

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



*Державний університет
інтелектуальних технологій і зв'язку*

ISSN 2412 – 5288 (Print)
ISSN 2414 – 9780 (Online)
DOI 10.32684/2412-5288-2023-1-22

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

1(22) 2023

ОДЕСА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ОДЕСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АКАДЕМІЇ
ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ
Випуск 1(22) 2023

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: 174, 175, 275.

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.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ZBÌRNIK NAUKOVIIH PRAC' ODES'KOÏ DERŽAVNOÏ AKADEMII TEHNİČNOGO REGULŪVANNÂ
TA ÂKOSTI (COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE ODESA STATE ACADEMY OF
TECHNICAL REGULATION AND QUALITY)

Issue 1(22) 2023

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)

Hrabovskiy 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: 174, 175, 275.

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.

ЗМІСТ

Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості	5
О. І. Кисельова, к.пед.н., Л. В. Коломієць, д.т.н., О. В. Грабовський, к.т.н. ЕКСПЕРТИЗА ОСВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ У ТЕХНІЧНОМУ ЗАКЛАДІ ВИЩОЇ ОСВІТИ	6
Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення	13
Л. В. Коломієць, д.т.н., О. М. Лимаренко, к.т.н., А. Л. Передерко, д.т.н., А. Г. Цимбалюк, Д. А. Цимбалюк ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ДАТЧИКІВ СИЛИ	14
В. П. Квасніков, д.т.н., Г. Д. Братченко, д.т.н., Д. М. Квашук, к.е.н. ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА БАЗІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН	23
Інформаційно-вимірювальна техніка, інформаційно-вимірювальні та транспортні технології	35
А. Г. Ткачук, к.т.н., О. М. Безвесільна, д.т.н., О. О. Добржанський, к.т.н. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА З АВТОНОМНОЮ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ НА БАЗІ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ ОБ'ЄКТІВ ..	36
В. П. Ягліньський, д.т.н., С. С. Гутиря, д.т.н., В. В. Вовк НЕОДНОЗНАЧНІСТЬ ТА СИНГУЛЯРНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ТИПУ БІГЛАЙД.....	45
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	53
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ	54

РОЗДІЛ 1

Стандартизація, сертифікація, менеджмент якості

УДК 37.013.3

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

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

ЕКСПЕРТИЗА ОСВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ У ТЕХНІЧНОМУ ЗАКЛАДІ ВИЩОЇ ОСВІТИ

У статті визначено зміст освітньої технології та її ознаки; сутність експертизи освітньої технології впроваджуваної в сучасному технічному ЗВО, етапи та критерії її проведення. Представлено процедуру експертизи освітніх технологій у технічному закладі вищої освіти, перший етап якої передбачав опитування учасників освітнього процесу, за розробленим опитувальником для оцінки придатності та ефективності застосовуваних технологій (дослідження проводилось в Державному університеті інтелектуальних технологій і зв'язку); за результатами опитування студентів і викладачів визначено, що респонденти розглядають освітню технологію, яка передбачає змішану форму навчання, як вимогу часу, спричинену зовнішніми впливами, переважна більшість опитаних вважають її досить ефективною і сучасною, але такою, яка не спроможна повністю забезпечити всі запити учасників освітнього процесу та потребує певних удосконалень.

Ключові слова: експертиза, освітня технологія, експертиза освітніх технологій, процедура експертизи, опитування.

O. I. Kyselyova, PhD, L. V. Kolomiets, DSc, O. V. Hrabovskyi, PhD

EXPERTISE OF EDUCATIONAL TECHNOLOGIES IN TECHNICAL HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION

The article defines the content of educational technology and its features; the essence of the examination of educational technology implemented in modern technical higher education institutions, the stages and criteria of its implementation. The analyzed educational technology involves the use of technical means and programmed learning, is a tool for improving the organization of the educational process, is focused on the modernization of educational activities, in accordance with the demands of society. The procedure for determining the effectiveness of educational technology is presented, which is based on the measurement of the time spent and the calculation of the productivity coefficient, which relates the acquired professional competences to the speed of work performance. The procedure of examination of educational technologies in a technical institution of higher education is presented, the first stage of which involved surveying the participants of the educational process according to a developed questionnaire to assess the suitability and effectiveness of the technology used (the study was conducted at the State University of Intellectual Technologies and Communication). Respondents were asked questions about the relevance, efficiency, quality assurance of the educational process, its effectiveness, the formation of a "resource of success" and the competitiveness of graduates. According to the results of the survey of students and teachers, it was determined that they consider educational technology, which involves a mixed form of learning, as a time requirement caused by external influences, the vast majority of respondents consider it quite effective and modern, but not able to fully satisfy all the requests of participants in the educational process, in the future, it needs certain improvements.

Key words: examination, educational technology, examination of educational technologies, examination procedure, surveys.

DOI 10.32684/2412-5288-2023-1-22-6-12

Постановка проблеми в загальному виді.

Швидкий розвиток ринку товарів, послуг і технологій спричиняє зміну суспільного і економічного попиту, змінюється як кінцевий продукт, так і процес виробництва. Автоматизація та інтелектуалізація процесів виробництва

вимагає нового рівня знань і компетентностей від фахівців з вищою технічною освітою, сприяє інтелектуалізації їхньої професійної діяльності, широкопрофільності і збільшення творчої складової. Все це веде до суттєвих перетворень на ринку освітніх послуг, як при підготовці

інженерного складу, так і при підготовці фахівців з професійно-технічною освітою.

Нові суспільні запити та економічні умови визначають зміст і кінцевий результат вищої освіти, висуваючи на перший план конкурентоспроможність випускника вишу. Здобувач вищої освіти стає не отримувачем, а замовником знань і необхідних компетенцій, оскільки він розуміє що йому потрібно, завдяки інформаційній насиченості сучасного світу, в нього вже на етапі навчання формується досить чітке уявлення про вимоги потенційного роботодавця і критеріальний відбір пропонованої професійно спрямованої інформації [1, с. 163]. Зростає необхідність створення нових міждисциплінарних зв'язків та постійного оновлення навчального матеріалу, засобів та методів освітнього процесу, як на рівні ЗВО, так і на рівні навчальних дисциплін. Часто це оновлення відбувається безпосередньо у процесі введення дисципліни до навчального плану, застосування нової технології, адже більшість оновлень ґрунтується саме на впровадженнях нових технологій. У зв'язку з цим постає проблема забезпечення якості цього нововведення, визначення критеріїв і показників, завдяки яким можна провести експертизу використовуваних освітніх технологій, які забезпечують оновлення дисципліни, навчального плану, і, як результат, – опанування нових компетентностей. Впровадження нової освітньої технології завжди вимагає проведення експертизи, загального вивчення всіх деталей технології, щоб потім не стикнутися з негативними наслідками нерозумних нововведень, які потягнуть за собою зниження якості освіти і конкурентоспроможності випускників.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. У працях сучасних вітчизняних учених: О. Величко, С. Братченко, А. Габер, Т. Гордієнко, Л. Даниленка, В. Євланова, В. Звереві, Р. Ільєсова, Г. Іванченко, О. Кисельові, О. Мармаза, Л. Петренка, Є. Стачєвої, С. Тарасові, Н. Федорові, Ю. Швалб визначено специфіку і критерії експертної діяльності в сфері вищої освіти, мета якої визначення, дослідження і прогнозування розвитку різних, передусім, прихованих та детермінованих наслідків і результатів освітньої ситуації, виявлення ризиків, пов'язаних із варіативними можливостями сценаріїв розвитку подій [1]. Основна відмінність експертизи від моніторингу, консультування, інспектування та наукового соціологічного дослідження в урахуванні мінливих факторів впливу, які важко піддаються статистичним та кількісним вимірюванням, а також врахування прогностичного компоненту

освітньої діяльності [2].

Започатковуючи дослідження, ми також спирались на результати робіт М. Hennink, N. Bonnie, B. Kaiser, в яких визначається валідність та достатність вибірки у якісних дослідженнях при проведенні експертизи закладу освіти, ідентифікація вибірки [3]. Особливу увагу приділили визначенням і дослідженням освітніх технологій з використання цифрових технологій, адже саме їхнє активне запровадження визначило сутність досліджуваної освітньої технології. A. Haleem, M. Javaid, M. A. Qadri, R. Suman розкрили трансформуючий вплив цифрових технологій на систему вищої освіти, завдяки якому створюються якісно нові форми і технології навчання [4]. Це підтверджується і в роботах K. Lee, M. Fanguy, які провели експертизу технології онлайн-екзаменів, визначаючи слабкі сторони цієї інновації, такі як погіршення якості знань, зниження успішності, через послаблення системи контролю і зниження мотиваційних чинників притаманних студентській спільноті в процесі оф-лайн навчання [5].

Мета дослідження: визначити зміст, етапи та критерії проведення експертизи освітніх технологій; розробити опитувальник для оцінки придатності та ефективності застосовуваних технологій в технічному закладі вищої освіти та провести опитування студентів і викладачів для визначення їхнього ставлення до впроваджуваних в ЗВО освітніх технологій; за результатами опитування спрогнозувати подальші експертні дії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Технологія (від др. – грець. *τέχνη* «мистецтво, майстерність, вміння» і *λόγος* «слово, думка, зміст, поняття») – це сукупність методів та інструментів для досягнення визначеної мети; застосування наукового підходу для досягнення практичних завдань, який передбачає методи, засоби і режим роботи, послідовність дій [6]. Це нове мультикомпонентне поняття, яке не має сталого визначення, оскільки постійно оновлюється, завдяки оновленню складових (процеси, ідеї, методи, засоби, інструменти) та впливу таких широких соціальних понять, як культура, економіка, політика, наука.

Освітня технологія – це система науково визначених принципів, методів, інструментів та засобів, спрямованих на ефективне досягнення освітніх цілей. Вона передбачає використання технічних засобів та засобів програмованого навчання і є інструментом вдосконалення організації освітнього процесу, яка орієнтована на осучаснення освітньої діяльності, відповідно до стрімкого розвитку техніки, соціальних і

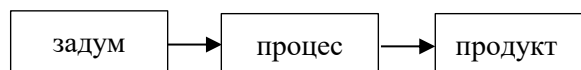
економічних запитів суспільства [1]. Ознаками освітньої технології є: чітко визначена мета, досягнення якої гарантує дана технологія; діагностичність тобто забезпечення технології діагностичними засобами, придатними для прогнозування і коригування процесу і результату педагогічних впливів; структурованість – підпорядкованість логіці та чітка підрядність використання в технології методів, інструментарію та засобів; оптимальність – наявність переліку умов, що обмежують сферу застосування чи результативність технології (технічні засоби, соціальні, економічні обмеження) [7].

Необхідність проведення експертизи виникає тоді, коли майбутня подія не відтворює минулу. Це характеризує принципову ознаку експертизи та її методології – творчий характер конструювання сценаріїв безлічі детермінованих процесів, це певна діяльність із виготовлення прогнозів, що містить у собі як точну оцінку впливу тих чи інших чинників та їхньої взаємодії, так й розуміння того, які чинники вимагають врахування і обчислення [8]. Освітня експертиза – це особливий спосіб вивчення освітніх процесів та явищ, який полягає саме в тому, щоб служити засобом такого самопізнання та рефлексії його розвитку. Експертизі піддаються освітні проекти та експериментально-дослідницька робота, освітні програми, нормативно-правові документи, професійно-педагогічна діяльність викладача, інноваційні розробки, авторські програми, навчально-методичні комплекси, освітні технології та методики. Експертиза кожного з цих об'єктів має свою специфіку. Зупинимось на експертизі освітніх технологій [9].

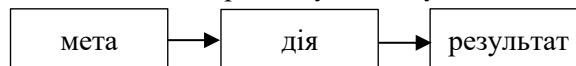
Експертиза технологій – це, по-перше, підтвердження того, що це дійсно технологія, а не набір певних методів і засобів, по-друге, визначення переваг даної технології над іншими, аналогічними. Експертиза починається з визначення критеріїв порівняння. Це наукоємна і громізка процедура, яка зводиться до ретельної перевірки причинно-наслідкових залежностей, що дозволяють приріст педагогічного продукту. Експертиза базується на алгоритмі, що складається з послідовних кроків, на кожному з яких встановлюється відповідність одному з критеріїв експертизи і виноситься однозначне рішення – «так» або «ні» [10].

Спочатку встановлюється цілісність технології, яка повинна охоплювати всю систему, процес в цілому. Якщо цикли повторюються, як це зазвичай відбувається в педагогіці, то ретельно балансується будь-який окремий цикл – від опису продукту до вимірювання того, що отримано на

виході [11]. Визначається перший і основний логічний зв'язок:



В більш конкретному випадку:



Не можна проводити експертизу якоїсь частини, вирваної із загальної системи, бо в такому випадку неможливо відслідкувати технологію, адже незрозумілим стає був створений продукт (результат) чи ні. Далі відбувається аналіз опису продукту, створюваної технології, тобто набір компетенцій випускника і відповідність його професійної компетентності запитам суспільства (роботодавців) [11].

Наступний етап – повний і детальний опис процедури з кількісними розрахунками: аналіз витрат часу, структура освітнього процесу, коефіцієнт завантаженості студента (інтелектуального навантаження), вирахований по відношенню до обсягу отриманих знань, уявлень про витрати часу, застосовувані методи, засоби та інші важливі об'єктивні характеристики. Якщо технологія дає більш високий результат для підвищення напруженості освітньої діяльності, то від неї краще відмовитися як від неперспективної. Далі – повна характеристика учасників освітнього процесу, тобто яким вимогам мають відповідати здобувачі вищої освіти, науково-педагогічні працівники, менеджери та інші ланки кадрового забезпечення освітньої діяльності ЗВО. На цьому етапі визначається, що доцільно змінити в управлінні та організації процесу. При проведенні експертизи освітніх технологій необхідно також враховувати мотиваційний компонент процесу викладання та навчання, що передбачає оцінювання системи стимулювання учасників освітнього процесу.

Останній етап: врахування всіх критеріїв діагностики – вхідних і вихідних умов і досягнень, менеджмент всіх ланок і етапів освітнього процесу, спільна відповідальність учасників за його результат [11].

Зауважимо, що важливим критерієм ефективності освітньої технології є час витрачений на підготовку, впровадження і оцінювання результатів освітньої діяльності з використанням даної технології. Ефективність визначається вимірюванням витраченого часу та підрахунком коефіцієнту продуктивності, що пов'язує отримані професійні компетентності (продукт) зі швидкістю виконання роботи:

$$П = Ш \times Ч, \quad (1)$$

де П – продукт, тобто професійна компетентність;

Ш – швидкість навчання (набуття компетентності), що характеризується комплексом набутих знань, умінь, навичок і компетенцій передбачених освітньо-професійною програмою;

Ч – час витрачений на досягнення поставлених цілей [12].

Чим вищий коефіцієнт продуктивності, тим ефективнішою є освітня технологія. Звісно, на практиці цей критерій важко виміряти, оскільки дуже багато мінливих факторів, які впливають на витрати часу, наприклад особистісні характеристики викладача, його досвід і професійні якості, які впливають на процес підготовки до заняття. Так само багато зовнішніх факторів: економічних, технічних, матеріальних, соціальних, які важко врахувати і які не мають сталого впливу.

Розробляючи процедуру експертизи освітніх технологій у технічному закладі вищої освіти ми, перш за все, враховували нові умови навчання, які запроваджені в ЗВО України – змішана форма навчання, яка передбачає аудиторну форму навчання (оф-лайн) в поєднанні з великим відсотком використання дистанційної (відстроченої) та он-лайн (в реальному часі) форм навчання. Введення даних форм призвели не тільки до використання нових методів, засобів та інструментарію, а й до змін в змісті навчальних

дисциплін та засобів контролю, наприклад, лабораторні досліди змінилися віртуальними дослідженнями, використанням віртуальних лабораторій, екзаменаційні білети поступилися місцем тестам створеним в Google формі, з'явилися нові форми подання навчального матеріалу із застосуванням презентацій, а вони, як відомо, вимагають своєрідного формулювання змісту навчального матеріалу з урахуванням його візуального сприйняття тощо.

Отже, це не просто нова форма роботи і використання нових поєднань звичних методів навчання, а саме нова технологія, яка має мету, структуру, діагностичні засоби, інструментарій і засоби навчання, комплексне використання яких, ефективно саме при підготовці фахівців певних спеціальностей і напрямів. Особливо це актуально для технічних ЗВО, оскільки компетентності забезпечувані освітніми програмами вимагають значної частки проведення лабораторних робіт і досліджень. Все це дає нам підстави стверджувати, що освітні технології останніх років використовували в технічних ЗВО набули нових форм.

