналого-цифрового преобразователя. *Измерительная техника*. 2018. № 10. С. 50-56.

12. Леньков С. В. Измерение амплитуд гармоник периодического сигнала с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. *Измерительная техника*. 2006. № 2. С. 51-53.

13. Леньков С. В., Молин С. М. Измерение амплитуды, частоты и фазы периодических составляющих коротких реализаций суммарного сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье. *Измерительная техника*. 2009. № 10. С. 23-30.

14. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.

15. Лазарев Ю. Ф. Математическое моделирование физических процессов и технических систем в MATLAB. К.: 2004. 474 с.

## References

1. Boreanaz G., Celiberti L., and Falasca V. (2007, January). In-plant fast diagnostics of vibration-acoustic quality of cars. In SAE 2007 Noise and Vibration Conference and Exhibition (No. 2007-01-2211).

2. Malla C., Panigrahi I. Review of condition monitoring of rolling element bearing using vibration analysis and other techniques. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2019, 7(4), pp. 407-414.

3. Tandon N., Choudhury A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*. 1999, 32(8), pp. 469-480.

4. Aherwar A. An investigation on gearbox fault detection using vibration analysis techniques: A review. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2012, 10(2), pp. 169-183.

5. Amick H., Bui S. K. Review of several methods for processing vibration data. *Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology*. 1992, 1619, pp. 253-264.

6. Mallat S. (2009). A wavelet tour of signal processing: the sparce way. AP Professional, Third Edition, London.

7. Max J. et Lacoume J. L. Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques, 5e édition, Masson 1996.

8. Ponomarev V. A., Ponomareva O. V. Tendencii razvitiya diskretnyx kosvennyx izmerenij parametrov e'lektricheskix signalov. *Metrologiya*. 2017. № 1. S. 20-32.

9. Kazancev Yu. I., Muzalevskij V. E., Pruglo A. V. Metrologicheskoe obespechenie izmerenij koe'fficienta garmonik nizkochastotnyx radiotexnicheskix signalov. *Izmeritel'naya texnika*. 2013. № 8. S. 45-49.

10. Lazo Yu. N., Turygin V. S. Cifrovoj sposob opredeleniya nachal'noj fazy garmonicheskogo signala pri chastote otschetov men'she chastoty Najkvista. *Izmeritel'naya texnika*. 2019. № 7. S. 64-57.

11. Zasypkin Yu. A., Rozina O. Yu. Ocenka srednej moshhnosti signala s fluktuaciej faz sostavlyayushhix garmonicheskix kolebanij pri aperturnoj neopredelennosti analogo-cifrovogo preobrazovatelya. *Izmeritel'naya texnika*. 2018. № 10. S. 50-56.

12. Len'kov S. V. Izmereniye amplitud garmoník periodicheskogo signala s pomoshch'yu algoritma bystrogo preobrazovaniya Fur'ye. *Izmeritel'naya tekhnika.* 2006. № 2. S. 51-53.

13. Len'kov S. V., Molin S. M. Izmereniye amplitudy, chastoty i fazy periodicheskikh sostavlyayushchikh korotkikh realizatsiy summarnogo signala s ispol'zovaniyem bystrogo preobrazovaniya Fur'ye. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2009. № 10. S. 23-30.

14. Chernyx I. V. Modelirovanie e'lektrotexnicheskix ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. M.: DMK Press, 2008. 288 s.

15. Lazarev Yu. F. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskix processov i texnicheskix sistem v MATLAB. K.: 2004. 474 s.

*Надійшла до редакції 12.12.2022*

УДК 519.226.3

**С. С. Гутиря,** д.т.н., **В. П. Яглінський,** д.т.н., **В. В. Вовк**

*Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса*

## ПАРАМЕТРИЧНІ ВІДМОВИ І РАЦІОНАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ НАДІЙНОСТІ ПІДСИСТЕМ ВЕРСТАТА-РОБОТА

*В статті розглянуті питання параметричних відмов механізмів паралельної структури верстатів-роботів. Різноманітність функцій, які виконуються роботами, призвела до створення роботів-верстатів з механізмами паралельної структури. Основою створення лінійки верстатів-роботів з трьома телескопічними штангами є структура трипода з вертикальною стійкою постійної довжини, шарнірно зв'язаною зі станиною і центром рухомої платформи. Центральний пасивний кінематичний ланцюг блокує прокручування рухомої платформи з виконавчим органом навколо власної осі, сприймає робочі навантаження і надає механізму кінематичної визначеності. Для сучасних технічних засобів, які складаються з безлічі взаємодіючих механізмів, апаратів та приладів, відмова у роботі хоча б одного відповідального елемента складної системи без резервування може призвести до порушення роботи всієї системи. За даними експлуатації типових конструкцій верстатів-роботів типу трипод встановлено розподіл відмов елементів і виявлено, що "слабкими елементами" є ущільнення гідроприводу, що спричиняють порушення герметичності. Недостатня надійність обладнання призводить до величезних витрат на ремонт, простою обладнання, невиконання відповідальних завдань, іноді до аварій, пов'язаних з великими економічними втратами, руйнуванням великих об'єктів та людськими жертвами. На етапі промислового виробництва технологічного обладнання надійність верстатів-роботів має першочергове значення. Для оптимізації рівня надійності підсистеми трицепта запропоновано метод раціонального розподілу надійності елементів. Виконано моделювання явищ кінематичного запирання механізму паралельної структури і запропоновано відповідний критерій параметричних відмов. Для верстата-робота з механізмами паралельної структури, що має три паралельних механізмів поступального руху штанг, вирізнено три підсистеми і запопоновано метод раціонального розподілу надійності між такими підсистемами. Опрацьовано алгоритм структурного синтезу надійності механізмів паралельної структури типу трицепт і розроблено практичні рекомендації щодо оптимального розподілу норм надійності між підсистемами верстата-робота ще на етапі проектування.*

***Ключові слова***: *штанги гексапода, промислові платформи, сферичні шарніри, модулі робота.*

**S. S. Hutyria**, DSc, **V. P. Yahlinskyi**, DSc, **V. V. Vovk**

## PARAMETRIC FAILURES AND RATIONAL ALLOCATION RELIABILITY OF ROBOT MACHINE SUBSYSTEMS

*The article deals with the issues of parametric failures of the mechanisms of the parallel structure of robotic machines. The variety of functions performed by robots has led to the creation of machine tools with mechanisms of a parallel structure. The basis for creating a line of robotic machines with three telescopic rods is the structure of a tripod with a vertical stand of constant length, hinged to the bed and the center of the movable platform. The central passive kinematic chain blocks the scrolling of the movable platform with the executive body around its own axis, perceives workloads and gives the mechanism a kinematic certainty. For modern technical means, consisting of many interacting mechanisms, apparatuses and devices, the failure of at least one critical element of a complex system without redundancy can lead to disruption of the entire system. According to the operation of typical designs of tripod-type robots, the distribution of element failures was established and it was found that the "weak elements" are hydraulic drive seals that cause leakage. Insufficient equipment reliability leads to huge repair costs, equipment downtime, failure to perform critical tasks, sometimes to accidents associated with large economic losses, destruction of large facilities and human casualties. At the stage of industrial production of technological equipment, the reliability of robotic machines is of paramount importance. To optimize the level of reliability of the tricep subsystem, a method of rational distribution of the reliability of elements is proposed. The modeling of the phenomena of kinematic locking of the parallel structure mechanism is carried out and the corresponding criterion of par-*

*ametric failures is proposed. For a robot-machine with mechanisms of a parallel structure, which has three parallel mechanisms for the translational movement of rods, three subsystems are identified and a method for rational distribution of reliability between such subsystems is proposed. An algorithm for the structural synthesis of the reliability of mechanisms of a parallel structure of the tricep type has been developed and practical recommendations have been developed for the optimal distribution of reliability standards between the subsystems of a robot-machine at the design stage.*

***Keywords:*** *hexapod rods, industrial platforms, spherical joints, work modules.*

DOI 10.32684/2412-5288-2022-2-21-34-41

**Вступ**. Першорядне значення надійності в техніці пов'язане з тим, що рівень надійності значною мірою визначає розвиток техніки за основними напрямками: автоматизації виробництва, інтенсифікації робочих процесів та транспорту, економії матеріалів та енергії [1]. Проблема прогнозування нормування і забезпечення надійності машин та систем машин завжди є актуальним і пріоритетним напрямом наукових досліджень не тільки в машинобудуванні а й в енергетиці, будівництві, на транспорті.

**Постановка проблеми в загальному виді.** Загальне підвищення робочих параметрів (питомої потужності, швидкостей, вантажопідйомності і т.ін) машин та їх систем приводить до підвищення теплових, електромагнітних і механічних навантажень на основні несучих елементи, що потребує комплексного дослідження надійності. Сучасні технічні засоби складаються з безлічі взаємодіючих механізмів, апаратів та приладів. Відмова у роботі хоча б одного відповідального елемента складної системи без резервування може призвести до порушення роботи всієї системи. Недостатня надійність обладнання призводить до величезних витрат на ремонт, простою обладнання, невиконання відповідальних завдань, іноді до аварій, пов'язаних з великими економічними втратами, руйнуванням великих об'єктів та людськими жертвами. На етапі промислового виробництва технологічного обладнання надійність роботів-верстатів має першочергове значення [2].

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.**

Сучасні машини і системи машин містять велику кількість немеханічних (електричних, електронних, інформаційних і т. ін.) елементів і з'єднань. Тому дослідження надійності потребує використання фізичних і системних моделей в комплексі Показники надійності механічних елементів і механічних систем оцінюють на основі фізичних моделей, а для оцінки показників надійності машин в цілому чи надійності систем машин використовують моделі системної теорії надійності.

Математичні моделі теорії надійності розподіляють на наступні дві великі групи.

Перша група математичних моделей теорії надійності враховує механічні, фізичні і інші реальні процеси, які призводять до зміни властивостей об'єкту і його складових. Такі моделі будівельної механіки, які широко використовують в розрахунках машин і конструкцій. Як відомо, силові і кінематичні взаємодії елементів машин і конструкцій інколи мають складний характер. Поведінка цих об'єктів суттєвим чином залежить від їх взаємодії з навколишнім середовищем, від характеру і інтенсивності процесів експлуатації. Для передбачення поведінки деталей машин і елементів потрібно розглядати процеси деформування, зносу, накопичення пошкоджень і руйнувань при змінних навантаженнях, температурних і інших зовнішніх взаємодій. Для цієї групи моделей основний шлях для оцінки показників надійності механічних систем є розрахунково-теоретичний, заснований на фізичних моделях і статистичних даних відносно властивостей матеріалів, навантажень і взаємодій [3, 4].

Друга група математичних моделей теорії надійності являє собою структурні моделі, які засновані на логічних схемах взаємодії елементів, що входять в систему, з точки зору збереження працездатності системи в цілому. Для цього використовують статистичну інформацію про надійність складових елементів без залучення відомостей про фізичні властивості матеріалів, деталей, з'єднань та зовнішніх навантажень і механічних взаємодіях між елементами. Структурні моделі зображують у вигляді блок-схем і графів (наприклад, дерев подій), а вхідну інформацію задають у вигляді відомих значень ймовірностей безвідмовної роботи елементів, інтенсивностей відмов і т. ін.

Системна теорія надійності отримала широке використання завдяки тому, що більшість технічних об'єктів складаються із елементів масового виробництва і працюють в порівняно однорідних умовах. Випробування таких елементів на надійність відносно прості, а умови експлуатації допускають їх відтворення в лабораторних умовах [5].

Надійність верстатів-роботів досягається наступними шляхами:

– різноманіттям конструкцій роботів-верстатів з механізмами паралельної структури, найкраще пристосованих до виконання різного роду технологічних операцій в потрібних умовах;
– надійністю функціонування кожного окремо взятого робота-верстата;
– надійністю функціонування гнучких автоматизованих виробництв, ліній, робототехнічних комплексів.

Прогнозування надійності верстатів-роботів потребує максимального приближення їх розрахункових схем до реальних об’єктів і умов їх експлуатації [6]. Однак, раціональному розподілу показників надійності між елементами такої складової механічної системи, яку представляють роботи-верстати, приділяється не достатня увага.

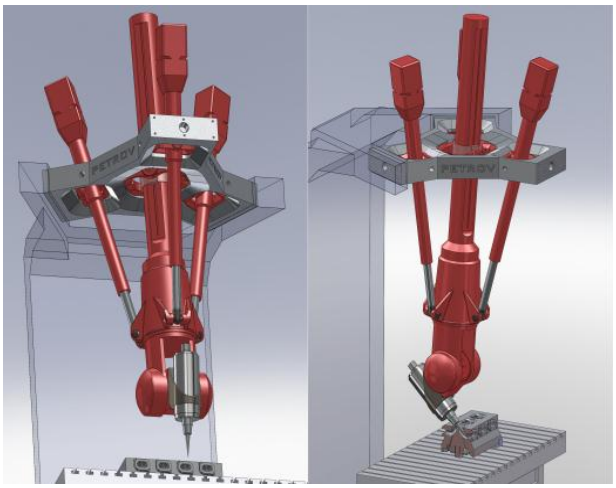
**Метою статті** є моделювання явищ кінематичного запирання механізму паралельної структури верстата-робота і опрацювання методу раціонального розподілу надійності вирізнених підсистем верстата-робота між запропонованими підсистемами, тобто розв’язання задачі синтезу необхідної заданої надійності верстата-робота.

**Викладення основного матеріалу**.

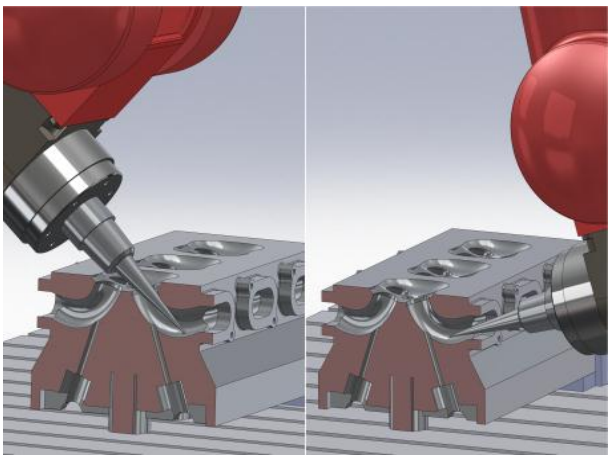
Зростання вимог споживачів щодо поліпшення техніко-економічних показників машин та механізмів потребує зменшення їх габаритів, маси та енергоємності при одночасному збільшенні маневреності та швидкодії, що призводять до збільшення динамічних навантажень на всі ланки, різкого зростання амплітуди вимушених коливань, погіршення точності позиціювання, а значить і до зменшення надійності [8].

Основою створення лінійки верстатів-роботів з трьома телескопічними штангами можна вважати запатентовану в Німеччині структуру трипода [9] з вертикальною стійкою постійної довжини шарнірно зв’язаною зі станиною і центром рухомої платформи, що уявляє собою пасивний кінематичний ланцюг, який блокує прокручування рухомої платформи з виконавчим органом навколо власної осі, сприймає робочі навантаження і надає механізму кінематичної визначеності (рис. 1).

Дану ідею реалізовано на практиці фірмою *Neos Robotics* (Швеція) у конструкції 5-ти координатного свердлувально-фрезерного верстата мод. *TRICEPT* 600, який має ефективне застосування у моторобудуванні, авіакосмічній промисловості, для обробки турбінних лопаток, компресорних дисків, складних інструментів, прес-форм та штампів. Перші моделі багатоцільового верстата серії *TRICEPT* мали вертикальну компоновку, що надавало конструкції більшої жорсткості, але значно ускладнювало доступ до заготовок.



а)



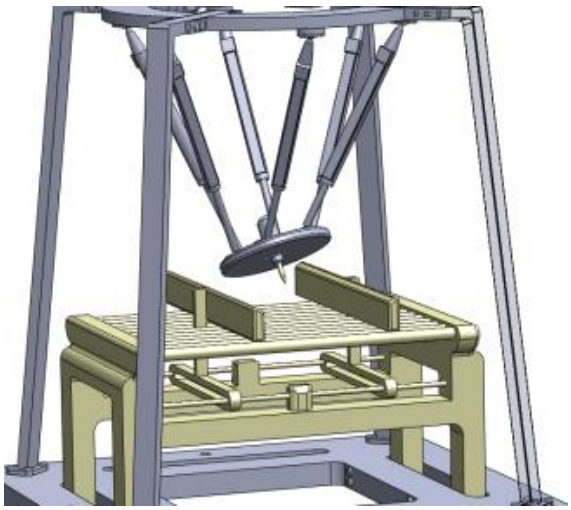
б)

Рисунок 1 – Твердотільна модель верстата-робота типу трицепт (а) і позиціювання ріжучої кромки інструмента (б)

Сучасна конструкція високошвидкісного верстата мод. *TRICEPT* складається з трьох штанг змінної довжини, з'єднаними з шестикутною рамою за допомогою карданних підвісів. На нижніх кінцях штанг розташовані сферичні шарніри, з’єднані з робочою платформою. Платформа може рухатись відносно п’яти осей координат (3 осі від триподу та 2 осі за рахунок вбудови додаткових осей обертання). Для сприйняття крутних моментів від навантажень у середині трипода розміщено масивну центральну стійку постійної довжини. Жорстка трикутна конструкція несучої системи верстата дозволила виконувати на нерухомому круглому столі діаметром 2400 мм операції фрезерування та розточування складних поверхонь (рис. 2). Робоча зона верстата типу *TRICEPT* складає 800x800x400 мм. Це є значною перевагою верстатів на основі триподів у порів-

нянні з верстатами на основі гексаподів, на яких заготовки можна оброблювати тільки з однієї сторони під кутом ± 30° або ± 45° [10].

Різноманітність функцій, які виконуються роботами, призвела до створення роботів-верстатів з механізмами паралельної структури (рис. 2).



а)

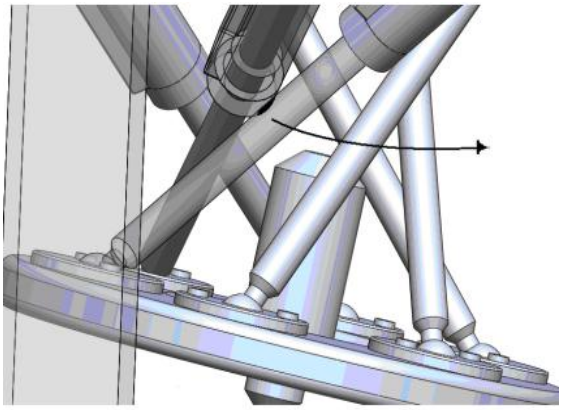


б)

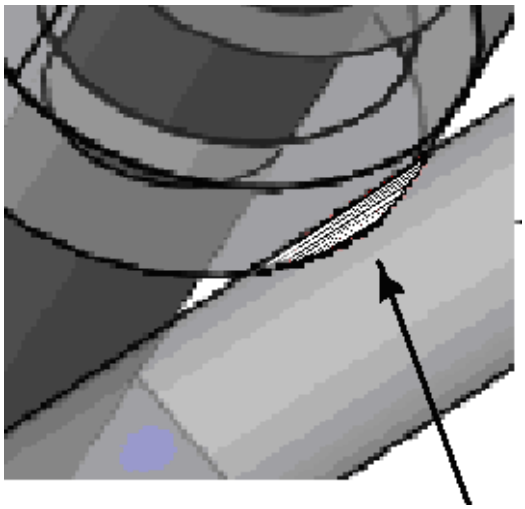
Рисунок 2 – Конфігурації верстата-гексапода: а) просторова конфігурація; б) поворот платформи навколо горизонтальної осі до моменту геометричного запирання

Відмови механізмів у складі роботів-верстатів у відповідності зі своєю фізичною природою можуть бути пов'язані з руйнуванням вузлів і деталей механізмів та їх приводів, заклинюванням окремих елементів та інших причин, які призводять до того, що технологічне обладнання не може виконувати своїх функцій. Такі відмови прийнято називати відмовами функціонування (рис. 3).