Започатковуючи експертизу освітніх технологій у технічному закладі вищої освіти (на базі Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку), ми розробили опитувальник для оцінки придатності та ефективності застосовуваних технологій, його зміст подано в таблиці (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Опитувальник оцінки придатності та ефективності освітніх технологій

№	Питання	Відповіді (так / ні)
1	Відповідає освітня технологія реаліям сучасності?	
2	Здатна застосовувана технологія покращити якість освіти?	
3	Робить дана технологія освітній процес більш ефективним?	
4	Підтверджена ефективність даної технології науковими дослідженнями?	
5	Визначається застосовувана технологія унікальністю?	
6	Технологія покращує засвоєння знань?	
7	Технологія відповідає запитам суспільства?	
8	Технологія забезпечує формування професійно необхідних компетенцій?	
9	Формує технологія «ресурс успіху»?	
10	Дана технологія націлена на результат освіти?	
11	Випускник даного ЗВО буде конкурентоспроможним?	
12	При зміні соціальних умов Ви б воліли повернутись до традиційної технології навчання?	

Відповідно до критеріїв експертної оцінки освітніх технологій запропонованих в [8, 9, 11] ми визначили, що більшість відповідей «так» на представлені запитання, свідчать про ефективність даної технології.

В опитуванні взяли участь викладачі і студенти ДУІТЗ, вибірка становила 200 осіб (100 викладачів і стільки ж студентів), результати опитування подані на рисунках (див. рис. 1 і 2).

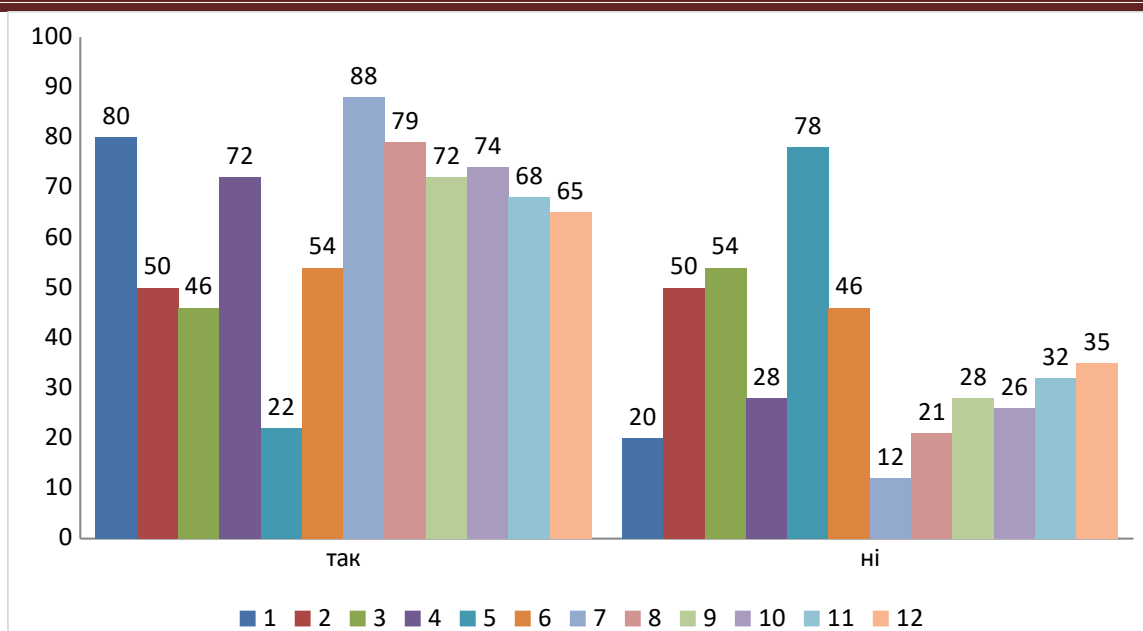


Рисунок 1 – Результати опитування викладачів

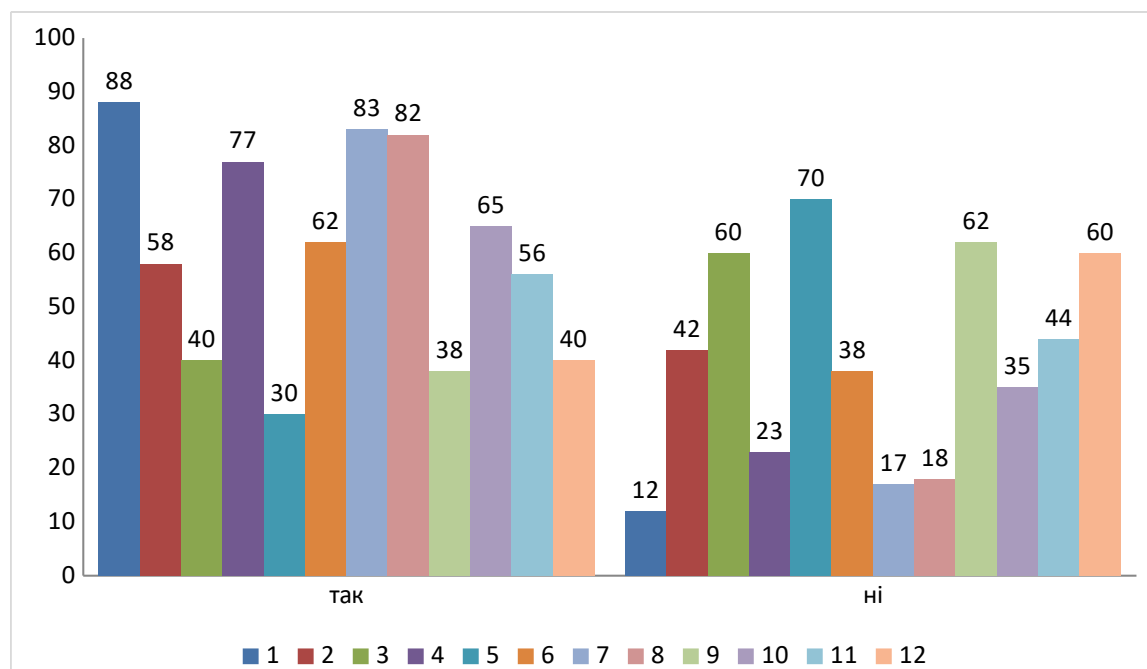


Рисунок 2 – Результати опитування студентів

Як бачимо переважна більшість відповідей «так», отже можна вважати дану технологію ефективною, проте 65 % опитаних викладачів прагнули б повернутись до традиційної форми освітнього процесу за умови соціальних змін. Вважаємо, що дана відповідь викликана психологічною неготовністю викладачів прийняти нові умови, а також труднощами в опануванні відповідними технологіями і цифровим інструментарієм.

Результати опитування студентів не надто різняться від результатів опитування викладачів,

більшість студентів вважає застосовувану технологію ефективною, проте студенти вважають що дана технологія не сприяє ефективності освітнього процесу (60 % опитаних відповіли «ні»), не є унікальною («ні» – 70 %) і в них викликає занепокоєння, що дана технологія не формує в них «ресурсу успіху», тобто не надає впевненості у власних професійних спроможностях («ні» – 62 %).

Хоча за статистичними даними технологію можна вважати ефективною (70 % відповідей «так»), проте при подальшій її реалізації доцільно звернути увагу на такі питання як: унікальність,

ефективність освітнього процесу та формування «ресурсу успіху», оскільки вони є важливими саме при подальшому професійному становленні випускників ЗВО.

Висновки. За результатами теоретичних розробок та проведеного опитування учасників освітнього процесу технічних ЗВО, можна зробити висновок, що студенти і викладачі розглядають освітню технологію, яка передбачає змішану форму навчання, як вимогу часу, спричинену зовнішніми впливами (карантин запроваджений через COVID-19, а потім війна рф проти України), переважна більшість опитаних вважають її досить ефективною і сучасною, але такою, яка не спроможна повністю забезпечити всі запити учасників освітнього процесу та потребує певних удосконалень.

Наступним етапом експертизи освітньої технології заплановано якісний аналіз використовуваних технологій, інструментарію і методів використання цифрових технологій в освітньому процесі технічних ЗВО. Його результати будуть представлені в наступних публікаціях.

Список використаних джерел

1. Братченко С. Л. Гуманитарная экспертиза образования: проведение и результат. *Професійна освіта*. Київ, 2014. № 2. С. 105-120.
2. Величко О. М., Гордієнко Т. Б., Коломієць Л. В. Групове експертне оцінювання та компетентність експертів / За загал. ред. О. М. Величка. Одеса: Вид-во ВМВ, 2015. 230 с.
3. Hennink, M., Kaiser, B. N. (2022). Sample sizes for saturation in qualitative research: A systematic review of empirical tests. *Social Science & Medicine*, 292, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2021.114523>.
4. Haleem A., Javaid M., Qadri M. A., Suman R. (2022). Understanding the role of digital technologies in education: A review. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.004>.
5. Lee, K., Fanguy, M. (2022). Online exam proctoring technologies: Educational innovation or deterioration? *British Journal of Educational Technology published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of British Educational Research Association*, 53 (3), 475-490. <https://doi.org/10.1111/bjet.13182>.
6. Arora Sanjay K., Li Yin, Youtie J., Shapira P. (2015). Using the Wayback Machine to Mine Websites in the Social Sciences: A Methodological Resource. *Journal of the association for information science and technology*. June, 1-11.

DOI:10.1002/asi.23503.

7. Грабовський О. В., Кисельова О. І. Інноваційні методи, засоби і технології в сучасній вищій освіті. *Збірник праць VII Міжнародної науково-практичної конференції «Психолого-педагогічні проблеми вищої освіти в умовах сучасних викликів: теорія і практика»*, 16-18 березня 2023 року, Харківський національному педагогічному ун-теті імені Г. С. Сковороди. Харків: ХНПУ, 2023. С. 444-446.

8. Кисельова О. І., Грабовський О. В. Зміст та методи проведення педагогічної експертизи у ЗВО. *Збірник праць XXVIII Міжнародної науково-методичної конференції «Управління якістю підготовки фахівців»*. Одеська державна академія будівництва та архітектури, 20-21 квітня 2023. Одеса: ОДАБА, 2023, С. 146-149.

9. 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.

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

11. Мармаза О. І. Експертиза закладу освіти та його об'єктів у контексті кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти зі спеціальності «Менеджмент». *Управління школою. Наукові основи управління в освіті та його психологічне забезпечення*. 2021. № 22-24. С. 56-69.

12. Швалб Ю. М. Методологія та теорія експертної діяльності: психологічні аспекти. Київ: Основа, 2013. 240 с.

References

1. Bratchenko S. L. Gumanitarnaja jekspertiza obrazovaniya: provedenie i rezul'tat. *Profesijna osvita*. Kyiv, 2014. # 2. S. 105-120.
2. Velychko O. M., Hordiienko T. B., Kolomiiets L. V. Hrupove ekspertne otsiniuvannia ta kompetentnist ekspertiv / Za zahal. red. O. M. Velychka. Odesa: Vyd-vo VMV, 2015. 230 s.
3. Hennink, M., Kaiser, B. N. (2022). Sample sizes for saturation in qualitative research: A systematic review of empirical tests. *Social Science & Medicine*, 292, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2021.114523>.
4. Haleem A., Javaid M., Qadri M. A., Suman R. (2022). Understanding the role of digital technologies in education: A review. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.004>.
5. Lee, K., Fanguy, M. (2022). Online exam

proctoring technologies: Educational innovation or deterioration? *British Journal of Educational Technology published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of British Educational Research Association*, 53 (3), 475-490. <https://doi.org/10.1111/bjet.13182>.

6. Arora Sanjay K., Li Yin, Youtie J., Shapira P. (2015) Using the Wayback Machine to Mine Websites in the Social Sciences: A Methodological Resource. *Journal of the association for information science and technology*. June, 1-11. DOI:10.1002/asi.23503.

7. Hrabovskyi O. V., Kyselova O. I. Innovatsiini metody, zasoby i tekhnolohii v suchasni vyshchii osviti. *Zbirnyk prats VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Psykhologo-pedahohichni problemy vyshchoi osvity v umovakh suchasnykh vyklykiv: teoriia i praktyka»*, 16-18 bereznia 2023 roku, Kharkivskiy natsionalnomu pedahohichnomu un-ti imeni H. S. Skovorody. Kharkiv: KhNPU, 2023. S. 444-446.

8. Kyselova O. I., Hrabovskyi O. V. Zmist ta metody provedennia pedahohichnoi ekspertyzy u ZVO. *Zbirnyk prats XXVIII Mizhnarodnoi naukovo-metodychnoi konferentsii «Upravlinnia yakistiu*

pidhotovky fakhivtsiv». Odeska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury, 20-21 kvitnia 2023. Odesa: ODABA, 2023, S. 146-149.

9. 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.

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

11. Marmaza O. I. Ekspertyza zakladu osvity ta yoho obektiv u konteksti kvalifikatsiinoi roboty zdobuvacha vyshchoi osvity zi spetsialnosti «Menedzhment». *Upravlinnia shkoloiu. Naukovi osnovy upravlinnia v osviti ta yoho psykhologichne zabezpechennia*. 2021. # 22-24. S. 56-69.

12. Shvalb Yu. M. Metodolohiia ta teoriia ekspertnoi diialnosti: psykhologichni aspekty. Kyiv: Osnova, 2013. 240 s.

Надійшла до редакції 01.06.2023

РОЗДІЛ 2

Прилади та методи вимірювання фізичних величин, їх метрологічне забезпечення

Л. В. Коломієць¹, д.т.н., О. М. Лимаренко², к.т.н., А. Л. Передерко¹, д.т.н., А. Г. Цимбалюк¹,
Д. А. Цимбалюк¹

¹Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса

²Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ДАТЧИКІВ СИЛИ

У статті показано, що при вимірюванні зусиль ваговими пристроями у тривалих динамічних процесах особливе значення набуває збереження метрологічних параметрів тензорезисторних датчиків сили в певному часовому інтервалі. Силувимірювальні ланцюги вагових пристроїв виконують таким чином, щоб пружний елемент працював у зоні пружних деформацій.

Існування різноманітних форм пружних елементів викликає математичні труднощі під час вирішення відповідних задач теорії пружності. При цьому урахування динамічних доданків зовнішніх впливів на пружний елемент значно ускладнює процес побудови розв'язку.

Як показав аналіз досліджень і відомих публікацій, вкрай необхідним для визначення напружено-деформівного стану пружних елементів є застосування одного із ефективних видів чисельних методів розрахунку – методу скінченних елементів, який є основою скінченно-елементного пакета ANSYS та дозволяє проєктувати конструкції силомірних пристроїв при зміні навантажень в широкому діапазоні.

Ключові слова: напружено-деформівний стан, датчик ваги, пружний елемент, тензорезистор, чисельно-аналітичні методи, скінченно-елементний пакет ANSYS.

L. Kolomiets, DSc, O. Lymarenko, PhD, A. Perederko, Dsc, A. Tsymbalyuk, D. Tsymbalyuk

DETERMINATION OF THE STRESS AND DEFORMATION STATE OF ELASTIC ELEMENTS OF TENSION METER FORCE SENSORS

The article shows that when measuring forces with weighing devices in long-term dynamic processes, the preservation of metrological parameters of tensor-resistor force sensors in a certain time interval acquires special importance.

The causes of similar failures of force sensors can be fatigue phenomena occurring in the material of the elastic element. Functional failure associated with fatigue phenomena of the material of the elastic element is usually observed long before its complete destruction. Therefore, force-measuring chains of weighing devices are made in such a way that the elastic element works in the zone of elastic deformations.

This is also explained by the fact that in the presence of plastic deformations, hysteresis phenomena appear which reduces the accuracy of measurements.

The existence of various forms of elastic elements causes mathematical difficulties when solving the corresponding problems of the theory of elasticity. At the same time, accounting for the dynamic terms of external influences on the elastic element significantly complicates the process of constructing a solution. Without taking into account dynamic components, it is difficult to perform optimal design of elastic elements of force sensors of weighing systems.

As the analysis of research and well-known publications showed, it is absolutely necessary to determine the stress-strain state of elastic elements using one of the effective types of numerical calculation methods – the finite element method, which is the basis of the ANSYS finite element package and allows designing the structures of force measuring devices when loads change in a wide range.

The analysis of the results of the research of the VAT of the elastic element of the cylindrical force sensor with cutouts shows that the location of the tensor resistors at the minimum distance to the axis of symmetry of the elastic element, in the zone of maximum deformations, is optimally chosen, which allows to reduce the influence of negative factors on the accuracy and stability of the measurement results.

Keywords: stress-strain mill, rail sensor, spring element, strain gauge, numerical-analytical methods, skinned-element package ANSYS.

Вступ

При вимірюванні зусиль ваговими пристроями у тривалих динамічних процесах, особливе значення набуває фактор збереження метрологічних параметрів тензорезисторних датчиків сили в певному часовому інтервалі. У цих умовах відхід метрологічних параметрів за межі, що нормуються певною категорією точності, є переважною характеристикою функціональної відмови. Причинами подібних відмов тензорезисторних датчиків сили можуть бути як втомні явища, що виникають у матеріалі пружного елемента, так і явища, пов'язані з навивкою самих тензорезисторів. Функціональні відмови, викликані останньою причиною, як показує досвід використання тензорезисторних датчиків сили гвинтового типу у вагових пристроях, виявляється лише внаслідок порушень умов експлуатації самих датчиків. Це дає підставу вважати, що метрологічну надійність тензорезисторних датчиків сили визначає структура та напружено-деформівний стан (НДС) його основної ланки – пружного елемента.

Функціональна відмова, пов'язана з явищами втоми матеріалу пружного елемента, зазвичай спостерігається до його повного руйнування. Втомні тріщини з'являються і ростуть у місцях з підвищеним рівнем напружень – поблизу концентраторів напружень, що формують так звані «слабкі ланки». Як показують дослідження, до розряду «слабких ланок» відносяться зони опорного майданчика і зони сполучення оболонки з кільцевою пластиною пружного елемента [1] (рис. 1).



Рисунок 1 – Руйнування пружного елемента тензометричного датчика сили

Тому силовимірювальні ланцюги вагових пристроїв виконують таким чином, щоб пружний елемент працював у зоні пружних деформацій. Це ще пояснюється тим, що за наявності пластичних деформацій з'являються гістерезисні явища, які знижують точність вимірювань.

Існування різноманітних форм пружних елементів викликає математичні труднощі під час вирішення відповідних задач теорії пружності.

При цьому урахування динамічних доданків зовнішніх впливів на пружний елемент значно ускладнює процес побудови рішення, а без їх урахування важко оптимально спроектувати пружні елементи датчиків сили, а для віброчастотних силовимірювачів взагалі неможливо спроектувати резонатори.

Аналіз методів розрахунку НДС пружних елементів датчиків сили

Часто розв'язання задач теорії пружності апроксимують з наперед заданою точністю. Це пояснюється тим, що для тіл обмежених складною поверхнею побудова рішень у замкнутому вигляді пов'язана з величезними теоретичними труднощами [2].

Для тіл обмежених простою поверхнею в деяких випадках виявляється ефективним застосування теорії функцій комплексного змінного [3]. При цьому виникають теоретичні труднощі при побудові повної системи функцій голоморфних для області, займаної пружним тілом. Таким способом вдається побудувати рішення, відповідних завдань теорії пружності, лише простих областей займаних пружним тілом.

Відомо використання методу власних векторних функцій задач теорії пружності, але тільки для пружних тіл обмежених канонічними координатними поверхнями (сфера, циліндр, еліпсоїд, обертаюча тощо). На цій основі за допомогою методу збурення границь будуються наближені рішення для пружних тіл, обмежених не канонічною поверхнею. Основна складність розв'язання задач теорії пружності таким методом полягає у побудові точного рішення для заданих граничних умов [4, 5]. При цьому питання збіжності апроксимаційного процесу для широкого класу задач виявляються не вирішеними, що обмежує використання цього методу. Крім цього зазначені вище методи важко використовувати при описі динамічних процесів, що виникають в пружних елементах датчиків сили в процесі зважування.

Аналогічний підхід до наближеного розв'язання задач теорії пружності заснований на варіаційних методах математичної фізики (Рітца, Бубнова-Галеркіна) [6]. Складність використання варіаційних методів полягає у побудові координатних функцій, що задовольняють заданим граничним умовам. Наприклад, таких координатних функцій не побудовано навіть для простих форм пружного елемента датчиків сили. Подальший розвиток методу ґрунтується на теорії R-відображень, де спеціальними логічними

операціями об'єднують в одну область канонічні поверхні, що обмежують пружне тіло. Потім будується за допомогою R-відображень координатна послідовність функцій, що задовольняють заданим граничним умовам. Однак, як показує практика, застосування цього методу доцільне лише для плоских задач теорії пружності.

Застосування сплайнів дозволяє розширити сферу використання структурного методу [7], але їх використання при вирішенні динамічних задач теорії пружності теоретично не обґрунтовано, що спричиняє значні складнощі їх застосування на практиці.

Замкнене рішення задач теорії пружності для тіл обмежених простими поверхнями здійснюють шляхом зведення відповідних диференціальних рівнянь до інтегральних [8]. Найчастіше метод використовують щодо коефіцієнтів інтенсивності напружень у гирлі тріщини, або під час вирішення контактних задач [9]. Цей метод набув подальшого розвитку у методі граничного елемента [10, 11]. Він ґрунтується на використанні функцій Гріна диференціальних задач теорії пружності. Популярність цього методу полягає в тому, що на аналітичному рівні позбавляються однієї змінної, що дозволяє використовувати його для розв'язання й інших задач механіки суцільних середовищ [12]. У цьому випадку знижується розмірність задачі, за рахунок чого суттєво скорочується обчислювальний процес. Основні труднощі методу полягають в обчисленні умовно-східних, так званих, сингулярних інтегралів, що перешкоджає використанню цього методу при вирішенні динамічних задач теорії пружності. Адже точних рекомендацій щодо обчислення одержуваних у цьому випадку сингулярних інтегралів не надано.

Подальший розвиток чисельно-аналітичних методів спрямований на розширення області їх застосування до задач механіки руйнувань [13]. Результати цих досліджень можуть бути використані при вирішенні системних проблем, що виникають при силовимірюванні.

Розглянуті чисельно-аналітичні методи широко не використовуються в інженерній практиці. Це пояснюється тим, що інженер-дослідник повинен мати спеціальні математичні знання. При цьому питання збіжності того чи іншого методу широкого класу задач є відкритим, і дослідник не завжди може отримати достовірні результати. Ці недоліки посилюються при побудові розв'язку динамічних задач.

Зупинимось ще на методах, що з'явилися в результаті розвитку обчислювальної техніки. Їх

зазвичай називають числовими методами. Спочатку виник різницьвий спосіб розв'язання диференціальних задач, зокрема і задач теорії пружності [14]. Для використання цього методу область зайняту пружним тілом спільно з границею покривають координатною сіткою, потім усі диференціальні функції, що входять у диференціальні рівняння, і граничні умови замінюють відповідною різницею у вузлах сітки. В результаті приходять до системи алгебраїчних рівнянь відносно значень функцій і її похідних у вузлах сітки.

Модифікацією методу теорії пружності є метод скінченних елементів [15]. Цей метод, на відміну від методу граничних елементів, ширше використовується в інженерній практиці, оскільки при складанні системи алгебраїчних рівнянь використовуються не тільки математичні зв'язки функцій у вузлах сітки, але і фізичні співвідношення теорії пружності. Розв'язання задачі пружності методом скінченних елементів, так само як і сітковим, зводиться до системи алгебраїчних рівнянь відносно значень функцій напружень у вузлах сітки. Точність цих методів залежить від кроку сітки. Причому зі збільшенням кількості отриманих невідомих визначальне значення виявляється шляхом рішення системи. Це пов'язано в першу чергу з тим, що порядок системи алгебраїчних рівнянь може перевищувати 10. Тому, незважаючи на діагональну структуру отриманої системи алгебраїчних рівнянь, питання збіжності і стійкості мають першорядне значення. Крім цього, поблизу кутових точок крок сітки рекомендується брати дрібнішим. Однак точних рекомендацій щодо використання цих методів для дослідників у багатьох випадках не надано.

Слід також зазначити, що метод скінченних елементів не дає можливості врахувати динамічні навантаження, що виникають при зважуванні. Ці навантаження відіграють важливу роль, особливо при зважуванні об'єктів у русі. В окремих випадках амплітуда динамічних навантажень наближається за величиною до номінального зусилля, а іноді перевищує його. Тому, якщо методом скінченних елементів НДС пружного елемента визначено неточно, то пружний елемент працюватиме в зоні пластичних деформацій, що призведе до отримання не точних результатів вимірювань, а також до руйнування пружного елемента.

Модифікація методу скінченних елементів проводиться дослідниками у різних напрямках. Так, останнім часом з'явилися роботи, пов'язані з урахуванням динамічних складових, при цьому збільшується обсяг обчислень більше ніж на

порядок [16]. Крім того, ця модифікація використовується для пружних тіл істотно відмінних від деталей датчиків сили як за формою, так і за видом навантаження.

Загальний недолік зазначених методів полягає в їх малій оперативності розв'язання оберненої задачі: за заданими обмеженнями на напруження і деформацію визначити оптимальні геометричні розміри пружних елементів. Досі такі задачі розв'язувалися методом послідовних наближень. При цьому на кожному кроці розв'язувалося пряме завдання: за заданими геометричними розмірами визначалися напруження та деформації в пружному елементі. Це робить процес визначення оптимальних геометричних розмірів пружних елементів тривалим і трудомістким. Крім того, при заданих габаритних розмірах датчика сили, цими методами неможливо було знайти ті геометричні розміри його пружного елемента, невелика зміна яких значно змінювала б показники точності вимірювання, що дало б можливість їх оптимально проектувати.

У наведених вище методах розв'язання є суттєва складність для інженерів, тому що при їх реалізації виникає самостійна проблема, вирішення якої є непростим завданням. Слід зазначити, що розв'язання конструкторських задач представленими методами здійснюється на комп'ютерах з великим обсягом оперативної пам'яті, на яких виконують автоматизовану побудову креслень за допомогою графічних пакетів програм AutoCAD або CADDY.

З урахуванням вищевикладеного, авторами статті для визначення НДС пружних елементів тензометричних датчиків сили вагових систем застосовується сучасний числовий метод розрахунку тривимірних деталей, характерних для форм пружних елементів.

При визначенні напружень та деформацій пружних елементів датчиків сили зупинимося на методі скінченних елементів, який є основою скінченно-елементного пакета ANSYS і дозволяє проектувати конструкції силовимірювачів при зміні навантажень в широкому діапазоні [17, 18].

Метою дослідження є визначення напружено-деформівного стану перспективних конструкцій пружних елементів датчиків сили у вигляді тіл циліндричної форми з вирізами.

Визначення НДС пружних елементів тензорезисторних датчиків сили

Розглянемо розрахунок двох типів пружних елементів – широко відомий фахівцям, у вигляді тіла обертання, та розроблений авторами статті – у вигляді тіла циліндричної форми з вирізами.

Визначення параметрів НДС пружного елемента у вигляді тіла обертання

Визначення напружень у деталях пружного елемента відомими методами прикладної теорії пружності не досить точний, у зв'язку з тим, що не враховує реальну форму об'єкта дослідження, його особливості та спосіб передачі зусилля від зовнішнього навантаження. В таких розрахунках плита вважається тілом обертання з постійною або лінійно-змінною жорсткістю.

Матеріал пружного елемента має достатньо високі механічні характеристики, і тому з урахуванням якості виготовлення таких товстостінних відповідальних деталей допустимі напруження приймалися достатньо низькими (для забезпечення запасу міцності).

Вихідні параметри та дані для моделювання і розрахунку пружного елемента розглядалися для 5-ти тонного датчика сили.

Алгоритм розрахунку пружного елемента у вигляді тіла обертання детально представлений авторами у роботі [19]. Алгоритм підходить і для розрахунку пружного елемента у вигляді тіла циліндричної форми з вирізами.

Загальний вигляд пружного елемента датчика сили представлений на рис. 2.

Будуємо геометричну модель деталі – це один із найбільш трудомістких етапів у рішенні прикладних задач (рис. 3).

Скінченно-елементний пакет ANSYS має на оснащенні засоби тривимірного моделювання.

Процедура генерації сітки вузлів і елементів складається з трьох основних етапів:

1. Задавання типів елемента і його опцій (обрано тривимірний тетрагональний елемент SOLID 92 з 10 вузлами, рис. 4).

2) Встановлення режиму контролю за побудовою сітки.

3) Побудова сітки.

При створенні сітки скінченних елементів використано вільне розбиття на тетрагональні елементи (рис. 5).

Етап розв'язання починається із задавання граничних умов, вибору методу та параметрів розрахунку. До граничних умов відносяться переміщення та прикладені навантаження (тиск, зосереджені сили, розподіленні навантаження).

Після того, як усі відповідні параметри задані, виконуємо і саме рішення. По команді SOLVE програма звертається за інформацією про модель і навантаження до бази даних і виконує обчислення. Програмою виконується розв'язання визначальних рівнянь і одержання результатів для обраного виду аналізу. В обчислювальному відношенні це найінтенсивніша частина аналізу.



Рисунок 2 – Загальний вигляд пружного елемента

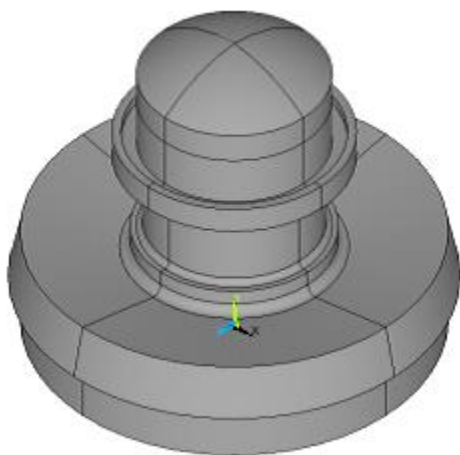


Рисунок 3 – Геометрична модель пружного елемента

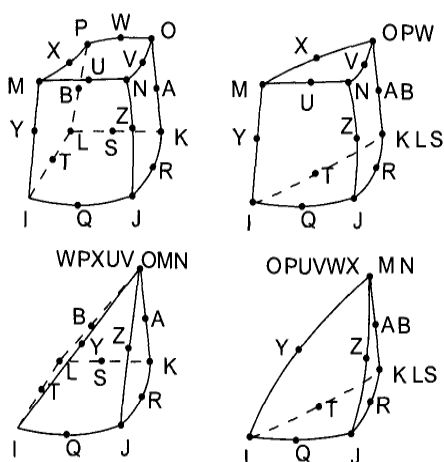


Рисунок 4 – Тетрагональний елемент SOLID 92 з виродженими формами

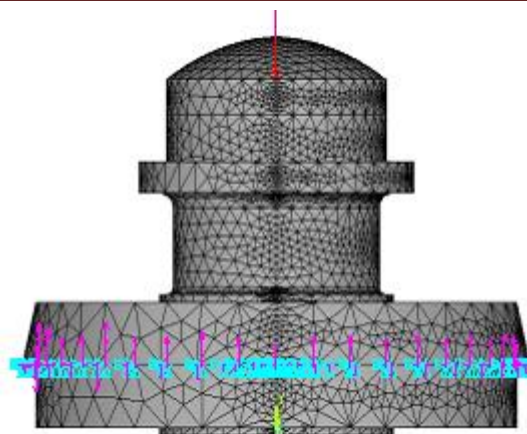


Рисунок 5 – Скінченно-елементна модель з граничними умовами

Розв'язок включає значення вертикальних переміщень (рис. 6), еквівалентних напружень (рис. 7) та деформацій. Підсумком роботи програми є отримання результатів як в табличній, так і в графічній формі.

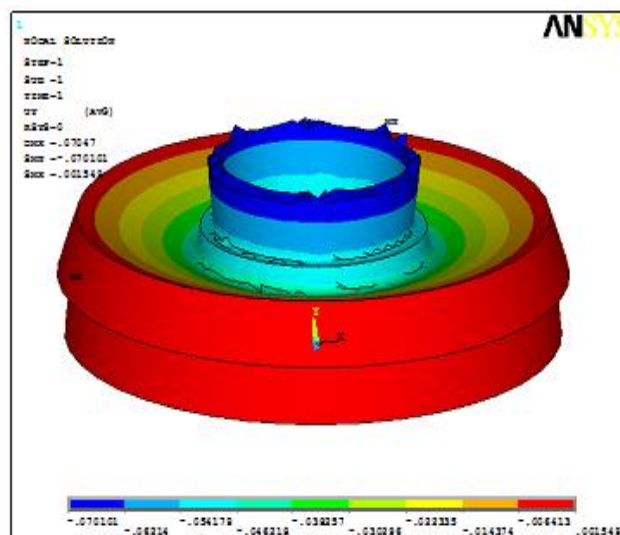


Рисунок 6 – Вертикальні переміщення в пружному елементі датчика сили

Аналіз результатів дослідження НДС пружного елемента датчика сили у вигляді тіла обертання отриманих методом комп'ютерного моделювання показує, що міцність стінок пружного елемента забезпечується. Однак, при цьому спостерігається нерівномірність розподілу напружень по висоті елемента, що не задовольняє умовам рівномірності конструкції.