Випадки порушення точності обробки на верстаті-роботі чи зменшення тиску в гідроприводах роботів-верстатів тощо звичайно не порушують подальше функціонування обладнання, однак воно стає нероботоздатним з погляду вимог, установлених нормативно-технічною документацією. Дуже часто параметричні відмови передують відмовам функціонування, а також можуть їх спричиняти.



а)



б)

Рисунок 3 – Моделювання явищ кінематичного запирання штанг механізму (*а*) і фрагмент контакту штанг (б)

Для дослідження геометро-кінематичного запирання, яке характеризується контактом поверхонь сусідніх штанг (рис. 2), виконане моделювання формоутворюючих траєкторій засобами програмного комплекса *Solidworks* [2].

Під час контакту двох розташованих у просторі циліндрів точка контакту ділить найкоротшу відстань між осями циліндрів навпіл. Прийнявши

радіуси циліндрів штанг однаковими і рівними $r_z$, визначено умови запирання у вигляді

$$\left.\begin{aligned} &R_d - 2r_z = \\ &= \sqrt{\left(x_{d.i} - x_{d,i+1}\right)^2 + \left(y_{d.i} - y_{d,i+1}\right)^2 + \left(z_{d.i} - z_{d,i+1}\right)^2} - \\ &- 2r_z < \Delta_d, \quad i = 1....,5 \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

де $x_{d,i}$, $y_{d,i}$, $z_{d,i}$ і $x_{d,i+1}$, $y_{d,+1i}$, $z_{d,i+1}$ – координати точок осей сусідніх циліндрів відповідно штанги $i$ та $i$+1;

$\Delta_d$ – допустимий мінімальний зазор, що забезпечує відсутність контакту штанг.

Для прогнозування параметричної надійності за умовою запирання механізмів паралельної структури введено критерій геометро-кінематичного запирання у вигляді

$$k_{kz} = \frac{\Delta_d}{R_d - 2r_z}. \quad (2)$$

При припустимому зазорі рівному радіусу $r_z$ циліндрів ланцюгів МПС отримано наступну умову відсутності запирання $R_d > 3r_z$. Координати точок осей циліндрів визначені з використанням відповідних пропорцій в залежності від координат центрів рухомих і нерухомих шарнірів. З метою скорочення обчислювального процесу для пошуку точок дотику використаний метод перерізів площинами, перпендикулярними осі $OZ$ [11, 2].

Шпиндель потужністю 30 кВт (з можливістю короткочасного перевантаження до 80 кВт), виконаний з водяним охолодженням, обертається у гібридних кулькових підшипниках з частотою обертання до 30000 об/хв. Інструменти з конусом H8K63 надходять у шпиндель з 12-ти позиційного дискового інструментального магазину за допомогою маніпулятора. При швидкостях переміщень виконавчого органу відносно осей координат до 90 м/хв пришвидшення досягають значень 20 м/с$^2$.

Ймовірності безвідмовної роботи верхнього і нижнього шарнірів трицепта відповідно прийняті 0,991 і 0,98. Ймовірність безвідмовної роботи двох не дубльованих сферичних шарнірів визначиться добутком

$$P_a(t) = \prod_{i=1}^{2} P_i(t) = 0{,}991 \cdot 0{,}98 = 0{,}971. \quad (3)$$

За даними експлуатації типових конструкцій гідроприводу розподіл відмов його елементів (доля відмов у відсотках) є наступним: порушення герметичності – 45 %, руйнування силових елементів – 15 %, порушення динамічної стійкості – 10 %, невідповідність встановлених рівнів параметрів – 15 %, інші – 15 % [2]. Таким чином, "слабкими елементами" (СЕ) є ущільнення, що спричиняють порушення герметичності гідроприводу. У першому наближенні можна прийняти відповідну ймовірність безвідмовної роботи контактного ущільнення $P_Y$ = 0,94, або імовірність відмови $Q_Y = 0{,}06$. На практиці такі ущільнення мають два або більше пружних елемента, що відповідає системі з постійно навантаженим резервуванням. Ймовірність безвідмовної роботи двох ущільнень гідроциліндра з трьома однаковими елементами кожне, що відповідає схемі з подвійним резервуванням (рис. 4), визначаються так:

$$P_b(t) = \prod_{i=1}^{2}\left[1 - Q_i^3(t)\right] = \prod_{i=1}^{2}\left[1 - 0{,}06^3\right] = 0{,}99978. \quad (4)$$

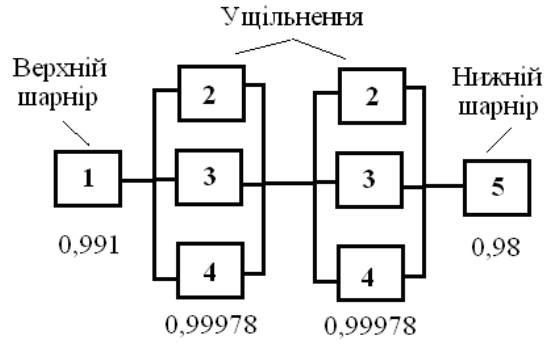



Рисунок 4 – Структурна схема надійності однієї із трьох підсистем (штанг) механізму паралельної структури верстата-трицепт:
1 – верхній шарнір; 2 – основний елемент ущільнень; 3, 4 – резервні елементи ущільнень; 5 – нижній шарнір

Тоді ймовірність безвідмовної роботи кожної з трьох однакових кінематичних послідовностей (штанг) механізму (з гідроприводом) паралельної структури верстата-трицепт дорівнює

$$P_{\text{Т}}(t) = P_a(t) \cdot P_b(t) = 0{,}971 \cdot 0{,}99978 = 0{,}97. \quad (5)$$

Таким чином, структурна надійність усіх трьох ланцюгів механізмів паралельної структури трицепт як послідовної системи надійності, що складається з підсистем-штанг, визначається добутком

$$P_{\text{М}} = 0{,}97^3 = 0{,}91.$$

Структурна схема надійності механізму верстата-трицепт має вид, рис. 5.

Подальше підвищення надійності механізму верстата-трицепт можливе за умови раціональ-

ного розподілу значень показників надійності підсистем та їх елементів за умови подвійного резервування "слабкого елементу" – ущільнень гідроприводу.

За припущенням, що елементи системи виходять з ладу незалежно один від одного, і відмова кожного елемента призводить до відмови усієї системи, виконується нерівність

$$P_1(t)\cdot P_2(t)\cdots P_n(t)\geq P^{\text{ТР}}, \qquad (6)$$

де $P^{\text{ТР}}$ – задана при проектуванні надійність всієї системи верстата.

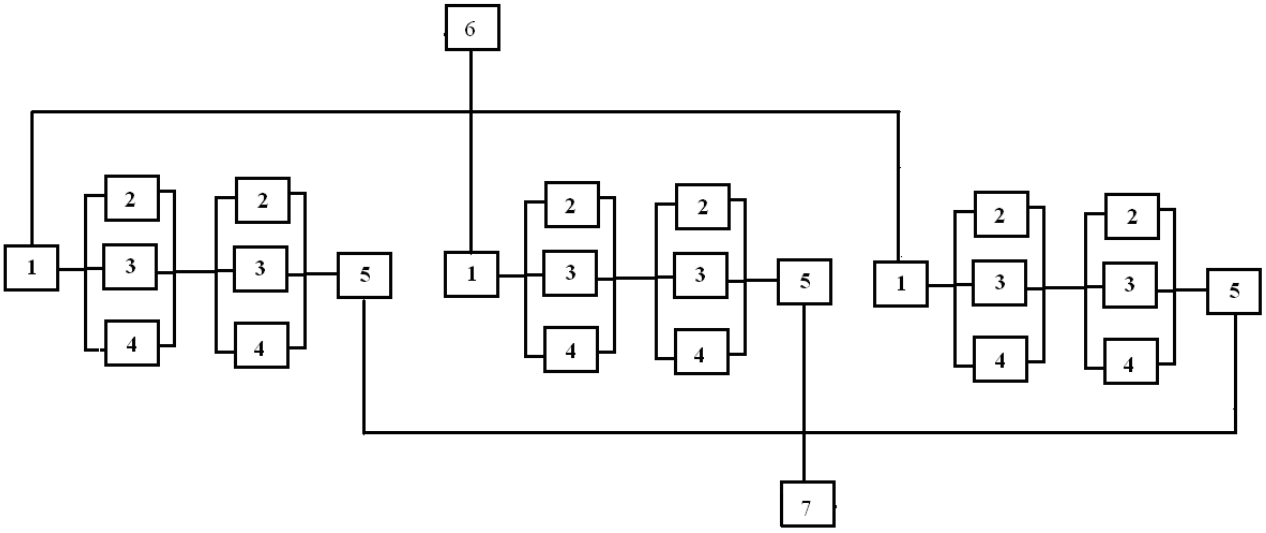



Рис. 5. Структурна схема надійності механізму верстата-трицепт:
6 – підсистема центральної стійки; 7 – підсистема шпинделя

Для оптимізації рівня надійності підсистеми гідроприводу трицепта використано метод раціонального розподілу надійності елементів [2]. Так, для системи, що має *n* елементів надійності, розташуємо показники надійності у порядку зростання

$$P_1 \leq P_2 \leq \cdots \leq P_n.$$

Кожен із показників $P_1, P_2, \cdots, P_k$ збільшують до одного і того ж значення $P_0^{\text{ТР}}$, а починаючи з $P_{k+1},,\cdots,P_n$ – не змінюють. Номер *k* вибирають за максимальним значенням *j*, для якого виконуються умови

$$P_j \leq \left(\frac{P^{\text{ТР}}}{\prod_{j=1}^{n+1} P_j}\right)^{\frac{1}{j}} = r_j, \quad P_0^{\text{ТР}} \leq \left(\frac{P^{\text{ТР}}}{\prod_{j=1}^{n+1} P_j}\right)^{\frac{1}{k}}, \qquad (7)$$

де $P_{n+1}=1$ приймається за визначенням.

Очевидно, що надійність системи після знаходження $P_0^{\text{ТР}}$ задовольняє умовам (7), оскільки нове значення показника $P^{\text{ТР}}$ дорівнює

$$\left(P_0^{\text{ТР}}\right)^k \cdot P_{k+1}\cdot \ldots \cdot P_n = P^{\text{ТР}}. \qquad (8)$$

Для трицепта, що має три паралельних механізму поступального руху штанг, вирізнено три підсистеми (1 – центральна напрямна штанга, 2 – штанги з сферичними шарнірами і гідроприводом, 3 – вузол шпинделя) і визначено необхідність дотримання умови

$$P_C \cdot P_{\Gamma}^3 \cdot P_N \geq P^{\text{ТР}}, \qquad (9)$$

де $P_C$ – показник надійності центральної напрямної штанги з шарнірами; $P_{\Gamma}$ – показник надійності кожного з трьох незалежних модулів підсистеми штанг з шарнірами і гідроприводом; $P_N$ – показник надійності електромеханічного приводу підсистеми вузла шпинделя.

Виходячи із статистичних значень:

$$P_C = 0{,}98;\ P_{\Gamma} = 0{,}97;\ P_N = 0{,}95,$$

отримано

$$P = P_C \cdot P_{\Gamma}^3 \cdot P_N = 0{,}98 \cdot 0{,}97^3 \cdot 0{,}95 = 0{,}84. \qquad (10)$$

З метою визначення найбільш ефективних напрямів підвищення проектного значення показника надійності верстата-трицепта до рівня $P^{\text{ТР}}=0{,}89$ визначено раціональний розподіл значень показників надійності підсистем. Спочатку припущено, що $k=1$, тоді за формулою (7) отри-

мано

$$P_0^{\text{ТР}} = \left( \frac{P^{\text{ТР}}}{\prod_{j=1}^{n+1} P_j} \right)^{\frac{1}{k}} = \left( \frac{0{,}89}{0{,}91 \cdot 0{,}95 \cdot 1{,}0} \right)^{\frac{1}{1}} = 0{,}988 . \quad (11)$$

В результаті отримано

$$P = P_C \cdot P_{\Gamma}^3 \cdot P_N = 0{,}98 \cdot 0{,}988^3 \cdot 0{,}95 = 0{,}89 . \quad (12)$$

Але такий розподіл показників надійності підсистем не є раціональним, оскільки для підсистеми 2, що складається з трьох незалежних модулів поступального руху, уявляється практично неможливим і економічно недоцільним подальше підвищення показника з

$$P_{\text{г}} = 0{,}97$$

до

$$P_{\Gamma} = \sqrt[3]{0{,}988} = 0{,}998 . \quad (13)$$

Із формули (7) визначено раціональний розподіл показників надійності для підсистем

$$\left.\begin{aligned} r_1 &= \left( \frac{0{,}89}{0{,}91 \cdot 0{,}95 \cdot 1{,}0} \right)^{\frac{1}{1}} = 0{,}988, \\ r_2 &= \left( \frac{0{,}89}{0{,}95 \cdot 1{,}0} \right)^{\frac{1}{2}} = 0{,}99, \\ r_3 &= \left( \frac{0{,}89}{1{,}0} \right)^{\frac{1}{3}} = 0{,}96 \end{aligned}\right\} . \quad (14)$$

В результаті отримано

$$P_1 < r_1,\ P_2 < r_2,\ P_3 < r_3 .$$

У цьому разі за умови

$$P < r$$

найбільше значення $j$ дорівнює $j = 2$, отже прийнято $k = 2$ і визначено

$$P_0^{\text{ТР}} = \left( \frac{0{,}86}{0{,}95 \cdot 1{,}0} \right)^{\frac{1}{2}} = 0{,}99 . \quad (15)$$

Це означає, що показники надійності для підсистем 1 і 2 необхідно підвищити відповідно з 0,98 до 0,99 і з 0,92 до 0,96. Для підсистеми 3 показник надійності можна залишити на попередньому рівні. В результаті раціонального розподілу показників надійності для трьох підсистем трицепта отримано

$$P_1 = P_C = 0{,}99;\ P_2 = 0{,}96;\ P_3 = 0{,}95 . \quad (16)$$

Для системи верстата-трицепта в цілому

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = 0{,}99 \cdot 0{,}96 \cdot 0{,}95 = 0{,}89 , \quad (17)$$

тобто витримано проектні вимоги щодо надійності механізму верстата-робота типу трицепт.

Результати роботи можуть бути корисними при розроблені практичних рекомендацій щодо оптимального розподілу норм надійності між підсистемами роботів-верстатів ще на етапі проектування.

**Висновки**

1. Виконано моделювання параметричної відмови і запропоновано критерій геометричного запирання механізму паралельної структури.

2. Опрацьовано алгоритм структурного синтезу надійності механізмів паралельної структури типу трицепт.

3. Розроблено практичні рекомендації, щодо оптимального розподілу норм надійності між підсистемами робота типу трицепт на етапі проектування.

**Список використаних джерел**

1. Polishchuk M., Yahlinskyi V. Mobile Technology for Pipeline Maintenance: Design and Simulation. *FME Transactions*. Volume 50, No. 2, 2022, pp. 360-368. DOI: 10.5937/fme2201360P.

2. Яглинский В. П., Гутиря С. С. Теория и практика моделирования технического уровня технологических машин / Коллективная монография. Моделирование технологических процессов механической обработки и сборки. Москва: Издат. дом «Спектр», 2014. С. 224-272.

3. Chiodo E., Lauria D. Stochastic index definition and estimation for reliability and quality assessment of transportation systems. Systems for Aircraft Railway and Ship Propulsion (ESARS) 2012, pp. 1-5.

4. Яглінський В. П., Гутиря С. С., Аймен Обайді, Параметрична надійність механізмів паралельної структури і кінематики типу гексапод. Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій, 3-я міжн. наук. техн. конф., м. Львів. 2012. С. 111-112.

5. C. Hutyria, V Yahlinskyi, A Chanchin, Y Khomiak, V Popov. Evolution of trolleybus: directions, indicators, trends. *Diagnostika*. 2020.Vol. 21. No. 1. P. 11-26. DOI: https://doi.org/10.29354/diag/116080.

6. Козерацький Г. В., Яглінський В. П., Хихловський А. Б., Озернюк О. Т. Кваліметрична

модель технічного рівня тренажера-гексапода. *Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. пр. Машинознавство та САПР*. Харків, 2018. № 25 (1301). С. 68-74.

7. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV. Надежность машин / Редкол. В. В. Клюев и др. М.: Машиностроение, 2003. 592 с.

8. Coupe Charlottea, Le Maitre Hélène. Empirical illustration of issues in valuing reliability benefits of transport projects. *Transportation Research Procedia* 26 (2017). P. 166-176. *French, Ministry of Environment, Energy and the Sea.*

9. Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat'17, 18-21 October, 2017, Riga, Latvia: Selected Papers from the 17th International Conference / Editors: Igor Kabashkin, Irina Yatskiv, Olegas Prentkovskis. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-74454-4#toc.

10. Gutyrya S., Yaglinsky V., Chanchin A. Parametrical Fluctuations of Epicycle in Wheel Gearboxes. *British Journal of Applied Science & Technology*. 2016. 13(2). P. 1-8.

11. Oborskyj G. O., Hutyria S. S., Yaglinskij V. P., Chanchin A. M. Technical evolution and reliability of trolleybus's traction transmission. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Engineering and CAD : зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ"*. 2018. № 25 (1301). С. 117-126.

**References**

1. Polishchuk M., Yahlinskyi V. Mobile Technology for Pipeline Maintenance: Design and Simulation. *FME Transactions*. Volume 50, No 2, 2022, pp. 360-368. DOI: 10.5937/fme2201360P.

2. Yaglinskyj V. P., Gutyrya S. S. Teoriya i praktyka modelirovaniya technicheskogo urovniya texnologicheskix mashin / Kollektivnaya monografiya. Modelirovanie texnologicheskix proczesov mechanicheskoj obrabotky i sborky. Moskva: Izdat. dom "Spektr", 2014. S. 224-272.

3. Chiodo E., Lauria D. Stochastic index definition and estimation for reliability and quality assessment of transportation systems. *Systems for Aircraft Railway and Ship Propulsion (ESARS) 2012*, pp. 1-5.

4. Yaglinskyj V. P., Gutyrya S. S., Aimen Obaidi. Parametrychna nadijnist mexanizmiv paralelnoi struktury I kinematyky typu geksapod. Teoriya ta praktyka raczionalnogo proektuvaniya, vygotovleniya i ekspluatacziyi mashynobudivnyx konstrukczij, 3-ya mizhnar. nauk. texn. konf, m. Lviv. 2012. S. 111-112.

5. Hutyria C., Yahlinskyj V., Chanchin A., Khomiak Y., Popov V. Evolution of trolley-bus: directions, indicators, trends. *Diagnostika*. 2020, Vol. 21, No. 1. P. 11-26. DOI: https://doi.org/10.29354/diag/116080.