Міцність плоскої частини плити забезпечена, що впливає з проведеного авторами порівняння максимальних напружень із границею текучості матеріалу.

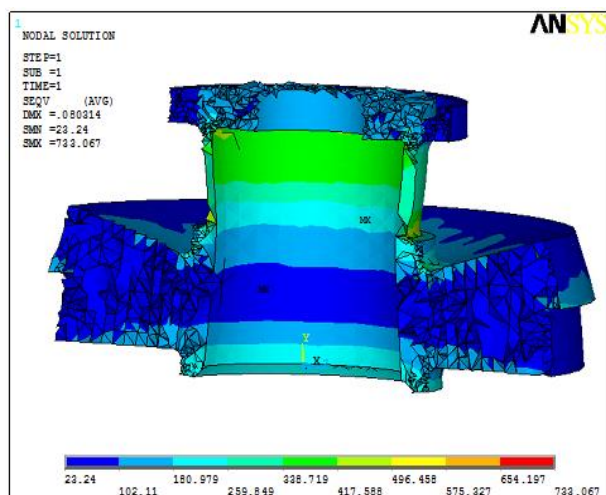


Рисунок 7 – Еквівалентні напруження за гіпотезою Губера-Мізеса

Визначення параметрів НДС пружного елемента циліндричної форми з вирізами

Авторами статті розроблена перспективна конструкція тензометричного датчика сили, який містить аналого-цифровий перетворювач (АЦП) із індикаторами температури та положення, а в

центральної частині пружного елемента датчика сили виконані два не наскрізних отвори, всередині яких на мінімальній відстані до осі симетрії пружного елемента датчика (зона максимальних деформацій) наклеєні тензорезистори. Вони захищені від пошкоджень двома кришками, які встановлені на зовнішній поверхні датчика. Кришки захищають тензорезистори від механічних пошкоджень та дають можливість доступу для проведення ремонтних робіт.

Завдяки тому, що конструкція датчика сили містить АЦП з індикаторами температури та положення, є можливим введення температурної компенсації і знімання інформації про положення датчика сили, перевірки та калібрування.

Розміщення тензорезисторів на мінімальній відстані до осі симетрії пружного елемента дозволяє знизити вплив негативних факторів на точність та стабільність показників вимірювань.

Конструкція тензометричного датчика сили приведена на рис. 8.

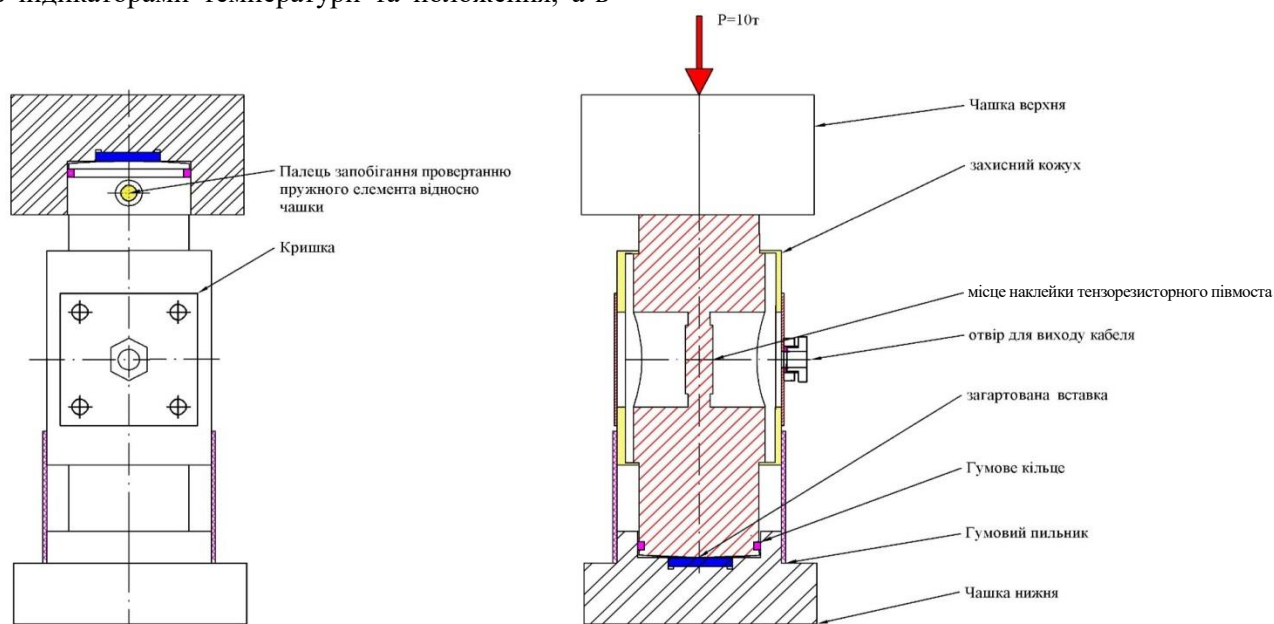


Рисунок 8 – Тензометричний датчик сили з пружним елементом циліндричної форми з вирізами

Датчик виготовляється з нержавіючої сталі 40Х13, пружний елемент має в нижній частині кругові канавки для гумових кілець, які центрують датчик в чашках та закривають від потрапляння бруду в робочу зону пружного елемента та захищають від руйнування мастило. У верхній частині пружного елемента зроблений отвір, в який через верхню чашку вставляється палець, він запобігає провертанню пружного елемента відносно самої чашки. Корпус датчика

кріпиться до пружного елемента на стадії виготовлення, маючи два отвори, які закриваються за допомогою кришок та чотирьох болтів після повного складання тензорезисторного датчика сили – наклеєні тензорезисторів та підключення плати АЦП. Плата АЦП містить датчик температури для автоматичного виконання температурної компенсації і датчик положення, який інформує про положення датчика сили, його перевірки та

калібрування. Верхня та нижня чашки мають загартовані вставки, що дає змогу виготовлення чашок без загартування, а в разі необхідності, проводити заміну вставок.

Навантаження P прикладається в середній частині датчика сили, при цьому відбувається стиснення пружного елемента, яке сприймається приклеєними тензорезисторами (решітками) у місцях вказаних на рис. 8. Деформація цих тензорезисторів приводить до зміни їх опору,

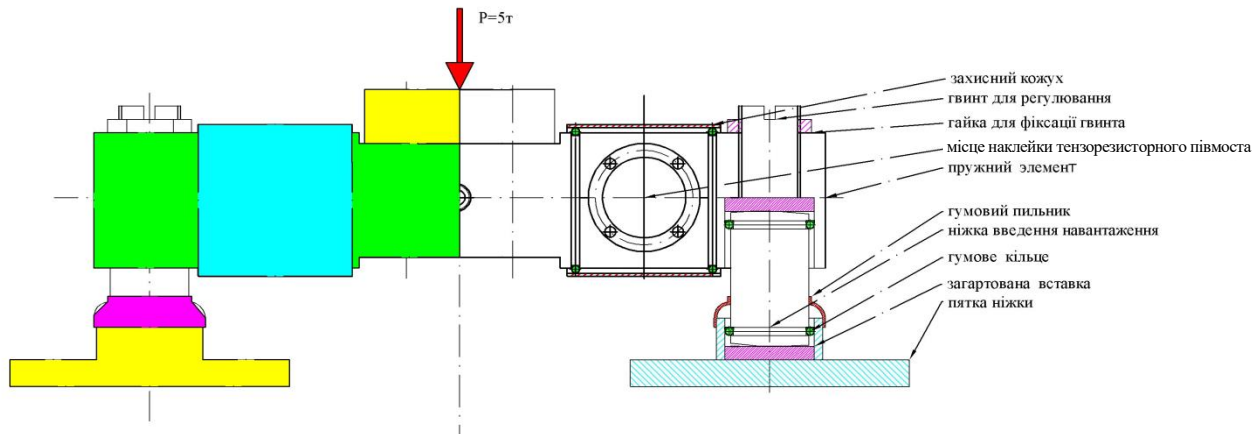


Рисунок 9 – Датчик ваги двохопорий

Особливостями датчика ваги двохопорий є:

- наявність двох ніжок обпирання з можливістю регулювання по висоті;

- ніжки виконані так, щоб зберігати висоту при переміщенні;

- гумові кільця на двох ніжках забезпечують центрування та захищають від потрапляння бруду в місця введення навантаження;

- датчик містить два вимірювальні мости і плату АЦП із індикаторами температури та положення, останній інформує про положення датчика, а також має можливість калібрування та передавання даних в одиницях сили або ваги.

Навантаження P прикладається в середній частині датчика, по краю датчик опирається на ніжки, при цьому відбувається згин пружного елемента датчика сили, це згинання сприймають приклеєні у відповідних місцях вимірювальні решітки, деформація яких приводить до зміни опору решіток, який опрацьовує АЦП, і на виході ці зміни надаються в одиницях сили або ваги.

Перевагами такої конструкції датчика сили є те, що при обпиранні на дві ніжки вимоги до кріплення датчика спрощуються у зв'язку з тим, що навантаження вводиться прямо по центру датчика, на відхилення навантаження від осі введення навантаження також протидіють ніжки, які зберігають місце обпирання датчика ваги при

який опрацьовує АЦП та на виході показує цю зміну в одиницях ваги чи сили.

Аналоги мають подібні особливості, але не в поєднанні. Наявність датчиків сили з доступом до решітки і АЦП в літературі не відома, зазвичай вони закриті або заварені.

Застосування різновидності конструкції датчика сили (двохопорий) показано на прикладі силовимірювальної вагової системи (рис. 9).

переміщенні від навантаження, так як вони виконані у вигляді обрізаних шарів. Ніжки датчика ваги спираються на загартовані вставки, які, за необхідності, можна замінювати (вони є найбільш навантаженими за контактного впливу).

Аналоги датчиків ваги виконані на одній ніжці або з подвійним спиранням, але без ніжок, та введенням навантаження через перехідну деталь, що принципово їх відрізняє.

Для розв'язання фізичної задачі числовим методом будемо геометричну модель датчика сили (рис. 10).

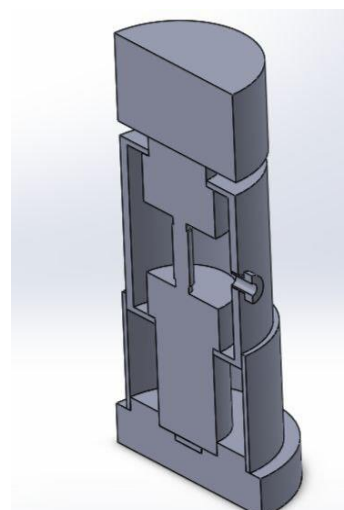


Рисунок 10 – Геометрична модель пружного елемента

Результати комп'ютерного дослідження представлені на рис. 11 – 13.

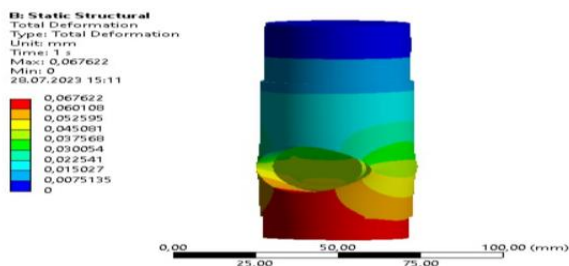


Рисунок 11 – Сумарні переміщення

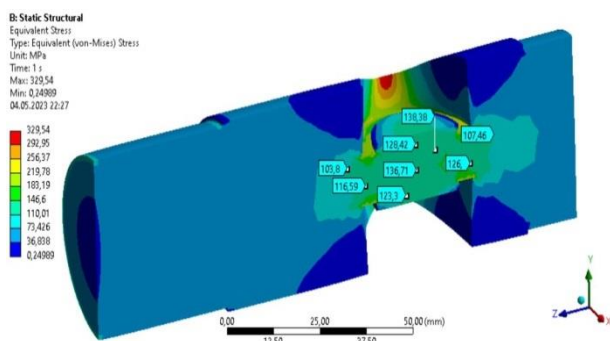


Рисунок 12 – Поля напружень в місці установки тензометрів

Висновки

Проведено аналіз методів розрахунку НДС пружних елементів датчиків сили. Показано, що одним із ефективних методів визначення НДС елементів датчиків ваги є метод скінченних елементів – основа скінченно-елементного пакета ANSYS, який дозволяє проєктувати конструкції силовимірювачів при зміні навантажень в широкому діапазоні.

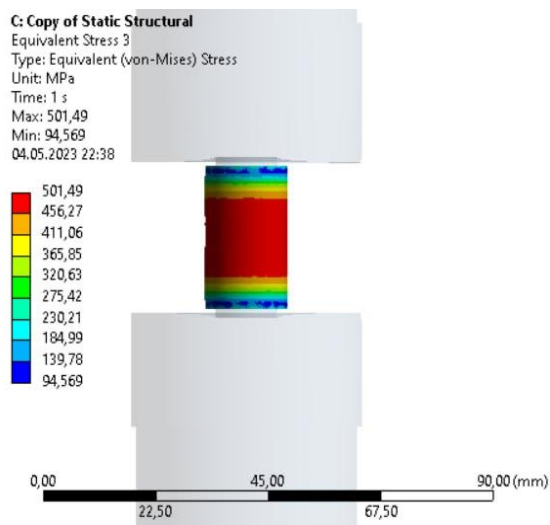


Рисунок 13 – Поля еквівалентних напружень за гіпотезою Губера-Мізеса

Розроблена нова конструкція датчика сили, який містить аналого-цифровий перетворювач з індикаторами температури і положення, а в центральній частині пружного елемента датчика сили виконані два не наскрізних отвори, всередині яких на мінімальній відстані до осі симетрії пружного елемента наклеєні тензорезистори захищені від пошкоджень двома кришками, які встановлені на зовнішній поверхні датчика.

Розроблена нова конструкція датчика сили з пружним елементом на двох ніжках обпирання, який містить два вимірювальні мости та плату АЦП, яка включає датчик температури і датчик положення, що інформує про положення датчика, можливість калібрування та передавання даних в одиницях сили або ваги.

Побудовано тривимірну скінченно-елементну модель високошвидкісного деформування та розділення частин пружного елемента датчика сили. Модель враховує нелінійний розподіл НДС за товщиною оболонкової конструкції та вплив швидкості деформації на механічні властивості конструкційного матеріалу. Критерієм локального руйнування матеріалу є граничне значення пластичної деформації. Модель реалізовано в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу ANSYS.

Аналіз результатів дослідження НДС пружного елемента датчика сили циліндричної форми з вирізами, показує, що оптимально вибрано місце розміщення тензорезисторів на мінімальній відстані до осі симетрії пружного елемента, в зоні максимальних деформацій, що дозволяє знизити вплив негативних факторів на точність та стабільність результатів вимірювань.

Список використаних джерел

1. Голованов В. К., Дашенко А. Ф., Коломиец Л. В. Конструкционная прочность предохранительных и силоизмерительных устройств. Одесса: Астропринт, 1997. 144 с.
2. Рвачёв В. Л., Синекон Н. С. Метод R-функций в задачах теории упругости и пластичности. К.: Наукова думка, 1990. 216 с.
3. Дудик М. В., Діхтяренко Ю. В. Сучасні методи теорії пружності. Умань, ПП «Жовтий», 2015. 108 с.
4. Долгов О. М., Колосов Д. Л. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. 70 с.
5. Хомик Н. І., Довбуш Т. А., Рубінець Н. А. Опір матеріалів (спецкурс) і основи теорії пружності і пластичності. Тернопіль: ФОП

Паляниця В. А., 2017. 232 с.

6. Карбованець М. І., Лазур В. Ю. Методи математичної фізики. Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2019. 74 с.

7. Довгий Б. П., Ловейкін А. В., Вакал Є. С., Вакал Ю. Є. Сплайн-функції та їх застосування К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016. 117 с.

8. Лопушанська Г. П., Пасічник О. В. Інтегральні рівняння і застосування. Львів, Львівський національний університет імені Івана Франка, 2022. 111 с.

9. Попов Г. Я. Концентрація упругих напружень возле штампов, розрезів, тонких включень и підкрплень. М.: Наука, 1982. 344 с.

10. Оробей В. Ф., Дашченко А. Ф., Лимаренко А. М. Метод граничних елементів в задачах с неустойчивыми рішеннями. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2013. № 2. С. 27-31.

11. Оробей В. Ф., Дашченко О. Ф., Коломієць Л. В., Лимаренко О. М. Метод граничних елементів в задачах стійкості плоскої форми вигину балок прямокутного перерізу. Збірник наукових праць *Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. Одеса, 2015. Вип. 2 (7). С. 47-55.

12. Brebbia, C. A. and Ferrante, A. J. (1983). *Computational Hydraulics* (1st ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-04049-2>.

13. Майборода В. С., Бобіна М. М., Лоскутова Т. В., Мініцька Н. В. Основи механіки руйнування. К.: НТУУ КПІ, 2010. 124 с.

14. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 552 с.

15. Карпіловський В. С. Метод скінченних елементів і задачі теорії пружності. Київ: «Софія А», 2022. 275 с.

16. Попов В. О., Курдибаха В. М., Грицун О. В. Моделювання будівельних конструкцій суднонавантажувача під дією кліматичних впливів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Вип 26, № 1. С. 13-16.

17. Оробей В. Ф., Анискин А., Дашченко А. Ф., Коломієць Л. В., Лимаренко А. М., Солдо Б. Метод граничних елементів в задачах расчета машиностроительных конструкций. Одесса: ФОП Бондаренко М. А., 2016. 764 с.

18. Гришанова І. А., Згуровська Л. П., Киричук Ю. В. Розв'язок задач проєктування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. 180 с.

19. Лимаренко О. М., Хамрай В. В., Пономаренко А. А., Балтянський І. В. Визначення параметрів напружено-деформованого стану пружного елемента силовимірювача числовим методом. *Підйомна техніка*. 2022, № 12. С. 12-13.

References

1. Golovanov V. K., Dashhenko A. F., Kolomiec L. V. *Konstrukcionnaja prochnost' predohranitel'nyh i siloizmeritel'nyh ustrojstv*. Odessa: Astroprint, 1997. 144 s.

2. Rvachjov V. L., Sinekop N. S. *Metod R-funkcij v zadachah teorii uprugosti i plastichnosti*. K.: Naukova dumka, 1990. 216 s.

3. Dudyk M. V., Dikhtiarenko Yu. V. *Suchasni metody teorii pruzhnosti*. Uman, PP «Zhovtyi», 2015. 108 s.

4. Dolhov O. M., Kolosov D. L. *Mekhanichni vlastyvoli ta konstruktsiina mitsnist materialiv*. Dnipro: NTU «Dniprovska politehnika», 2022. 70 s.

5. Khomyk N. I., Dovbush T. A., Rubinets N. A. *Opir materialiv (spetskurs) i osnovy teorii pruzhnosti i plastichnosti*. Ternopil: FOP Palianytsia V. A., 2017. 232 s.

6. Karbovanets M. I., Lazur V. Yu. *Metody matematychnoi fizyky*. Uzhhorod: Vydavnytstvo UzhNU «Hoverla», 2019. 74 s.

7. Dovhyi B. P., Loveikin A. V., Vakal Ye. S., Vakal Yu. Ye. *Splain-funktsii ta yikh zastosuvannia*. K.: Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr «Kyivskiy universytet», 2016. 117 s.

8. Lopushanska H. P., Pasichnyk O. V. *Intehralni rivniannia i zastosuvannia*. Lviv, Lvivskiy natsionalnyi universytet imeni Ivana Franka, 2022. 111 s.

9. Popov G. Ja. *Koncentracija uprugih naprjazhenij vozle shtampov, razrezov, tonkih vkljuchenij i podkreplenij*. M.: Nauka, 1982. 344 s.

10. Orobei V. F., Dashhenko A. F., Limarenko A. M. *Metod granichnyh jelementov v zadachah s neustojchivymi reshenijami*. *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu*. 2013. # 2. S. 27-31.

11. Orobei V. F., Dashchenko O. F., Kolomiiets L. V., Lymarenko O. M. *Metod hranychnykh elementiv v zadachakh stiikosti ploskoi formy vyhynu balok priamokutnoho pererizu*. *Zbirnik naukovih prac' Odes'koj derzavnoi akademii tehničnogo reguluvannâ ta âkosti*. Odesa, 2015. Vyp. 2 (7). S. 47-55.

12. Brebbia, C. A. and Ferrante, A. J. (1983). *Computational Hydraulics* (1st ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-04049-2>.

13. Maiboroda V. S., Bobina M. M., Loskutova T. V., Minitska N. V. *Osnovy mekhaniky ruinuвання*. K.: NTUU KPI, 2010. 124 s.

14. Samarskij A. A. *Vvedenie v teoriju raznostnyh shem*. M.: Nauka, 1971. 552 s.

15. Karpilovskiy V. S. *Metod skinchennykh elementiv i zadachi teorii pruzhnosti*. Kyiv: «Sofia A», 2022. 275 s.

16. Popov V. O., Kurdybakha V. M., Hrytsun O. V. *Modeliuvannya budivelnykh konstrukttsii sudnonavantazhuvacha pid diieiu klimatychnykh vplyviv. Suchasni tekhnologii, materialy i konstrukttsii v budivnytstvi*. 2019. Vyp 26, # 1. S. 13-16.

17. Orobej V. F., Aniskin A., Dashhenko A. F., Kolomiec L. V., Limarenko A. M., Soldo B. *Metod granichnyh jelementov v zadachah rascheta*

mashinostroitel'nyh konstrukcij. Odessa: FOP Bondarenko M. A., 2016. 764 s.

18. Hryshanova I. A., Zghurovska L. P., Kyrychuk Yu. V. *Rozviazok zadach proiektuvannya prykladiv ta system z vykorystanniam ANSYS i MATHCAD: pidruchnyk*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politekhnik», 2022. 180 s.

19. Lymarenko O. M., Khamrai V. V., Ponomarenko A. A., Baltianskyi I. V. *Vyznachennia parametriv napruzhenno-deformovanoho stanu pruzhnogo elementu sylovymiriuvacha chyslovym metodom. Pidionna tekhnika*. 2022, # 12. S. 12-13.

Надійшла до редакції 20.04.2023

УДК 621.317

В. П. Квасніков¹, д.т.н., **Г. Д. Братченко²**, д.т.н., **Д. М. Квашук¹**, к.е.н.

¹Національний авіаційний університет, м. Київ

²Військова академія (м. Одеса), м. Одеса

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНИХ МОМЕНТІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА БАЗІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Використання теорії нечітких змінних в метрології відкриває нові можливості для врахування неформалізованої інформації про джерела невизначеності при вимірюванні різних механічних величин. Особливо це актуально при визначенні похибок обертальних параметрів електродвигунів. У статті розглядається новий підхід до оцінювання точності вимірювань, який виходить за рамки традиційних методів вимірювання. Зокрема, зосереджено увагу на задачі оцінювання належності вимірювань обертальних моментів електродвигунів до невизначеності. Так, кожне вимірювання супроводжується похибкою, що має, як систематичну, так і випадкову складові. Оскільки точне значення результатів вимірювання не може бути відоме в рамках діапазону, який обмежений класом точності приладу, у статті запропоновано розглядати істинне значення вимірюваної величини як нечітку змінну, що дозволило розширити уявлення про невизначеність вимірювання. У статті здійснено спробу оцінити наближену точність вимірювань обертальних параметрів електродвигунів за допомогою спеціально розробленої функції належності. Практичне застосування цього методу дозволяє оцінити належність результатів вимірювань у різних режимах роботи електродвигунів до діапазону невизначеності. Для більш детального аналізу цієї проблеми у статті наведено приклад розв'язання подібних задач з використанням теорії можливостей та теорії нечітких множин, що дозволило краще враховувати невизначеності обертальних параметрів електродвигунів та визначити подальші шляхи розвитку цієї проблеми.

Ключові слова: теорія нечітких множин, нечіткі змінні, обертальний момент, кутова швидкість, кутове прискорення, метод вимірювання, сенсор, потужність, дестабілізуючі фактори, інформаційна система.

V. P. Kvasnikov, DSc, **H. D. Bratchenko**, DSc, **D. M. Kvashuk**, PhD

ESTIMATION OF MEASURING UNCERTAINTY OF ELECTRIC MOTORS TORQUES USING THE THEORY OF FUZZY SETS

The use of the theory of fuzzy variables in metrology opens up new opportunities for taking into account informal information about the sources of uncertainty in the measurement of various mechanical quantities. This is especially relevant when determining errors in the rotational parameters of electric motors. This

article discusses a new approach to measurement accuracy assessment that goes beyond traditional measurement methods. In particular, attention is focused on the task of assessing the reliability range of measurements of rotational parameters of electric motors within a certain accuracy class. Each measurement is accompanied by an error that has both systematic and random components. Since the exact value of the measurement results cannot be known within the range that is limited by the accuracy class of the device, the article proposes to consider the true value of the measured value as a fuzzy variable, which allowed getting a better idea of the uncertainty of the measurement. In the article, an attempt was made to estimate the approximate accuracy of measurements of rotational parameters of electric motors using a specially developed membership function. The practical application of this method makes it possible to assess the reliability of measurements in different modes of operation of electrode benders. For a more detailed analysis of this problem, the article provides examples of solving similar problems using the theory of possibilities and the theory of fuzzy sets, which made it possible to better take into account the uncertainties of the rotational parameters of electric motors and determine further ways of developing this problem.

Keywords: fuzzy set theory, fuzzy variables, torque, angular velocity, angular acceleration, measurement method, sensor, power, destabilizing factors, information system.

DOI 10.32684/2412-5288-2023-1-22-23-34

Вступ

В метрологічних задачах математична обробка здійснюється традиційними методами статистики, а теорія нечітких множин використовується для обробки слабо формалізованої інформації та уточнення результатів. Тому, необхідність втілити в традиційні методи метрології нечіткі змінні, враховуючи специфіку обробки результатів вимірювань та прийняті метрологічні норми, є задачею багатьох дослідників.

Кожне вимірювання супроводжується похибкою, що являє собою комбінацію систематичної та випадкової складових. Ці складові, так само як і істинне значення вимірюваної величини, можна інтерпретувати та представити як нечіткі змінні. Застосування такого підходу може бути корисним у метрологічному супроводі математичної обробки результатів прямих вимірювань, а також при розрахунку характеристик похибок комплексних вимірювальних засобів.

Похибки можуть бути формалізовані, як нечіткі змінні з допомогою спеціально розробленої функції належності, що повністю відповідає поточній системі вимірювальних нормативів.

Таким чином, засоби та методи теорії нечітких множин можуть використовуватись для обробки погано формалізованої інформації та уточнення результатів, які знаходяться в діапазоні невизначеності. З цього випливає необхідність дослідження такої невизначеності, яка може значною мірою збільшуватись в залежності від умов вимірювання динаміки зміни вимірюваної величини, класу точності вимірювальних приладів. тощо.

Значною мірою це стосується вимірювання обертальних моментів електричних двигунів (ЕД), де зазначені проблеми спостерігаються в залежності від швидкості обертання валу, меха-

нічного опору, електричних параметрів, температурних режимів, вібрації та інших дестабілізуючих факторів, які впливають на точність вимірювання.

В такому випадку, постає необхідність розширення традиційних метрологічних методів вимірювання в рамках теорії нечітких змінних.

Аналіз публікацій та досліджень

Існують пропозиції з використанням нечітких змінних для об'єднання сигналів декількох датчиків одного вимірюваного параметра в інтелектуальних інформаційно-вимірювальних системах (ІВС) [1]. Але для цього потрібні додаткові інформативні параметри. За їх відсутності, або неможливості отримання, залишається сфера дослідження невизначеності, яка і обумовила інтерес до даної проблеми, оскільки похибка вимірювання та істинне значення вимірюваної величини можна розглядати, як нечіткі змінні.

Априорна інформація про об'єкт вимірювання важлива при математичній обробці даних в ІВС та при оцінці характеристик похибок. Ця інформація часто виражається у нечіткій формі. Тому, для адаптації теорії нечітких змінних до завдань теорії та практики вимірювань, необхідно уточнити деякі моменти. Наприклад, результати багаторазових вимірювань, що спотворені випадковими похибками та їх подальше усереднення мають призвести до зменшення інтервалу невизначеності. Крім того, нечітка формалізація характеристик інструментальної похибки засобів вимірювання, або вимірювальних модулів ІВС не повинна призвести до змін у методах нормування та експериментального визначення цих характеристик.

Автори статті [2] намагаються подолати розбіжність між традиційними засобами вимірювань та вимірюваннями з використанням нечіткої

логіки, реалізувавши традиційні метрологічні методи в рамках теорії нечітких змінних. Реалізують це з використанням нечітких змінних, враховуючи специфіку обробки результатів вимірювань та прийнятих метрологічних норм.

Дане дослідження спрямоване на вивчення діапазону невизначеності та враховує можливість опису похибки вимірювальних приладів за допомогою нечітких множин, що не суперечить традиціям метрології та відповідає сучасним вимогам до обробки інформації.

Разом з тим, результати отримані в даній роботі більше стосуються одиночних вимірювань при незмінних умовах, які характеризують точність такого вимірювання, в той час, як вимірювання динамічних параметрів, наприклад механічного моменту електродвигуна обумовлено зміною точності в різних умовах роботи (під час запуску, під час гальмування, в умовах вібрації, в умовах підвищених температур, тощо)

Тому, для окремих випадків використання вимірювальних засобів необхідне уточнення, як класу точності приладу, так і наближеного діапазону достовірності вимірювань в різних режимах роботи.

Результати прямих вимірювань зазвичай проходять математичну обробку, яка здійснюється за допомогою арифметичних операцій. Важливо не лише отримати результат вимірювання, але й визначити інтервал невизначеності цього значення. В рамках цього підходу до інтерпретації значення вимірюваної величини, як нечіткого числа, необхідно визначити функцію належності результату математичної обробки та інтервал невизначеності вимірюваної величини.

В теорії нечітких змінних існує декілька правил визначення функції належності результатів математичних операцій над нечіткими числами. Наприклад, автори статті [3] обирають найбільш зручне для їхнього дослідження, де функція належності розглядається, як ймовірність того, що суб'єкт, що приймає рішення, віднесе певне значення до певної множини значень.

Відома теорія можливостей характеризує особливий тип невизначеності та розглядається як альтернативна теорії ймовірностей. Вперше її ввів професор Лотфі Заде (Lotfi Zadeh) у 1978 році як розширення теорії нечітких множин [4]. У 1990 році Д. Дюбуа та А. Прад представили окремі уточнення до теорії можливостей пов'язані з обробкою та аналізом невизначеності у різноманітних сферах [5].

Традиційні методи, зокрема, теорія ймовірностей, не завжди є оптимальними для розуміння невизначеності. Саме тому актуальність нового підходу, що базується на поняттях нечітких

множин, мір вірогідності не можна недооцінювати. Так, нечіткі множини дозволяють моделювати невизначеність в тих ситуаціях, коли інформація є неповною, неточною, або контекстуальною. Такий підхід дозволяє гнучко враховувати різні ступені впевненості у точності вимірювань. Це, в свою чергу, дає інструментарій для кількісного оцінювання невизначеності, відходячи з дискретних категорій її оцінки, таких як «істинно» або «невірно». Такий підхід взаємодіє з методологією інтервального аналізу [6], що забезпечує додаткову гнучкість при обробці даних, які мають широкі межі невизначеності.

Так, можливість події, на відміну від ймовірності, яка оцінює частоту її появи в регулярно-стохастичному експерименті, орієнтована на відносну оцінку істинності цієї події. Тобто, змістовно показник може бути оцінений, як більше, менше, або дорівнює істинному значенню. Разом з цим, можливість події виключає подійно-частотну інтерпретацію (на відміну ймовірності), яка пов'язує її з експериментом.

Хоча й теорія можливостей дозволяє математично моделювати реальність з урахуванням фактів, знань, гіпотез, суджень, тощо, проте її застосування в процесі оцінювання невизначеності, яка знаходиться в діапазоні похибки, складно реалізувати, оскільки потрібні певні критерії, отримати які можливо використовуючи теорію ймовірності.

При представленні похибки нечіткою змінною логічно трактувати значення рівня довіри як ступінь впевненості, що інтервал повністю покривається інтервалом можливих значень похибки або проміжком заданої ймовірнісної міри. За такого тлумачення зберігається принцип інтервального опису характеристик похибки. В свою чергу вкладені інтервали визначають множини можливих значень повної похибки при заданому рівні довіри.

В роботі [7] досліджується концепція вимірювання з використанням нечітких множин та отримання базових чітких значень шляхом визначення більш точного діапазону невизначеності. Розглядаються як швидкісні, так і точнісні особливості нечіткої метрології.