6. Kozeraczkyj G. V., Yahlinskyj V. P., Xixlovskyj A. B., Ozerniuk O. T. Kvalimetrychna model texnichnogo rivniya trenazhera-heksapoda. *Visnyk NTU «XPI». Czb. nauk. pr. Mashynoznavsyvo ta SAPR*. Xarkiv, 2018. № 25 (1301). S. 68-74.

7. Mashinostroenie. Encziklopediya. T. IV. Nadezhnost mashin / Redkol. V. V. Kluev i dr. M.: Mashinostroenie, 2003. 592 s.

8. Coupe Charlottea, Le Maitre Hélène. Empirical illustration of issues in valuing reliability benefits of transport projects. *Transportation Research Procedia* 26 (2017). P. 166-176. *French, Ministry of Environment, Energy and the Sea.*

9. Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat'17, 18-21 October, 2017, Riga, Latvia: Selected Papers from the 17th International Conference / Editors: Igor Kabashkin, Irina Yatskiv, Olegas Prentkovskis. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-74454-4#toc.

10. Gutyrya S., Yaglinsky V., Chanchin A. Parametrical Fluctuations of Epicycle in Wheel Gearboxes. *British Journal of Applied Science & Technology*. 2016. 13(2). P. 1-8.

11. Oborskyj G. O., Hutyria S. S., Yaglinskij V. P., Chanchin A. M. Technical evolution and reliability of trolleybus's traction transmission. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Engineering and CAD : zb. nauk. pr. Xarkiv: NTU "XPI"*. 2018. № 25 (1301). S. 117-126.

*Надійшла до редакції 11.11.2022*

УДК 656.02

**Т. М. Меленчук**[1], д.т.н., **Н. М. Арцибашева**[1], к.т.н., **Д. О. Пуріч**[1], к.т.н., **О. В. Ковра**[1], **В. М. Меленчук**[2], к.т.н.

[1]*Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса*
[2]*Військова академія (м. Одеса), м. Одеса*

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В ОДЕСЬКОМУ РЕГІОНІ

*Географічне положення в центрі Європи та вихід до Чорного моря дає можливість Одеському регіону створити транспортну систему з високим показником інтенсивності перевезень вантажів із портів, зокрема автомобільними та іншими магістралями України. Метою цієї роботи є вивчення шляхів підвищення ефективності логістичних процесів вантажних перевезень в Одеському регіоні. Для більш повного уявлення роботи автомобільного транспорту Одеської області та оцінці його функціонування розширено динамічний ряд транспортних перевезень. Наведені показники перевезення вантажів в Одеській області за останні 18 років свідчать про стабільну динаміку до збільшення як взагалі вантажних перевезень, так і автомобільним транспортом. Аналіз, наведений в роботі, показав, що підприємства транспортної системи Одеського регіону за період дослідження мають позитивну динаміку розвитку. Маючи важливі транспортні магістралі та всі види транспорту на своїй території, Одеський регіон можна розглядати як опорний багатофункціональний транспортний комплекс, у якому поєднуються транспортні, торгові, фінансові та інформаційні потоки. Такий підхід дозволить удосконалювати та підвищувати ефективність транспортної системи Одеського регіону, а відтак і всього транспортного комплексу України.*

***Ключеві слова:*** *автомобільний транспорт, вантажі, транспортна система, ефективність, логістика, диджиталізація.*

**T. M. Melenchuk,** DSc, **N. M. Artsybasheva,** PhD, **D. O. Purich,** PhD, **O. V. Kovra,**
**V. M. Melenchuk,** PhD

## INCREASING THE EFFICIENCY OF LOGISTICS PROCESSES OF TRUCK TRANSPORTATION IN THE ODESSA REGION

*An extensive network of all types of transport operates in Odesa and the Odesa region. All of them are closely related and mutually complement each other. The geographical position in the center of Europe and access to the Black Sea gives the Odesa region the opportunity to create a transport system with a high indicator of the intensity of cargo transportation from ports, in particular by road and other highways of Ukraine. Therefore, the issue of improving the efficiency of logistics processes of freight transportation in the Odesa region is urgent. Since these processes should be considered against the background of logistics relations between Ukraine and the EU countries, in order to achieve the indicated goal, the identification of a quantitative and qualitative assessment of the modern state of the logistics system and the determination of the main directions for optimizing the logistics service of goods flows between Ukraine and the EU countries, using the example of the Odesa region, are important tasks. The object of the study was chosen specifically for road transport, we will give the factors that reveal the advantages of its use. The given indicators of cargo transportation in the Odesa region over the past 18 years indicate a stable trend towards an increase in both cargo transportation in general and by road transport. The analysis given in the work showed that the enterprises of the transport system of the Odesa region during the research period have a positive dynamic of development. Along with this, there are problems related to the chain: "supply - production - distribution - consumption" in the development of the transport industry. Having important transport highways and all types of transport on its territory, the Odesa region can be considered as a main multifunctional transport complex, which combines transport, trade, financial and information flows. All this is accompanied by cargo processing, interaction of various types of transport. This approach will allow improving and increasing the efficiency of the transport system of the Odesa region, and therefore the entire transport complex of Ukraine.*

***Keywords****: road transport, cargo, transport system, efficiency, logistics, digitalization.*

DOI 10.32684/2412-5288-2022-2-21-42-49

**Вступ.** Аналіз показників стану та динаміки розвитку та інноваційної діяльності в Україні свідчить про те, що ситуація, що склалася у цій сфері, є незадовільною та потребує вдосконалення транспортної системи. Геополітичне та геоекономічне становище України дозволяє реалізувати величезний логістичний потенціал, який може вивести її в коло найлогістичних країн світу. За останні десять років транзит став найважливішою складовою експорту послуг.

Експорт транспортних послуг – реальний ресурс, який має Україна задля досягнення економічного зростання країни. Тому розвиток транспортної інфраструктури є не галузевим, а національним пріоритетом.

В Одесі та Одеській області функціонує розгалужена мережа всіх видів транспорту: залізничний, автомобільний (наземні), морський, річковий, озерний (водні), повітряний, трубопровідний. Усі вони тісно пов'язані між собою і взаємно доповнюють один одного. Географічне положення в центрі Європи та вихід до Чорного моря дає можливість Одеському регіону створити транспортну систему з високим показником інтенсивності перевезень вантажів із портів, зокрема автомобільними та іншими магістралями України.

Тому питання підвищення ефективності логістичних процесів вантажних перевезень в Одеському регіоні є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Проблемами транспорту та транспортної логістики займається досить велика кількість зарубіжних та вітчизняних вчених. Серед них можна відзначити Д. Дж. Бауерсокса [2], М. Р. Ліндерса [3], Л. А. Гончар [4], які розглядали стратегію підвищення ефективності комерційної логістики. М. Поповенко, Л. Івахнюк досліджували проблему оптимізації транспортної логістики [5]. Ряд вчених займаються вивченням оцінки логістики, зокрема з урахуванням індексу ефективності логістики (LPI) [6]. Цьому індексу присвячено роботи Ю. О. Крюкової [7], І. Марчук [8]. У 2010 р. дослідницький інститут «Transport Intelligence» (Великобританія) розробив індекс розвитку ринку логістики в країнах з економікою, що розвивається (Emerging Market Logistics Index – EMLI), що відображає ступінь привабливості ринку логістики для іноземних інвестицій [9].

Ряд робіт присвячений пошуку шляхів удосконалення транспортного комплексу України на основі використання принципів логістики та націлений на забезпечення мінімальних витрат часу обслуговування та збільшення пропускної спроможності національних транспортних систем.

Українські транспортні компанії на сьогоднішній день все швидше запроваджують діджиталізацію [11], оцифровуючи максимальну кількість виробничих процесів.

Діджиталізація – це процес впровадження технологій та сучасних інструментів, що дозволяють зробити процеси всередині компанії швидкими, точними та автоматизованими. Це не лише розробка IT-продуктів. Діджиталізація передбачає комплексне впровадження інструментів, які покращують роботу компанії. У разі сфери логістики, це можуть бути датчики, що контролюють маршрут вантажоперевезення, системи роботи зі складом, введення штрих-кодів та інші технології.

Прикладом застосування цього підходу може бути перехід на автоматичні системи управління, розробка нових онлайн-сервісів тощо. Як повідомляють експерти [12], активний розвиток цього напряму відбуватиметься найближчі кілька років. В Україні не лише логістичні фірми, а й державні органи переходять на цифрові технології, що підтверджує серйозність описаної тенденції.

Сучасний період характеризується нестабільністю економічних та соціально-політичних умов, внаслідок чого зменшуються обсяги виробництва на національному рівні, порушуються транспортні зв'язки, що викликало низький рівень платіжної здатності населення, кошти з транспортної сфери не надходять до держбюджету, а це мільйони гривень, криза вимагає спочатку аналізу проблематики, а потім реформування як на рівні державного управління, так і регіональних рівнях. Цей процес неможливий без аналітики та визначення ролі кожного регіону в економіці держави, дослідження основних напрямків його функціонування в кожній окремій сфері [13].

Економічним проблемам розвитку транспортної галузі країни свої дослідження присвятили такі вчені як М. І. Міщенко, О. В. Бойко, Д. О. Власенко, Б. В. Попович, К. О. Горова, Є. А. Жуков, В. Г. Шинкаренко та ін. Але, на наш погляд, незважаючи на визнання транспорту пріоритетною сферою діяльності, яка повинна постійно розвиватися на інноваційній основі,

щоб відповідати міжнародним стандартам на відповідному рівні, існує ряд проблем, які гальмують розвиток транспорту та процес євроінтеграції.

Проблеми розвитку та дослідження діяльності окремих регіонів України досить часто розглядаються в наукових працях вітчизняних фахівців. М. В. Макаренко [14], В. Ю. Школа, С. В. Степаненко [15] досліджували проблеми економічного потенціалу регіонів.

Не мають достатнього висвітлення питання, що пов'язані з сучасним станом, проблемами та подальшим розвитком Одеського регіону, визначенням його ролі в економіці України.