Дослідження спрямовані на поєднання стандартних метрологічних інструментів та нечітких змінних з використанням теорії нечітких множин уособлені в роботі [8], де вони застосовуються для визначення неточностей поверхонь при застосуванні координатно-вимірювальних машин.

Більш сучасні дослідження спрямовані на збільшення точності вимірювань, з використанням засобів штучного інтелекту, тобто паралельно із методами математичного аналізу невизна-

ченості розвиваються і засоби машинного навчання та нейронні мережі. Так, в роботі [9] застосовуються методи аналізу інтерференційних смуг з використанням теорії нечітких множин, що дозволило на основі обробки великих масивів даних оптимізувати вибір критеріїв достовірності функції належності.

Дослідження спрямоване на оцінку невизначеності вимірювання, засноване на процедурі калібрування та на оцінці коефіцієнтів статичних характеристик, показало можливість оптимізації процедури калібрування датчиків на основі змодельованих даних [10]. Для визначення адекватності моделі застосовувалась нечітка логіка.

Загалом застосування нечіткої логіки в метрології носить суто індивідуальний характер, що зводиться до обробки отриманих результатів вимірювань. Залежно від типу невизначеності вчені намагаються збільшити точність, розподілити дані, опрацювати гіпотезу.

Наприклад, в роботі [11] було представлено метод обробки випадково спотворених даних. Для візуалізації таких спотворень, були розроблені гістограми. Запропоновано простий спосіб оцінки невизначеності вимірювань на основі нечіткої логіки.

В роботі [12] запропоновано новий підхід до моделювання з використанням моделі Takagi–Sugeno (T-S) для обробки метрологічних затримок. Основна перевага цього підходу полягає в тому, що він не вимагає знань про точні значення стохастичних затримок і може бути застосований в ситуаціях, які включають всі можливі затримки. На основі моделі T-S та алгоритму оцінювання перешкод отримані середнє значення та дисперсія виходу запропонованої моделі. Зважаючи на застосування в цьому випадку статистичного підходу, нечітка логіка була використана для підтвердження правильності моделі T-S.

Відомі дослідження, які висвітлюють впровадження результатів обробки вимірювальної інформації у приладові системи [13-15]. Заслугує уваги праця [16], де розглядається застосування нечіткого логічного контролера в системі теплообмінника з метою регулювання температури рідини на виході. Дослідження показало, що нечітке керування є більш ефективним у порівнянні з традиційним ПІД-регулюванням.

Разом з тим, основна сфера застосування нечіткої логіки в метрології присвячена аналізу похибок засобів вимірювань.

Метою роботи є оцінювання невизначеності результатів вимірювань оберտальних моментів електродвигунів з використанням методів теорії нечітких множин.

Основна частина

Вимірювання обертальних параметрів електродвигунів пов'язані із похибками, які можуть виникнути внаслідок механічних, електричних та інших факторів. Для їх аналізу необхідно мати статистичні дані, отримані в результаті реальної роботи вимірювального приладу, або моделюючий комплекс, що може відтворити динамічні процеси, які характеризують роботу електродвигуна по відомим динамічним законам. Так, на рис. 1 представлено модель вимірювання кутової швидкості колекторного електродвигуна постійного струму, функція перетворення вимірювального каналу якого, має наступний вигляд

$$W_y(s) = \frac{I_y(s)}{U_y(s)} = \frac{k_I s}{(T_m T_e s^2 + T_m s + 1)}, \quad (1)$$

$$\text{де } T_m = \frac{J R_y}{C_w C_e} - \text{механічна постійна часу}$$

двигуна;

$$T_e = \frac{L_y}{R_y} - \text{електротехнічна постійна часу}$$

роботи двигуна;

$$k_I = \frac{J}{C_w C_e} - \text{коефіцієнт передачі по стру-$$

му;

I_y – струм в якірному колі ЕД;

R_y – опір якірного кола, що рівний сумі опору якірних обмоток ЕД та вхідного опору підсилювача, Ом;

L_y – сума індуктивностей якірного кола двигуна та вихідного кола підсилювача, Гн;

J – момент інерції якоря, Н·м²;

C_e – коефіцієнт моменту сили, Н·м;

C_w – швидкості, В·с/рад;

s – оператор Лапласа;

U_y – напруга.

Технічні характеристики двигуна, для якого проведено моделювання наведено в технічній документації [17].

Структурна схема електродвигуна представлена на рис. 1.

Перехідну характеристику швидкості обертання отримано використовуючи програмну бібліотеку control, що дозволяє моделювати лінійні системи [18].

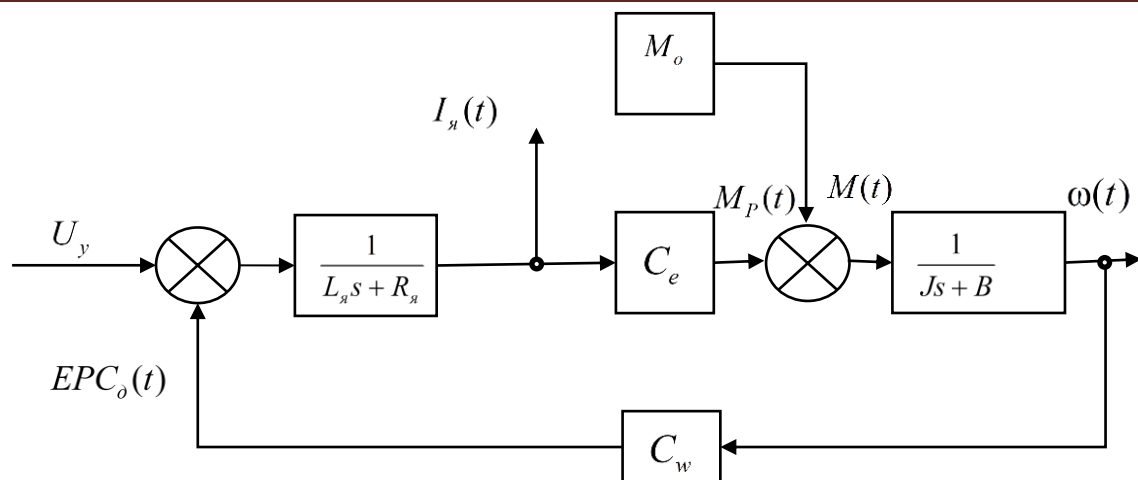


Рисунок 1 – Структурна схема колекторного двигуна постійного струму, де EPC_o – зворотна ЕРС двигуна; M_o, M_p, M – момент опору, рушійний момент, загальний момент прикладений до валу ротора; B – коефіцієнт тертя

Програмний код для реалізації моделювання представлено нижче:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import control as ctrl
# Задаємо параметри системи
L = 0.5 # Індуктивність
R = 1.0 # Опір
K = 0.3 # Коефіцієнт моменту сили
J = 0.09 # Момент інерції
B = 0.1 # Коефіцієнт тертя
# Задаємо передатні функції
G1 = ctrl.TransferFunction([1], [L, R])
G2 = ctrl.TransferFunction([K], [1])
G3 = ctrl.TransferFunction([1], [J, B])
# Задаємо зворотній зв'язок (по швидкості)
H = ctrl.TransferFunction([1], [1])
# З'єднуємо системи в ланцюг
system = ctrl.series(G1, G2, G3) # G1 -> G2 -> G3
```

```
closed_loop_system = ctrl.feedback(system, H)
# Задаємо вхідний сигнал (ступінчаста функція)
time = np.linspace(0, 10, 1000)
# Розраховуємо перехідну характеристику
t, y = ctrl.forced_response(closed_loop_system,
T=time, U=4800)
# Графік
plt.figure()
plt.plot(t, y, 'r')
plt.xlabel("Час, с")
plt.ylabel("Швидкість обертання, об./хв")
plt.grid(True)
plt.show()
```

Моделювання такої системи може бути використано для вивчення електричних параметрів двигуна. Схожий підхід використовувався і в роботі [19], де описано зв'язок між ковзанням у підшипниках та струмом статора:

$$s = \frac{R'_2 \left(X_\mu^2 R_1 I_1^2 - U_1^2 R_1 + \sqrt{-U_1^4 X_k^2 - U_1^4 X_\mu^2 - 2U_1^4 X_k X_\mu + (2U_1^2 X_k^2 X_\mu^2 - U_1^2 X_\sigma^4 + 2U_1^2 X_\mu^3 X_k) I_1^2 - X_\mu^4 X_k^2 I_1^4} \right)}{U_1^2 X_k^2 + U_1^2 R_1^2 + U_1^2 X_\mu^2 + 2U_1^2 X_k X_\mu - (X_\mu^2 X_k^2 + X_\mu^2 R_1^2) I_1^2}, \quad (2)$$

де s – ковзання;

X_k – індуктивний опір короткого замикання;

ная;

R_1 – опір статора;

R'_2 – наведений опір ротора;

U_1 – напруга на статорі;

X_μ – індуктивний опір контуру намагнічування. Обертальний момент, можна виразити через швидкість обертання валу ω та інші параметри системи. Для цього потрібно врахувати

рівняння динаміки двигуна

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega. \quad (3)$$

Маючи характеристики кутової швидкості, отримаємо перехідну характеристику обертального моменту із заданим моментом опору та рушійним моментом (рис. 2).

Проте для дослідження невизначеності характеристик обертального моменту найбільш точним способом вважається безпосереднє вимі-

рювання моменту на валу (наприклад тензометричним способом), тобто під час здійснення прямих вимірювань. Тому в структурну схему (рис. 1) потрібно додати ще й функцію вібрації, яка може передаватися від вимірювального плеча до сенсора, який вимірює навантаження, як, наприклад, на стенді представленому на рис. 3.

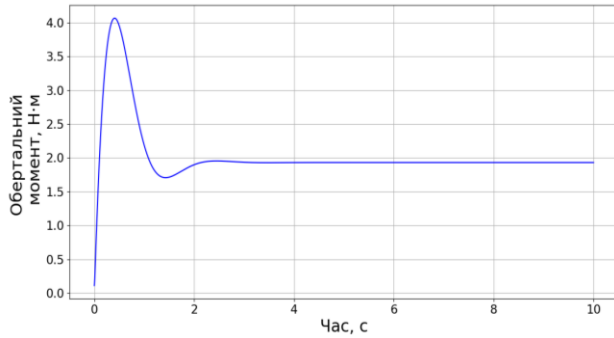


Рисунок 2 – Перехідна характеристика обертового моменту колекторного електродвигуна постійного струму

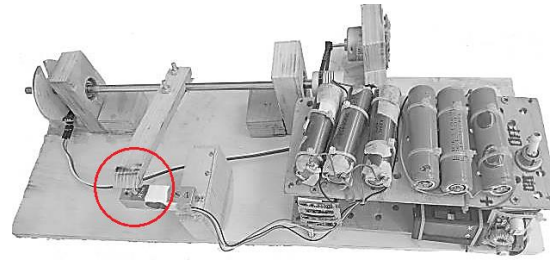


Рисунок 3 – Стенд для вимірювання обертового моменту колекторного електродвигуна постійного струму

Дослідження структури вібрацій електродвигунів характеризують це явище не як випадковий процес, а навпаки періодичний процес, що залежний від багатьох факторів. Тому, передатна функція вібрації для кожного електродвигуна в залежності від умов використання буде особливою, але міститиме коливальний елемент [20-23].

Так, вплив вібрації на зміну обертового моменту, може бути описаний коливальною ланкою другого порядку (рис. 4).

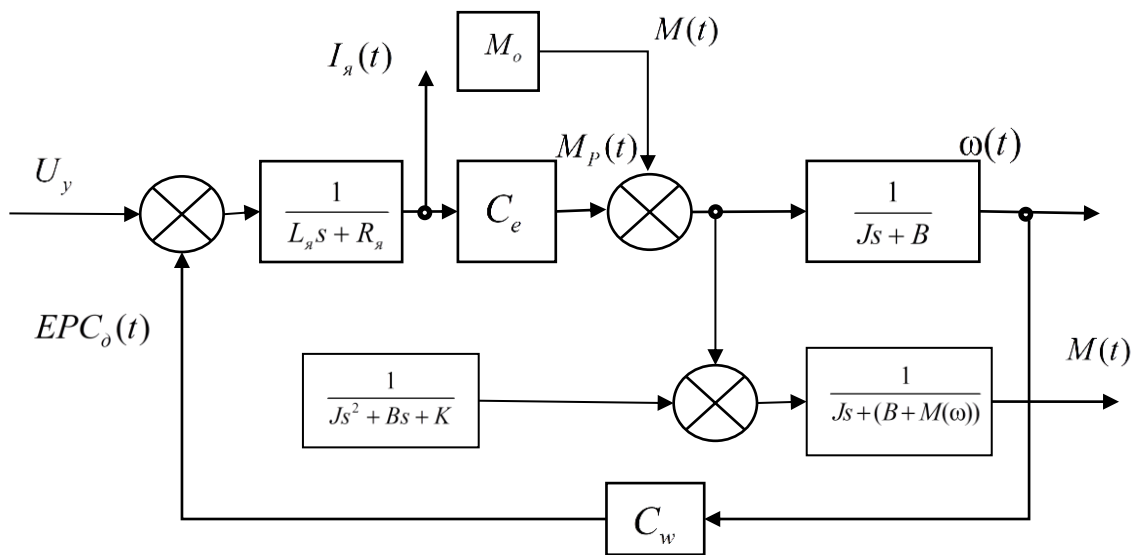


Рисунок 4 – Структурна схема колекторного двигуна постійного струму, де EPC_d – зворотна ЕРС двигуна; M_o, M_p, M – момент опору, рушійний момент, загальний момент прикладений до валу ротора; B – коефіцієнт тертя

Отримана перехідна характеристика швидкості обертання та обертового моменту, з урахуванням вібрації представлена на рис. 5. З рис. 5 можна спостерігати, що похибка, обумовлена вібраціями залежить від режиму роботи. Так, під час запуску вібрація значно збільшується.

Границі допустимої основної абсолютної

похибки D можуть бути представлені одним з трьох способів: сталим числом для будь-яких значень X , що характеризує адитивну похибку – $D = \pm a$; у вигляді двочленної формули, яка включає адитивну та мультиплікативну похибки – $D = \pm(a + bX)$; у вигляді рівняння $D = f(X)$. Для останнього варіанту допускається представляти похибку у вигляді графіка або таблиці.

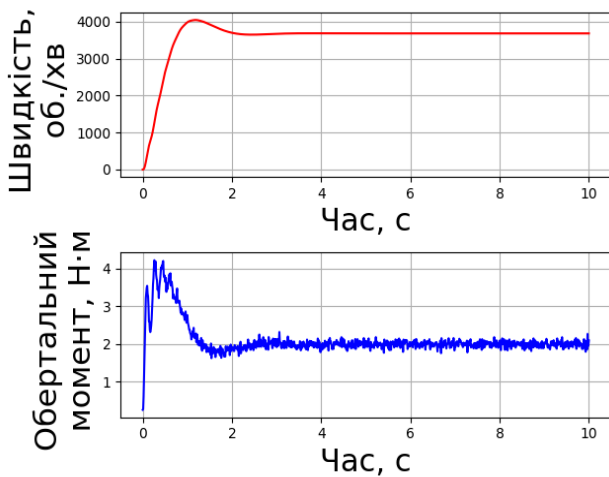


Рисунок 5 – Перехідна характеристика швидкості обертання та обертального моменту з урахуванням вібрації

Використання нечітких множин для опису $D = f(X)$ є доцільним, коли існує необхідність проводити табличне нормування похибки, особливо, коли крім вібрації, існує ще й нелінійна складова похибки. Для вимірювань обертальних параметрів ЕД це може бути температурний вплив на властивості пружного деформаційного елемента, який використовують для отримання кута скручування, що характеризує зміну моменту. Тому, в деяких працях запропоновано експертний варіант нормування похибки табличним способом, як, наприклад, на рис. 1 в роботі [16].

Для опису даного типу похибок нечітка логіка може служити ефективним інструментом, що дозволяє більш точно обробляти нечіткість і невизначеність, які є неодмінною складовою таких вимірювань.

Так, для кожного обертального параметру (наприклад, швидкість, кутове прискорення тощо) можна визначити відповідну нечітку множину, яка представляє похибку вимірювання та характеризується функцією належності, що відображає ймовірність належності окремого значення похибки до цієї множини. Такі нечіткі множини, в свою чергу, дозволяють виконувати різні операції, наприклад об'єднання, перетин та доповнення, що сприяють обробці похибок вимірювань.

Використання нечітких множин для опису похибок вимірювання може значно покращити надійність та точність системи контролю обертальних параметрів електродвигунів як в умовах нелінійності вимірювальних каналів, так і впливу окремих дестабілізуючих факторів. Крім того, важливим аспектом такого дослідження є те, що

точність вимірювання може бути різною в різних режимах роботи електродвигуна (прискорення, пусковий момент, гальмування, вібрації, зміна температурних режимів, що впливає на пружність валу, тощо), а відповідно і діапазон невизначеності.

Для врахування окремих залежностей під час нормування похибки, на яку має вплив ряд дестабілізуючих факторів, функція якої має вигляд $D = f(X)$, необхідно встановити допустимі границі похибки, що вказують на граничні рівні вимірюваної величини порівняно з її «істинним» значенням. Зазначені границі можуть бути важливим індикатором надійності і точності результатів вимірювань.

Розглянемо основні кроки цього процесу.

1. Визначення нечіткої множини похибки.

Нехай E представляє нечітку множину похибки вимірювання обертального моменту. Елементи цієї множини представляють можливі значення похибки, кожне з яких має відповідний ступінь належності, визначений функцією належності $\mu_E(x)$ де x – конкретне значення результату вимірювання з урахуванням похибки.

Функція належності вказує на ступінь упевненості, що даний елемент x належить до нечіткої множини E , що містить значення обертального моменту електродвигуна W , які можуть бути отримані, наприклад, експериментально. Функція належності дозволяє робити висновки про належність елементів x до множини E не з абсолютною впевненістю, а з певним ступенем упевненості. Тобто, кожне значення обертального моменту W може належати до множини E з певним ступенем упевненості, що вимірюється за допомогою функції належності. Це особливо корисно при моделюванні або аналізі реальних систем, де точні значення може бути важко отримати, або існує невизначеність чи варіабельність.

Таким чином, функція належності – це ключовий елемент в теорії нечітких множин, який використовується для визначення ступеня належності конкретного елемента до нечіткої множини. Вона реалізує перехід від класичної двійкової логіки (де елемент або належить множині, або ні) до логіки, де елемент може належати множині з певним ступенем від 0 до 1.

Так, значення функції належності варіюється від $\mu_E(x) = 0$ (абсолютна впевненість, що елемент не належить до множини E) до $\mu_E(x) = 1$ (абсолютна впевненість, що елемент належить до множини E).

В метрології множина E – невизначеність результату вимірювань може мати різні значення за умов впливу дестабілізуючих факторів. Значною мірою це стосується вимірювання обертальних моментів електродвигунів в умовах вібрацій. Тому, для визначення відхилень від стабільних режимів роботи можна застосовувати методи оцінювання належності вимірюваної величини до інтервалу невизначеності.

Критерії належності елемента x до нечіткої множини E можуть бути отримані, використовуючи ряд підходів: експертна оцінка; на основі експериментальних даних та інших методах.

2. *Оцінка похибки.* За допомогою нечіткої множини похибки E можна оцінити вплив похибки на результати вимірювань обертального моменту. Наприклад, можна визначити нечітку множину вимірювань обертального моменту і застосувати операції нечітких множин для аналізу загальної похибки.

3. *Аналіз невизначеності.* На основі нечіткої множини E можна розрахувати рівень довіри для різних інтервалів значень похибки. Це дозволяє оцінити невизначеність вимірювань і врахувати її при розробці стратегій контролю та регулювання обертального моменту електродвигуна.

4. *Моделювання.* На основі моделювання похибки з використанням теорії нечітких множин можна розробити стратегії для зменшення похибки вимірювання. Це може включати в себе застосування алгоритмів нечіткого логічного управління або оптимізації на основі нечіткої логіки для налаштування параметрів системи вимірювання.

За вказаними умовами можемо створити функцію належності, що відображає нечіткість похибки під час вимірювання моменту електродвигуна. Для цього використаємо межі зміни вимірюваної величини отримані під час моделювання роботи ЕД як границі, поза якими функція належності дорівнює нулю (див. рис. 2 та рис. 5). У відповідності до рис. 5, де представлено множину даних, що отримані під час моделювання обертального моменту колекторного електродвигуна постійного струму з урахуванням такого дестабілізуючого фактору як вібрація, задаємо діапазон шкали засобу вимірювань від 0,1 до 4 Н·м.

Для оцінювання результату вимірювання можна застосувати відому трапецієвидну функцію належності, яка виражена відносно значення обертального моменту W :

$$\mu(W; a; b; c; d) = \begin{cases} 0, & W < a \\ \frac{W-a}{b-a}, & a < W < b \\ 1, & b < W < c \\ \frac{d-W}{d-c}, & c < W < d \\ 0, & W > d \end{cases}, \quad (5)$$

де W – значення обертального моменту;

a, b, c, d – параметри функції належності W до інтервалу невизначеності.

a – нижня границя. Точка, де значення функції належності починає зростання від 0 (виходячи із даних експерименту буде складати 0,1 Н·м);

b – початкова точка насичення. Від цієї точки і до точки c функція належності має значення 1;

c – кінцева точка насичення. Після цієї точки функція належності починає зменшуватися до 0;

Діапазон зміни значень обертального моменту, елементи якого достовірно належать до нечіткої множини. Він складатиме $\pm 5\%$ від діапазону шкали засобу вимірювань $\Delta W = 3,9$ Н·м. Тоді мінімальне та максимальне допустимі значення обертального моменту ЕД в усталеному режимі: $W_{\min} = W_y - 0,05\Delta W$; $W_{\max} = W_y + 0,05\Delta W$, де $W_y = 1,82$ Н·м. Тому, базуючись на експериментальних даних (рис. 5), задамо параметри функції належності: $b = W_{\min} \approx 1,62$ Н·м і $c = W_{\max} \approx 2,02$ Н·м; d – верхня границя (складатиме 4 Н·м) (рис. 6).

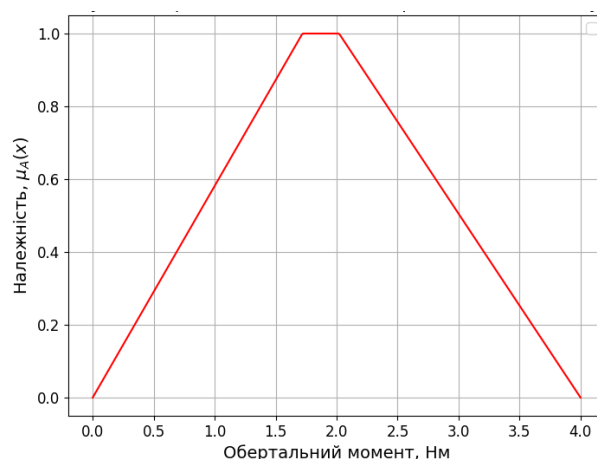


Рисунок 6 – Функція належності $\mu(W)$, обчислена з використанням програмної бібліотеки scikit-fuzzy [24]

Оцінювання ступеня належності послідовності результатів вимірювань обертального моменту до інтервалу невизначеності можна за допомогою програмної бібліотеки *scikit-fuzzy* для роботи з нечіткими множинами [24]. Для цього розроблено спеціальне програмне забезпечення, що реалізує запропонований алгоритм (рис. 7), що дозволяє візуалізувати належність отриманих результатів до інтервалу невизначеності, базуючись на методах нечіткої логіки.

Так, з використанням цього алгоритму для нової вибірки змодельованих даних (рис. 8, а) побудовано криву ступеня належності вимірних величин до інтервалу невизначеності (рис. 8, б). З рис. 8, б видно, що ступінь належності результатів вимірювань до інтервалу невизначеності зростає із встановленням стабільного режиму роботи електродвигуна.



визначеності. На прикладі моделювання розгону електродвигуна та вимірювання обертового моменту в цей період часу визначено ступінь належності результатів вимірювань заданому інтервалу невизначеності за мінімальної вібрації, збільшення якої обумовлює зменшення ступіня належності.

Показник належності, динаміка зміни якого представлена на рис. 8, можна розглядати як додаткову характеристику точності вимірювання, що визначається за допомогою функції належності, яка може бути отримана експертним шляхом.

Розглянутий метод може знайти практичне застосування для контролю обертових моментів електродвигунів при високих кутових швидкостях, в перехідних режимах роботи, під час критичних навантажень та в інших умовах, коли похибка залежить від динамічних параметрів системи.

Список використаних джерел

1. Семёнов К. К. Нечеткие переменные как способ формализации характеристик погрешности в задачах математической обработки. *Информация и её применение*. 2012. Том 6, вып. 2. С. 101-112.
2. Солопченко Г. Н. Представление измеряемых величин и погрешностей измерений как нечетких переменных. *Измерительная техника*. 2007. № 2. С. 3.
3. Борисов А. Н., Алексеев А. В., Меркурьева Г. В. и др. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.
4. Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 3-28. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90029-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90029-5).
5. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
6. Jaulin, L., Kieffer, M., Didrit, O. Walter, E. (2001). *Applied Interval Analysis with Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics*. Springer London Ltd, pp. 398. URL: <https://hal.science/hal-00845131>.
7. Caulfield, H. J. (1996). Fuzzy optical metrology. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(2), 206-208. <https://doi.org/10.1109/91.493914>.
8. Benattia, B. (2018). Fuzzy Logic Applications in Metrology Processes. In *Fuzzy Logic Based in Optimization Methods and Control Systems and Its Applications*, Edited by Ali Sadollah. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79381>.
9. Wiczorowski, M., Kucharski, D., Sniatala, P., Pawlus, P., Krolczyk, G., Gapinski, B. (2023) A novel approach to using artificial intelligence in coordinate metrology including nano scale. *Measurement*, 217, Article 113051, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113051>.
10. Swojak, N., Wiczorowski, M., Jakubowicz, M. (2021). Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors. *Measurement*, 176, Article 109190, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109190>.
11. Filipowicz, W. (2021) Conditional dependencies in imprecise data handling. *Procedia Computer Science*, 192, 80-89, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.009>.
12. Wang, Y., Zheng, Y., Yang, R., Fang, H., Ren, H. (2011). Performance Analysis of Takagi-Sugeno Fuzzy Model For Run-to-run Control with Stochastic Metrology Delay. *IFAC Proceedings*, 44 (1), 489-494. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01724>.
13. Ali, M., Ahmad, M., Koondhar, M. A., Akram, M. S., Verma, A., Khan, B. (2023). Maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic system using Adaptive Fuzzy Logic Controller. *Computers and Electrical Engineering*, 110, Article 108879. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108879>.
14. Abdolrasol, M. G. M., Ayob, A., Mutlag, A. H., Ustun, T. S. (2023). Optimal fuzzy logic controller based PSO for photovoltaic system. *Energy Reports*, 9 (1), 427-434, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.039>.
15. Abouobaida, H., Mchaouar, Y., Abouelmahjoub, Y., Mahmoudi, H., Abbou, A., Jamil, M. (2023). Performance optimization of the INC-COND fuzzy MPPT based on a variable step for photovoltaic systems. *Optik*, 278, Article 170657. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170657>.
16. Varshney, A., Goyal, V. (2023). Re-evaluation on fuzzy logic controlled system by optimizing the membership functions. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.799>.
17. Maxon. (2023). Working Characteristics of the DC Permanent Magnet Motor (RE 25). Retrieved from URL: https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8846142373918/20-DE-V2-136.pdf.
18. Python Control Systems Library Developers. "Python Control Systems Library (python-control) Version 0.9.4." Accessed [1.02.23]. URL: <https://python-control.readthedocs.io/en/0.9.4/>.
19. Бараев А. А., Чернусь Р. С. Метод измерения момента на валу в функции тока статора

приводного асинхронного электродвигателя. *Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования: сб. науч. ст. Междунар. конф.* Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2015. С. 625-631.

20. Сафиуллин Рузил Ахнафович, Янгиров Ильгиз Флюсович (2021). Исследование вибрации асинхронного электродвигателя. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*, 17 (2), 41-54.

21. Baker, G. A., Graves-Morris, P. (1981). Pade Approximants. *Encyclopedia of Mathematics and its Applications*, 13-14.

Baker, G. A. and Graves-Morris, P. (1981) *Pade Approximants, Encyclopedia of Mathematics and its Application*. Vol. 13, Addison-Wesley Publishing Company, New York, Parts I and II.

22. Krishnaveni, S., Senthil, R. S., Jayasankar, T., Sathish, B. P. (2021) Analysis and control of the motor vibration using arduino and machine learning model, *Materials Today: Proceedings*, 45 (2), 2551-2555. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.261>.

23. Белашов В. Ю., Степанов Е. Л. Математическая модель расчета вибрации электродвигателей постоянного тока. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2012 № 7-8. С. 133-138.

24. Fuzzy Metrology. *Fuzzy Theory Systems. Techniques and Applications*, 2, 747-758. <https://doi.org/10.1016/B978-012443870-5.50028-9>.

References

1. Semjonov K. K. Nechetkie peremennye kak sposob formalizacii harakteristik pogreshnosti v zadachah matematicheskoy obrabotki [Fuzzy variables as a way to formalize error characteristics in mathematical processing problems]. *Informacija i ejo primenienie*. 2012. Tom 6, vyp. 2. S. 101-112.

2. Solopchenko G. N. Predstavlenie izmerjaemykh velichin i pogreshnostej izmerenij kak nechetkih peremennykh [Representation of measured quantities and measurement errors as fuzzy variables]. *Izmeritel'naja tehnika*. 2007. № 2. S. 3.

3. Borisov A. N., Alekseev A. V., Merkur'eva G. V. i dr. Obrabotka nechetkoj informacii v sistemah prinjatija reshenij [Fuzzy information processing in decision making systems]. M.: Radio i svjaz', 1989. 304 s.

4. Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 3-28. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90029-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90029-5).

5. Djubua D., Prad A. Teorija vozmozhnostej. Prilozhenija k predstavleniju znanij v informatike. M.: Radio i svjaz', 1990. 288 s.

6. Jaulin, L., Kieffer, M., Didrit, O. Walter, E. (2001). *Applied Interval Analysis with Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics*. Springer London Ltd, pp. 398. URL: <https://hal.science/hal-00845131>.

7. Caulfield, H. J. (1996). Fuzzy optical metrology. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(2), 206-208. <https://doi.org/10.1109/91.493914>.

8. Benattia, B. (2018). Fuzzy Logic Applications in Metrology Processes. In *Fuzzy Logic Based in Optimization Methods and Control Systems and Its Applications*, Edited by Ali Sadollah. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79381>.

9. Wiczorowski, M., Kucharski, D., Sniatala, P., Pawlus, P., Krolczyk, G., Gapinski, B. (2023) A novel approach to using artificial intelligence in coordinate metrology including nano scale. *Measurement*, 217, Article 113051, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113051>.