Процеси, що супроводжують розвиток транспортної системи нашої країни, треба розглядати на тлі логістичних відносин між Україною та країнами ЄС.

Необхідно відмітити, що Україна – держава з високим транзитним потенціалом, однак для його реалізації треба вдосконалювати транспортну систему держави, вирішити інфраструктурні питання та переглянути сучасне використання міжнародних транспортних коридорів. Оптимізація транспортної мережі інфраструктури дозволила б Україні мати розвинену структуру транспортної системи, та зайняти лідируючі позиції на ринку надання транспортних послуг. В рамках цієї позиції Одеський регіон є важливим логістичним центром.

Міністерство інфраструктури підготувало проект Національної транспортної стратегії до 2030 року. За своїм потенціалом Україна має стати потужним транзитером між ЄС та Азією. При цьому у 2017 році розроблено Нормативний акт, який встановив низку складних завдань: імплементація директив ЄС у рамках Угоди про асоціацію, впровадження принципів корпоративного управління та прозорості прийняття рішень, розвиток конкуренції та лібералізація ринків, забезпечення належного фінансування модернізації транспортної інфраструктури, мінімізація впливу на довкілля, запровадження нових стандартів безпеки руху, підвищення рівня транспортного обслуговування.

На основі цього акта національна транспортна стратегія визначає такі цілі:

1. Впровадження ефективнішого управління в транспортній галузі на державному рівні;

2. Надання якісних транспортних послуг і інтеграція транспортного комплексу України в міжнародну транспортну мережу;

3. Забезпечення стійкого фінансування транспортної системи країни;

4. Підвищення рівня безпеки на транспорті;

5. Розвиток міської мобільності і регіональної інтеграції в Україні.

Зокрема розвиток автомобільних перевезень передбачає:

– інтеграцію українських перевізників в міжнародний ринок автомобільних перевезень;

– посилення відповідальності перевізників за порушення габаритно-вагових параметрів транспортних засобів;

– введення системи підтвердження професійної компетентності персоналу і, передусім, водіїв автомобільного транспорту.

Транспортна логістика в Україні на даний момент зазнала багатьох змін. На неї впливають світові тренди та геополітична обстановка. Слід зазначити, що пандемія COVID-19 також внесла свої корективи у роботу транспорту. До цього додаються й нові вимоги до транспорту – нині галузь є невід'ємною складовою обороноздатності країни.

Наслідком таких змін стало зростання вимог до якості логістичних послуг, гарантії надійності доставки вантажів та прозорість бізнес-процесів.

**Мета і завдання дослідження.** Мета полягає у вивченні шляхів підвищення ефективності логістичних процесів вантажних перевезень в Одеському регіоні. Оскільки ці процеси слід розглядати з урахуванням логістичних відносин між Україною та країнами ЄС, то для досягнення визначеної мети важливими завданнями є отримання кількісної та якісної оцінок сучасного стану логістичної системи та визначення основних напрямів оптимізації логістичного обслуговування товаропотоків між Україною та країнами ЄС на прикладі Одеського регіону. У зв'язку з цим необхідно розглянути адаптацію теоретико-методичних засад удосконалення логістичних систем доставки вантажів автомобільним транспортом до вимог соціально-орієнтованої ринкової економіки.

**Матеріали та методи дослідження.** Вантажоперевезення схоже на кровоносну систему в економічному організмі країни. Вимірюючи його показники, можна визначити, які галузі розвиваються, які перебувають у стані стагнації, а які деградують. Існує і зворотна залежність економіки від стану вантажоперевезень та логістичної інфраструктури загалом.

Нині в Україні найбільшу частку вантажів (близько 65 %) переміщує залізничний транспорт. Проте, в останні роки Укрзалізниця зіткнулася з серйозними економічними труднощами, пов'язаними з фінансовими та матеріально-технічними проблемами, що накопичилися. Залі-

знична інфраструктура в Україні значно зношена: у 2018 році ремонт вимагали 40 % шляхів, а знос локомотивного парку досяг 87 %. У цих умовах відправники вантажу змушені переходити із залізничного на інші види транспорту, зокрема, на автомобільний. Геополітичний фактор також позначився на діяльності перевізників. Анексія Криму, втрата контролю над територіями Донбасу та воєнний стан в країні обмежили можливості пересування залізницею, а також призвели до втрат локомотивного та вагонного парків.

На даний час в Одесі та Одеській області маємо розвинену залізничну мережу (за даними регіональної філії «Одеська залізниця» Публічного акціонерного товариства «Українська залізниця»), яка посідає провідне місце в перевезеннях вантажів за видами транспорту [16, 17]. Залізничному транспорту належить перше місце в перевезенні пасажирів (пасажирообіг) і друге (після трубопровідного) – в перевезенні вантажів (вантажообіг). З ним конкурує автомобільний транспорт, який перевозить мілкопартійні вантажі, після їх доставки залізничним транспортом «від дверей до дверей», інформація відображена на рис. 1.

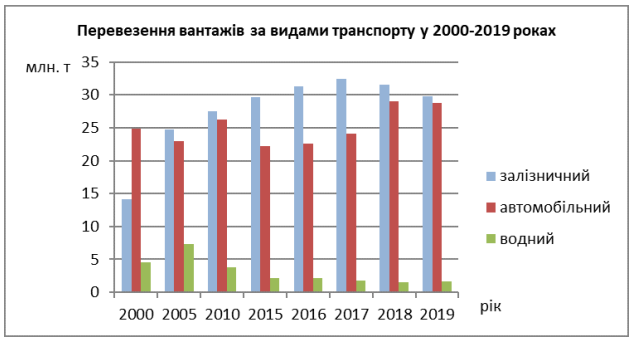



Рисунок 1 – Перевезення вантажів за видами транспорту у 2000-2019 роках

Відповідно до програмного документа «Україна 2020: Стратегія національної модернізації», перспективний розвиток економіки України оптимістично оцінюється як інвестиційно-інноваційний, який має забезпечити підвищення її конкурентоспроможності [18]. Такий підхід вимагає від транспортного сектору економіки Одеського регіону проведення заходів щодо збільшення обсягів не тільки вантажних та пасажирських перевезень, але й впровадження ефективної тарифної, податкової політики за умов інвестицій на інноваційній основі. На сьогоднішній день спостерігається відставання в розвитку транспортної мережі, перш за все в розвитку автомобільних доріг загального користування, від темпів автомобілізації країни.

Крім зношеності транспортного складу, проблемами в транспорті Одеського регіону також є: недосконаліть системи страхування вантажу і транспортних засобів, труднощі в організації взаємодії декількох видів транспорту. Поряд з цим в розвитку транспортної галузі є проблеми, пов'язані з ланцюгом: «постачання – виробництво – розподіл – споживання» [19]. Сьогодні цю сферу контролює Міністерство інфраструктури України, проте лише напрямок – транспортування, а це лише одна складова логістики.

Виходячи з того, що об'єктом нашого дослідження обрано саме автомобільний транспорт, наведемо чинники, що розкривають переваги його використання. До них відносяться: висока маневреність, доставка від «дверей до дверей», можливість доставки невеликими партіями, менш жорсткі вимоги щодо пакування вантажу та ін. Але поряд з цим є й недоліки. До них відносяться наступні чинники: висока вартість перевезень, оперативне розвантаження, порівняно невелика вантажопідйомність та ін. Традиційною сферою використання автомобільного транспорту є короткі відстані. Але за відсутності інших способів доставки вантажів він може ефективно використовуватися і на середні та на дальні відстані.

Для більш повного уявлення роботи автомобільного транспорту Одеської області (перевезення вантажів) та оцінці його функціонування розширимо динамічний ряд транспортних перевезень. Для наочності показники наведемо у графічному вигляді (рис. 2).

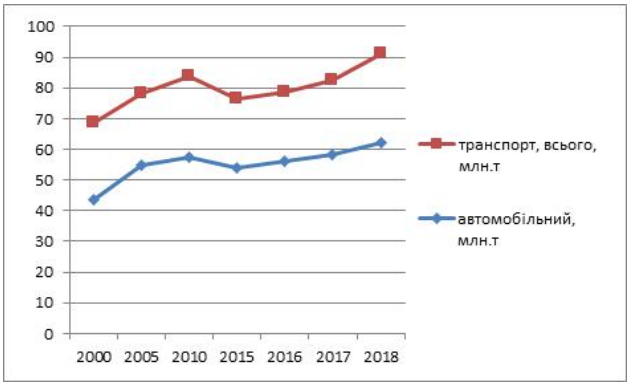



Рисунок 2 – Динаміка перевезення вантажів за видами транспорту в Одеської області за період з 2000-2018 рр.

Наведені показники (рис. 2) перевезення вантажів в Одеській області за останні 18 років свідчать про стабільну динаміку до збільшення як взагалі вантажних перевезень, так і перевезень

автомобільним транспортом. Зростання перевезень автомобільним транспортом обумовлено загальновизнаними критеріями: витрати на перевезення; час перевезення; надійність; доступність; збереженість вантажу.

На підставі офіційних статистичних даних були розраховані індекси обсягу перевезення вантажів за загальними видами транспорту та окремо автомобільним. Результати представимо у вигляді стовпчикової діаграми (рис. 3).

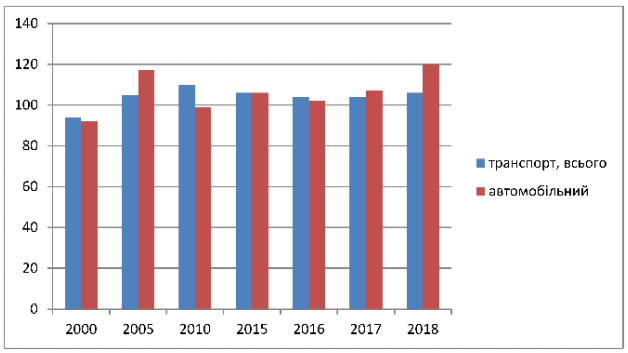



Рисунок 3 – Індекси обсягу перевезення вантажів за видами транспорту

Обсяги загальних перевезень найбільш стрімко зростали в 2015 та 2018 рр. (рис. 2), а автомобільного транспорту в 2018 році, що відповідно склало 6 % та 20 %.

Протягом трьох років (2016-2019 рр.) транспорт Одеського регіону нарощував обсяги вантажообігу у середньому приблизно на 3 %. За 2016-2019 рр. вантажообіг автомобільного транспорту зріс на 1,0 млрд т·км, що складає приріст у 35,7 %. Позитивна динаміка зростання обсягу перевезень та зростання вантажообігу яскраво свідчать про суттєвий внесок транспорту у розвиток Одеського регіону. Основні тенденції та ризики розвитку транспортної системи, її конкурентоспроможність та ефективність є об'єктом подальших наукових розробок.

В результаті проведеного дослідження транспортної системи Одеського регіону виявлено, що транспортна мережа не використовуються в повній мірі при виконанні міських, приміських, міжміських, а також міжнародних перевезень, не використовується і потенціал міжнародних транспортних коридорів (МТК), а їх по Одеському регіону проходить три.

На даний момент для України пріоритетними є наступні кроки у розвитку логістики: інтенсифікація розвитку інноваційних технологій; подальша інтеграція у світове співтовариство, вивчення та впровадження зарубіжного досвіду; будівництво логістичних центрів та розвиток інфраструктури на всій території країни; виховання висококваліфікованих кадрів шляхом розвитку освіти в закладах вищої освіти та програм підвищення кваліфікації.

Практична реалізація інновацій в логістиці стає потужним інструментом підвищення конкурентоспроможності підприємств і організацій, а також підвищення конкурентоспроможності продукції, що ними випускається, і послуг, які ними надаються [20]. Також слід зазначити, що на цінність та актуальність цифрової трансформації в галузі транспортної та логістичної інфраструктури вплинула подія 2020 р. Економічні та соціальні обмеження, викликані пандемією COVID-19, послужили свого роду поштовхом для переходу на інноваційні моделі управління, цифрові сервіси та платформи.

У транспортній логістиці на сьогоднішній день застосовуються досить нові та ефективні технології, які допомагають знизити логістичні витрати і підвищити якість послуг. Багато перевізників вже давно оцінили переваги систем моніторингу та успішно використовують подібні системи при перевезенні вантажів. Однак все більше і більше відчувається потреба не просто стежити за переміщенням транспорту, а й контролювати інші аспекти перевезення вантажів [21].

Для оптимізації роботи підприємства використовуються прийоми і методи логістики розраховані на вдосконалення роботи складу, виходячи з можливого наростання номенклатури товарів:

застосування автоматизованих систем для зручності швидкої комплектації замовлень;

організація адресної системи складу;

оптимізація логістичного процесу на складі за основними його напрямками: оптимізація приймання, обробки замовлень, відправлення товарів;

повний перехід на електронний документообіг і автоматизація стандартних митних процедур.

**Висновки.** Аналіз, наведений в роботі показав, що підприємства транспортної системи Одеського регіону за трирічний період (2016-2019 рр.) мають позитивну динаміку розвитку. Поряд з цим є в розвитку транспортної галузі є проблеми, пов'язані з ланцюгом: «постачання – виробництво – розподіл – споживання».

Уникнути багатьох проблем, які виникли в економіці транспортної галузі регіону, можна за умов вдосконалення управління, одним з напрямків якого є використання концепцій логістики. Перспективи подальших наукових розробок у

даному напрямі полягають в обґрунтуванні системного механізму управління транспортними логістичними операціями.

Таким чином, маючи важливі транспортні магістралі і усі види транспорту на своїй території, Одеський регіон можна розглядати як опорний багатофункціональний транспортний комплекс, в якому з'єднуються транспортні, торгові, фінансові і інформаційні потоки. Усе це супроводжує переробка вантажів, взаємодія різних видів транспорту. Такий підхід дозволить удосконалювати і підвищувати ефективність транспортної системи Одеського регіону, а отже і усього транспортного комплексу України.

**Список використаних джерел**


1. Проект «Україна 2030Е – країна з розвинутою цифровою економікою». Український Інститут Майбутнього. URL: https://strategy.uifuture.org/kraina-z-rozvinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html.
2. Бауэрсокс Д. Дж., Класс Д. Дж. Логистика. Интегрированная цепь поставок. Пер. с англ. Москва: Олимп-бизнес, 2017. 640 с.
3. Линдере М. Р., Фирон Х. Е. Управление снабжением и запасами. Логистика. Пер. с англ. Санкт Петербург: Виктория плюс, 2002. 768 с.
4. Гончар Л. А. Стратегія підвищення ефективності комерційної логістики. *Академічний огляд*. 2008. № 2. С. 89-93. URL: https://nbuv.gov.ua/UJRN/ao_2008_2_14.
5. Поповенко Н., Івахнюк Л. Підвищення ефективності транспортних послуг на основі застосування транспортної логістики. *Науковий вісник [Одеського національного економічного університету]*. 2014. № 9. С. 146-157. URL: https:// nbuv.gov.ua/UJRN/Nv_2014_9_16.
6. LPI – www.worldbank.org/lpi.
7. Крюкова Ю. О. Оцінка ефективності логістики. *Science Rise*. 2015. №1 (1). С. 34-36. URL: https:// nbuv.gov.ua/UJRN/texc_2015_1(1)_7.
8. Марчук І. Індекс ефективності логістики (LPI) та його зв'язок з основними економічними показниками й індексами. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2021. № 1 (61). С. 47-57. DOI: https://doi.org/10.31732/2663-2209-2021-61-47-57.
9. Coyle J. J., Bardi E. J., Langley C. J. Zarzadzanie logistyczne. Warszawa: PWE, 2002. 243 s.
10. Устенко М. О. Основні напрямки розвитку та завдання транспортної логістики. *Глобальні та національні проблеми економіки.* 2015. № 5. С. 251-254. URL: http://global-national.in.ua/issue-5-2015/13-vipusk-5-traven-2015-r/792-ustenkom-o-osnovni-napryamki-rozvitku-tazavdannya-transportnoji-logistiki.
11. Діджиталізація в логістиці. Чи дійсно вона має такий сильний вплив на галузь. Trade Master Group: веб-сайт. URL: https://trademaster.ua/logistic/313066 (дата звернення 17.11.2021).
12. Пілоян Д. Діджиталізація автомобільних перевезень в Україні: мрія чи найближча реальність. 2020. URL: https://logist.fm/publications/didzhitalizaciyaavtomobilnih-perevezen-v-ukrayini-mriya-chi-nayblizhcha-realnist (дата звернення 17.11.2021).
13. Концепція розвитку транспортно-дорожнього комплексу України на середньостроковий період та до 2020 року. URL: http://mtu.gov.ua.
14. Макаренко М. В. Управління економічним потенціалом регіону як основою формування конкурентних переваг регіону. Актуальні проблеми економіки. 2012. С. 217-224.
15. Степаненко С.В. Оцінка ефективності використання економічного потенціалу регіону та управління ним. *Державне будівництво*: *електронне наукове видання ХарРІ НАДУ при Президентові України*. 2013. № 1. URL: http://www.kbuapa.kharkov.ua/e-book/db/2013-1/doc/2/03.pdf.
16. Державна служба статистики України (ДССУ). Головне управління статистики в Одеській області, Статистичний щорічник Одеської області. За редакцією Котвицької Л. Е. Одеса, 2019.
17. Державний комітет статистики України [Електронний ресурс]. URL: http://www.ukrstat.gov.ua.
18. Перебийніс В. І., Перебийніс О. В. Транспортно-логістичні системи підприємств: формування та функціонування: монографія. Полтава: РВВ ПУСКУ, 2005. 207 с.
19. Меленчук Т. М., Арцибашева Н. М., Ганєва Т. І., Кирилюк Є. В. Дослідження стану транспортної системи Одеси та Одеської області. Технічне регулювання, метрологія, якість, інформаційні та транспортні технології: європейський вектор: зб. тез. X між. наук.-практ. конф., м. Одеса, 22-23 жовтня 2020 р. Одеса: ОДАТРЯ, 2020. С. 124-128.
20. Системологія на транспорті [Текст] : підручник: У 5 кн. / заг. ред. М. Ф. Дмитриченко. К. : Знання України, 2005. Кн. 2 : Технологія наукових досліджень і технічної творчості / Е. В. Гаврилов [та ін.], 2007. 318 с.
21. Арцибашева Н. М., Меленчук Т. М., Ілько О. С. Підвищення ефективності роботи транс-

портних підприємств за рахунок використання інноваційних інформаційних технологій в логістиці. Інтелектуальні системи та інформаційні технології: зб. тез. міжн. наук.-практ. конф., м. Одеса, 19-24 серпня 2019 р. Одеса: ТЄС, 2019. С. 132-135.

## References

1. The project "Ukraine 2030E – a country with a developed digital economy". Ukrainian Institute of the Future. [Electronic resource]. URL: https://strategy.uifuture.org/kraina-z-rozvinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html.

2. Bowersox D. J., Klass D. J. Logistics. Integrated supply chain [Logistika. Integrirovannaya cep' postavok]. Per. s angl. Moskva: Olimp-biznes, 2017. 640 s. [in Russian].

3. Lindere Michael R., Firon Harold E. (2002) Supply and stock management. Logistics [Upravlenie snabzheniem i zapasami. Logistika.], Per. s angl. Sankt Peterburg: Viktoriya plyus, 2002. 768 s [in Russian].

4. Gonchar L.A. The strategy of increasing the efficiency of commercial logistics [Stratehiia pidvyshchennia efektyvnosti komertsiinoi lohistyky]. *Academicnii oglyad – Academic review*. 2008. # 2. P. 89-93 [in Ukrainian]. URL: https://nbuv.gov.ua/UJRN/ao_2008_2_14.

5. Popovenko N. Increasing the efficiency of transport services based on the application of transport logistics [Pidvyshchennia efektyvnosti transportnykh posluh na osnovi zastosuvannia transportnoi lohistyky]. *Naukovii visnik Odeskogo nazionalnogo ekonomicnogo Universitetu – Scientific Bulletin Odesa National Economic University*. 2014. # 9. P. 146-157 [in Ukrainian]. URL: https://nbuv.gov.ua/UJRN/Nv_2014_9_16.

6. LPI – www.worldbank.org/lpi.

7. Kryukova Yu. O. Evaluation of logistics efficiency [Otsinka efektyvnosti lohistyky]. *Science Rise*. 2015. # 1 (1). P. 34-36 [in Ukrainian]. URL: https:// nbuv.gov.ua/UJRN/texc_2015_1(1)_7.

8. Marchuk I. Logistics Performance Index (LPI) and its relationship with key economic indicators and indices. [Indeks efektyvnosti lohistyky (LPI) ta yoho zviazok z osnovnymy ekonomichnymy pokaznykamy y indeksamy]. *Vceni sapiski University "KROK" – Scientific notes of the University "KROK"*, 2021. # 1 (61). P. 47-57 [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.31732/2663-2209-2021-61-47-57.

9. Coyle J. J., Bardi E. J., Langley C. J. (2002). Zarzadzanie logistyczne. Warszawa, PWE. 243 s.

10.Ustenko M. O. Main directions of development and tasks of transport logistics [Osnovni napriamky rozvytku ta zavdannia transportnoi lohistyky]. *Globalni ta nazionalni problem ekonomiki – Global and national problems of the economy*. 2015. # 5. P. 251-254 [in Ukrainian].

11.Digitalization in logistics. Does it really have such a strong influence on the industry. [Didzhytalizatsiia v lohistytsi. Chy diisno vona maie takyi sylnyi vplyv na haluz] (2021) Trade Master Group: URL: https://trademaster.ua/logistic/313066.

12.Piloyan D. Digitalization of road transport in Ukraine: a dream or the nearest reality. [Didzhytalizatsiia avtomobilnykh perevezen v Ukraini: mriia chy naiblyzhcha realnist] (2020). URL: https://logist.fm/publications/didzhitalizaciyaavtomobilnih-perevezen-v-ukrayini-mriya-chi-nayblizhcha-realnist.

13.Concept of the development of the transport and road complex of Ukraine for the medium-term period and until 2020 [Kontseptsiia rozvytku transportno-dorozhnoho kompleksu Ukrainy na serednostrokovyi period ta do 2020 roku]. [in Ukrainian]. URL: http://mtu.gov.ua.

14.Makarenko M. V. (2012) Management of the economic potential of the region as a basis for the formation of competitive advantages of the region. [Upravlinnia ekonomichnym potentsialom rehionu yak osnovoiu formuvannia konkurentnykh perevah rehionu]. Actual problems of the economy, pp. 217-224 [in Ukrainian].

15.Ctepanenko S. V. Evaluation of the effectiveness of the use of the economic potential of the region and its management. [Otsinka efektyvnosti vykorystannia ekonomichnoho potentsialu rehionu ta upravlinnia nym]. *State building: an electronic scientific publication of HarRI of the National Academy of Sciences under the President of Ukraine*. 2013. # 1. URL: http://www.kbuapa.kharkov.ua/e-book/db/2013-1/doc/2/03.pdf.

16. State Statistical Service of Ukraine (DSSU). Main Department of Statistics in Odesa Oblast, Statistical Yearbook of Odesa Oblast. Edited by L. E. Kotvytska. Odesa, 2019.

17. State Statistics Committee of Ukraine [Electronic resource]. URL: http:// www.ukrstat.gov.ua.

18. Perebijnis V. I. (2005*)* Transport and logistics systems of enterprises: formation and functioning: monograph [Transportno-lohistychni systemy pidpryiemstv: formuvannia ta funktsionuvannia: monohrafiia]. Poltava, RVV PUSKU [in Ukrainian].

19. Melenchuk T. M., Artsybasheva N. M.,

Ganeva T. I. Study of the state of the transport system of Odesa and Odesa region [Doslidzhennia stanu transportnoi systemy Odesy ta Odeskoi oblasti]. X Mizhnarodna naukovo-praktychna konferenzia «Technicne reguluvanne, metrologia, yakist, informatini ta transportni texnologii: euvropeiski vector». Collection of Scientific Papers of the X International Scientific and Practical Conference "Technical Regulation, Metrology, Quality, Information and Transport Technologies: European Vector". Odesa: OSATRQ, 2020. P. 124-128 [in Ukrainian].

20. Systemolohiia na transporti [Tekst] : pidruchnyk: U 5 kn. / zah. red. M. F. Dmytrychenko. K. : Znannia Ukrainy, 2005. Kn. 2 : Tekhnolohiia naukovykh doslidzhen i tekhnichnoi tvorchosti / E. V. Havrylov [ta in.], 2007. 318 s [in Ukrainian].

21. Artsybasheva N. M., Melenchuk T. M., Ilko O. C. (2019) Increasing the efficiency of the work of transport enterprises due to the use of innovative information technologies in logistics [Pidvyshchennia efektyvnosti roboty transportnykh pidpryiemstv za rakhunok vykorystannia innovatsiinykh informatsiinykh tekhnolohii v lohistytsi]. *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferenzia «Intelektualni sistemi ta Informatini texnologii» – Collection of scientific papers inter. conf. "Intelligent systems and information technologies"*. Odesa: TEC, pp. 132-135. [in Ukrainian].

*Надійшла до редакції 20.11.2022*

**АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК**


Арцибашева Н. М. ……... 42
Вовк В. В. ……..…… 34
Грабовський О. В. …… 6
Гутиря С. С. …….. 34
Катаєва М. О. …… 14
Квасніков В. П.…….. 28
Квашук Д. М. …...……. 14
Кисельова О. І. ...…… 6
Кіфорук С. В. ……..……..... 19
Коломієць Л. В. …….. 6
Ковра О. В. …….. 42
Меленчук В. М. ….……. 42
Меленчук Т. М. …..……..... 42
Передерко А. Л. .……. 6
Пуріч Д. О. …….. 42
Стахова А. П. …….. 28
Яглінський В. П. ……..…... 34

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

| | |
|---|---|
| ***АРЦИБАШЕВА Наталя Миколаївна*** | *Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, доцент кафедри «Автомобільного транспорту та логістики», кандидат технічних наук, доцент* |
| ***ВОВК Вікторія Валентинівна*** | *Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, старший викладач кафедри динаміки машин і механічної інженерії* |
| ***ГРАБОВСЬКИЙ Олег Вікторович*** | *Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, в. о. декана факультету електроніки, автоматизації та метрології, кандидат технічних наук, доцент* |
| ***ГУТИРЯ Сергій Семенович*** | *Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, декан Українсько-Іспанського навчального інституту, доктор технічних наук, професор* |
| ***КАТАЄВА Марія Олександрівна*** | *Національний авіаційний університет, м. Київ, докторант кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, кандидат технічних наук, доцент* |
| ***КВАСНІКОВ Володимир Павлович*** | *Національний авіаційний університет, м. Київ, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, доктор технічних наук, професор* |
| ***КВАШУК Дмитро Михайлович*** | *Національний авіаційний університет, м. Київ, докторант кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, кандидат економічних наук, доцент* |
| ***КИСЕЛЬОВА Ольга Ігорівна*** | *Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, доцент кафедри метрології, якості та стандартизації, кандидат педагогічних наук, доцент* |
| ***КІФОРУК Сергій Володимирович*** | *Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, аспірант кафедри волоконно-оптичних ліній електронних комунікацій* |
| ***КОВРА Олександр Володимирович*** | *Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, старший викладач кафедри «Автомобільного транспорту та логістики»* |
| ***КОЛОМІЄЦЬ Леонід Володимирович*** | *Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, професор кафедри метрології, якості та стандартизації, доктор технічних наук, професор* |
| ***МЕЛЕНЧУК Тетяна Михайлівна*** | *Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, завідувачка кафедри «Автомобільного транспорту та логістики», доктор технічних наук, професор* |
| ***МЕЛЕНЧУК Віктор Миколайович*** | *Військова академія (м. Одеса), доцент кафедри ремонту та експлуатації автомобільної та спеціальної техніки, кандидат технічних наук* |

| | |
|---|---|
| ***ПЕРЕДЕРКО Анатолій Леонтійович*** | *Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, професор кафедри метрології, якості та стандартизації, доктор технічних наук* |
| ***ПУРІЧ Дмитро Олександрович*** | *Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, доцент кафедри «Автомобільного транспорту та логістики», кандидат технічних наук, доцент* |
| ***СТАХОВА Анжеліка Петрівна*** | *Національний авіаційний університет, м. Київ, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, кандидат технічних наук, доцент* |
| ***ЯГЛІНСЬКИЙ Віктор Петрович*** | *Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна, професор кафедри динаміки машин та механічної інженерії, доктор технічних наук, професор* |

Наукове видання

# *ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ*

Випуск 2(21) 2022


Редактор Братченко Г. Д.

Комп’ютерна верстка Постоварова В. Д.



Адреса редакції: 65029, м. Одеса, вул. Кузнечна 1, ДУІТЗ
Тел.: (048)726-68-92 – довідки;
E-mail: bratchenkohd@gmail.com



*Надруковано з готового оригінал-макету*
*у друкарні «Апрель»*
*ФОП Бондаренко М. О.*

---

*Підписано до друку 28.12.2022*
*Формат 60*88/8. Папір офсетний.*
*Друк цифровий. Ум. друк. арк. 6,4*
*Тираж 100 прим.*
*65045, м. Одеса, вул. В. Арнаутська, 60.*
*www.aprel.od.ua*