10. Swojak, N., Wiczorowski, M., Jakubowicz, M. (2021). Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors. *Measurement*, 176, Article 109190, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109190>.

11. Filipowicz, W. (2021) Conditional dependencies in imprecise data handling. *Procedia Computer Science*, 192, 80-89, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.08.009>.

12. Wang, Y., Zheng, Y., Yang, R., Fang, H., Ren, H. (2011). Performance Analysis of Takagi-Sugeno Fuzzy Model For Run-to-run Control with Stochastic Metrology Delay. *IFAC Proceedings*, 44 (1), 489-494. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01724>.

13. Ali, M., Ahmad, M., Koondhar, M. A., Akram, M. S., Verma, A., Khan, B. (2023). Maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic system using Adaptive Fuzzy Logic Controller. *Computers and Electrical Engineering*, 110, Article 108879. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108879>.

14. Abdolrasol, M. G. M., Ayob, A., Mutlag, A. H., Ustun, T. S. (2023). Optimal fuzzy logic controller based PSO for photovoltaic system. *Energy Reports*, 9 (1), 427-434, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.039>.

15. Abouobaida, H., Mchaouar, Y., Abouelmahjoub, Y., Mahmoudi, H., Abbou, A., Jamil, M. (2023). Performance optimization of the INC-COND fuzzy MPPT based on a variable step for photovoltaic systems. *Optik*, 278, Article 170657. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170657>.

16. Varshney, A., Goyal, V. (2023). Re-evaluation on fuzzy logic controlled system by optimizing the membership functions.

Materials Today: Proceedings,
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.799>.

17. Maxon. (2023). Working Characteristics of the DC Permanent Magnet Motor (RE 25). Retrieved from URL: <https://www.maxongroup.com/medias/sysmaster/root/8846142373918/20-DE-V2-136.pdf>.

18. Python Control Systems Library Developers. "Python Control Systems Library (python-control) Version 0.9.4." Accessed [1.02.23]. <https://python-control.readthedocs.io/en/0.9.4/>.

19. Bagaev A. A., Chernus R. S. Metod izmeneniya momenta na valu v funktsii toka statora privodnogo asinkhronnogo elektrodvigatelya. Sbornik nauchnykh statey mezhdunarodnoy konferentsii «Lomonosovskie chteniya na Altae: fundamentalnye problemy nauki i obrazovaniya». Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2015. S. 625-631.

20. Safyullin, R. A., & Yangirov, I. F. (2021). Issledovanie vibratsii asinkhronnogo elektrodvigatelya [Investigation of the vibration of an

asynchronous electric motor]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 17(2), 41-54.

21. Baker, G. A., Graves-Morris, P. (1981). Pade Approximants. *Encyclopedia of Mathematics and its Applications*, 13-14.

22. Krishnaveni, S., Senthil, R. S., Jayasankar, T., Sathish, B. P. (2021) Analysis and control of the motor vibration using arduino and machine learning model, *Materials Today: Proceedings*, 45 (2), 2551-2555. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.261>.

23. Belashov, V. Yu., Stepanov, E. L. Matematicheskaya model rascheta vibratsii elektrodvigatelya postoyannogo toka [Mathematical model for calculating the vibration of direct current motors]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2012. № 7-8. S. 133-138.

24. Fuzzy Metrology. Fuzzy Theory Systems. *Techniques and Applications*, 2, 747-758. <https://doi.org/10.1016/B978-012443870-5.50028-9>.

Надійшла до редакції 02.06.2023

РОЗДІЛ 3

Інформаційно-вимірювальна техніка, інформаційно-вимірювальні та транс- портні технології

УДК 004.896; 629.89; 681.5

А. Г. Ткачук¹, к.т.н., О. М. Безвесільна², д.т.н., О. О. Добржанський¹, к.т.н.¹Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА З АВТОНОМНОЮ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ НА БАЗІ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглянуто нову автоматизовану систему з автономною стабілізацією на базі мобільної платформи для вимірювання теплових показників об'єктів. Приведено розроблену 3D модель мобільної платформи та встановленої на неї автоматизованої системи. Зосереджено увагу на виборі оптичних пристроїв для вимірювання теплових показників об'єктів, а саме, камері нічного бачення та тепловізійній камері. Приведено опис роботи камери день-ніч та проаналізовано галузі її застосування. Описано фізичний принцип роботи тепловізійних камер та галузі їх використання. Проаналізовано можливі похибки оптичних пристроїв: похибка калібрування, похибка зчитування, похибка від затримки відеозображення, інші інструментальні похибки. Проведено експериментальні дослідження автоматизованої системи для вимірювання теплових показників об'єктів з автономною стабілізацією на базі мобільної платформи.

Ключові слова: робототехніка, оптичні датчики, тепловізор, мобільна платформа, стабілізація, точність, вимірювання.

А. Н. Tkachuk, PhD, О. М. Bezvesilna, DSc, О. О. Dobrzhanskyi, PhD

AUTOMATED SYSTEM BASED ON A MOBILE PLATFORM WITH AUTONOMOUS STABILIZATION FOR MEASURING THERMAL INDICATORS OF OBJECTS

Mobile robotic platforms are autonomous devices consisting of mechanical, electrical and electronic components that allow them to move on land, water or in the air. These platforms can be used in a variety of industries, including medicine, industry, research and intelligence, and military applications.

The article deals with a new automated system with autonomous stabilization based on a mobile platform for measuring the thermal indicators of objects. The developed 3D model of a mobile robotic platform for measuring the thermal performance of objects with an autonomous stabilization system is presented. Attention is focused on the choice of optical devices for measuring the thermal performance of objects, namely, a night vision camera and a thermal imaging camera. A description of the day-night camera operation is given, and its application areas are analyzed. The physical principle of operation of thermal imaging cameras and their applications are described. It is established that the image quality varies depending on whether the thermal imager is active or passive. The TELEDYNE FLIR TAU 2 thermal imaging camera was chosen for the new mobile platform, which uses infrared imaging technology to detect the thermal signatures of objects. Possible errors of optical devices were analyzed: calibration error, reading error, video image delay error, other instrumental errors (from the influence of temperature, lighting, orientation in space, noise, etc.). Experimental studies of the developed mobile robotic platform for measuring the thermal performance of objects with an autonomous stabilization system were carried out, having previously calibrated it, and their results are presented. It is determined to measure the surface temperature of an object using a thermal imaging camera; it is necessary to know its emission, which is determined by the properties of the material from which the object is made. This can be done using a calibrated infrared source, making it possible to measure the temperature of objects in the image accurately.

Keywords: robotics, optical sensors, thermal imaging camera, mobile platform, stabilization, accuracy, measurement.

DOI 10.32684/2412-5288-2023-1-22-36-44

Вступ

Мобільні роботизовані платформи – це автономні пристрої, що складаються з механічних, електричних та електронних компонентів, які дозволяють їм переміщуватись по землі, поверхні води або в повітрі. Ці платформи можуть бути використані в різноманітних галузях, включаючи медицину, промисловість, дослідження і розвідку, а також військові застосування. Наприклад, мобільні роботизовані платформи можуть використовуватись у виробничому середовищі для автоматизації процесів та зниження витрат на оплату праці. У медицині вони можуть бути використані для транспортування медичних інструментів та обладнання або для надання допомоги хворим. У дослідницькій сфері вони можуть використовуватись для дослідження складних середовищ, наприклад, для дослідження морського дна чи космосу.

Оскільки мобільні роботизовані платформи можуть працювати автономно, вони забезпечують високу ефективність та точність роботи, а також знижують ризик людських помилок та нещасних випадків на робочому місці. Вони також можуть бути дистанційно керовані, що дозволяє їх використовувати в умовах, коли пряма людська присутність небезпечна або неможлива.

Мобільні роботизовані платформи широко застосовуються в розвідці, оскільки вони можуть допомогти збирати інформацію з небезпечних та важкодоступних місць, а також зменшити ризик для життя людей, що займаються розвідкою. В основному в розвідці використовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА) та колісні або гусеничні наземні роботизовані платформи. Ці платформи зазвичай складаються з базової колесної або гусеничної платформи, на якій розміщені різні сенсори, виконавчі механізми та системи керування. Вони можуть бути обладнані камерами, лазерними сканерами, радарми, мікрофонами та іншими сенсорами, що дозволяють їм збирати інформацію про оточуюче середовище.

Важлива відмінна якість гусеничних мобільних роботів полягає в їх маневровості. Володіючи незалежним приводом для кожної з гусениць, мобільний робот може легко змінювати напрямок власного руху. Завдяки тому, що швидкість кожної з гусениць регулюється окремо, досить легко управляти рухом мобільного робота. Для завдання будь-якого напрямку руху необхідно змінити відносну швидкість приводів. Гусеничні роботи є найбільш ефективними внаслідок більш високих

можливостей з подолання перешкод.

Вимірювання теплових показників об'єктів може проводитися за допомогою тепловізійних камер, термометрів та інших приладів, які вимірюють температуру поверхонь об'єктів.

Один з найбільш поширених методів вимірювання теплових показників – це застосування інфрачервоного зображення. Такі зображення створюються за допомогою тепловізійної камери, яка реєструє інфрачервоне випромінювання з поверхні об'єктів. За допомогою цієї камери можна отримати детальне зображення теплових показників об'єктів, таких як температура поверхні, тепловий потік, термічні втрати тощо. Тепловізійні камери можуть бути портативними або встановленими на різних платформах, таких як дрони або роботи.

Вимірювання теплових показників об'єктів має важливе значення в багатьох галузях, включаючи промисловість, будівництво, медицину, безпеку, науку та інші. Ці дані можуть допомогти відслідковувати стан обладнання, контролювати температуру в різних процесах, виявляти небезпечні ситуації та забезпечувати безпеку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [1] розглянуто застосування тепловізійних камер в різних галузях та описуються переваги використання цих приладів.

Статті [2-3] надають загальну інформацію про тепловізійні камери, включаючи те, як вони працюють та чому вони важливі в різних сферах.

У статтях [4-5] приведено основні технічні характеристики, які слід враховувати при виборі тепловізійної камери під конкретний тип задач дослідження.

У роботах [6-7] приведено загальний огляд мобільних роботів, їхніх типів та застосувань в різних сферах, включаючи промисловість, медицину та науку.

Метою статті є дослідження мобільної роботизованої платформи для вимірювання теплових показників об'єктів з автономною системою стабілізації.

Проектування мобільної платформи з автономною стабілізацією

Науковцями Державного університету «Житомирська політехніка» розроблено мобільну роботизовану платформу з автономною системою стабілізації для вимірювання теплових показників об'єктів (рис. 1-2) [8-9].



Рисунок 1 – Мобільна платформа з автономною системою стабілізації для вимірювання теплових показників об'єктів



Рисунок 2 – 3D модель мобільної платформи з автономною стабілізацією для вимірювання теплових показників об'єктів

Мобільна роботизована платформа побудована на базі малошумного гусеничного шасі. Гусениці платформи зроблені з інженерного пластика, який забезпечує еластичність, демпфуючий ефект і зчеплення шасі з дорогою. На шасі розміщені аналогова камера нічного бачення та тепловізор. Обидва оптичні сенсори закріплені на спеціалізованій рухомій башті з власною системою стабілізації.

Камера нічного бачення використовується для керування рухом мобільної платформи, а тепловізор – для вимірювання теплових показників об'єктів.

Для спрощення процесу конструювання та виготовлення прототипу було вирішено використати технологію 3D друку. Такий метод проектування потребує значно менших витрат часу та коштів у порівнянні з іншими методами. Найбільш зручним матеріалом для 3D друку є PLA пластик, він виділяється міцністю,

порівняно низькою температурою плавлення і малою токсичністю.

Камера нічного бачення

У процесі вибору камери для слабкого освітлення або камери з нічним баченням необхідно мати розуміння різних методів, які роблять можливим відеозапис при слабкому освітленні та в темряві.

Поняття спостереження при слабкому освітленні, зазвичай, відноситься до камер здатних отримувати зображення задовільної якості при поганому освітленні, без необхідності використання додаткових джерел світла. Фактори, що впливають на ефективність роботи, містять комбінований вплив датчиків, блоку обробки зображень, ISP/DSP і оптики об'єктива, налаштування камери нічного бачення.

У камерах з низькою освітленістю і високою чутливістю, також відомим як повнокольоровий режим слабкого освітлення, використовуються датчики Super HAD, Ex-view/EXTRA-View CCD або CMOS-сенсори з заднім підсвічуванням.

Ці датчики добре працюють в умовах низького освітлення з хорошою видимістю та реакцією у ближньому ІЧ-діапазоні. Камери, що використовують цю технологію, зазвичай добре працюють у різних погодних умовах і функціонують як денні/нічні камери, оскільки вони здатні відтворювати кольорові зображення як вдень, так і в умовах низького освітлення. Низька освітленість може досягати 0,1 люкс у кольоровому режимі та 0,01 люкс у чорно-білому режимі. ІЧ-підсвічування у ближньому ІЧ-діапазоні можна використовувати за умов освітленості 0 люкс, але це, як правило, не вказано у специфікаціях для слабкого освітлення та кольорового режиму.

У більшості камер цього типу використовується технологія Ex-view-HAD, що працює в умовах освітленості від 0,01 до 0,001 люкс. Такі камери не тільки здатні знімати чіткі зображення, але також можуть обмежувати рівень шуму на кольорових зображеннях, знятих за умов низького освітлення, без необхідності зменшувати швидкість затвора або збільшувати діаметр діафрагми. Отже, вважається, що вони здатні забезпечувати спостереження за низької освітленості.

Камери з режимами день/ніч використовують механічні принципи перемикання між режимами. Такі пристрої бувають кольоровими та чорно-білими. Ці камери використовують ближній ІЧ-діапазон для отримання чорно-білих зображень, коли освітленість зменшується до певного рівня. Камера перемикається в інфрачервоний режим

або в чорно-білий режим після виявлення нижчих рівнів інфрачервоного випромінювання через інфрачервоний фільтр, і зображення перетворюються з кольорових в чорно-білі.

Однак при видаленні інфрачервоного фільтра під час перетворення фокус зображення зміщується. Отже, ІЧ-лінзи зазвичай використовуються для запобігання зміщенню фокусу або неточної передачі кольору, а також для забезпечення узгодженості зображень, знятих вдень і вночі. Недоліком цього є більш висока вартість ІЧ-об'єктивів. Іншими словами, вони можуть бути не ідеальним вибором для умов з низькою освітленістю.

Крім денних/нічних камер, ІЧ-камери є одним з кращих рішень для умов низького освітлення. ІЧ-підсвічування може бути додатковим модулем до камери, або бути вбудованим в корпус камери. Оскільки датчики CCD і CMOS вже мають високу світлочутливість і здатні захоплювати більшу частину видимого світла та ІЧ-спектру, ІЧ-підсвічування покращує отримуване зображення в умовах поганого освітлення, що дозволяє датчикам відтворювати більш чіткі зображення.

Більш чіткі зображення також виходять у темних умовах, оскільки світлочутливість у Ч/Б режимі вище, ніж у кольоровому режимі.

ІЧ-підсвічування дозволяє встановлювати системи спостереження за умов 0 люкс. Функція автоматичного виявлення світла також дозволяє використовувати це рішення із чорно-білими або денними/нічними камерами для розширення можливостей спостереження в умовах низького освітлення та нічного бачення.

Ще один спосіб запису при слабкому освітленні – уповільнення швидкості електронного затвора камери. Це дозволяє продовжувати вплив світла на матрицю для більш яскравих зображень. Режим накопичення кадрів використовує цифрову технологію повільного затвора для електронного накопичення кадрів, знятих при недостатньому освітленні, для створення чіткішого зображення. Наприклад, при значенні діафрагми від 1,2 до 1,4 в умовах слабого освітлення можна отримати достатньо кадрів, щоб досягти освітленості 0,001 люкс. Це простий, але надійний спосіб досягти результатів в умовах низького освітлення. Проте зображення можуть бути із затримкою або виглядати розмитими, тому технологію цифрового повільного затвора (DSS) найкраще використовувати в умовах низького освітлення з фіксованими камерами, в умовах із мінімальними змінами освітлення та мінімальним рухом, а також там, де

використання ІЧ або допоміжного освітлення неможливе.

Одним із важливих параметрів, на який варто звернути увагу є апертура камери. Розмір апертури визначає кількість світла, яке може пройти через об'єктив та досягти датчика зображення. Велика апертура забезпечує більшу експозицію, а менша – меншу. Також варто звернути увагу на об'єктив, оскільки фокусна відстань та розмір діафрагми зворотно пропорційні. Наприклад, об'єктиви 4 мм можуть забезпечити апертуру від f1,2 до f1,4, а об'єктиви 50-200 мм можуть забезпечити максимальну апертуру лише від f1,8 до f2,2. Отже, це впливає на експозицію світла і при спільному використанні з інфрачервоним фільтром може вплинути на точність кольору.

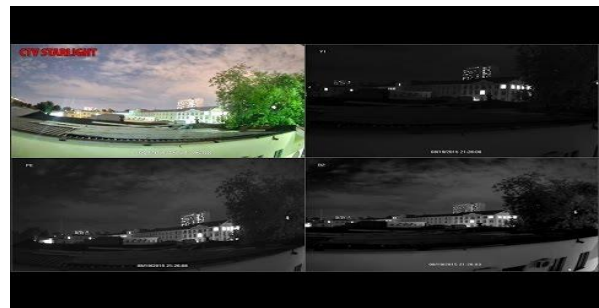


Рисунок 3 – Приклад використання кольорової камери відеоспостереження нічного бачення

Швидкість затвора також впливає на кількість світла, що потрапляє на сенсор. Швидкість затвора для нічного бачення слід підтримувати на рівні 1/30 або 1/25 для нічного спостереження. Повільніша швидкість призведе до розмитості і зробить зображення непридатним для використання. Об'єктиви з автоматичними режимами діафрагми можуть підлаштовуватися під різницю у освітленні вдень та вночі.

Чутливість камери відеоспостереження визначає найнижчий поріг умов освітлення, коли вона може записувати відеозображення прийнятної для перегляду якості. Виробники камер вказують найменшу діафрагму для різних апертур, що є мінімальною освітленістю або рівнем чутливості камери. Потенційна проблема може виникнути, якщо мінімальний показник освітленості камери вищий за спектр ІЧ-підсвічування. В цьому випадку буде порушена ефективна відстань, і результуюче зображення матиме яскравий центр, оточений темрявою.

Кількість світла, що отримується камерою, є ще одним фактором, який може сильно вплинути на дальність дії камери з режимом нічного бачення. Як правило, чим більше світла, тим

краще зображення. Це стає актуальнішим на великих відстанях. Для отримання зображення доброї якості потрібна достатня кількість вбудованих джерел інфрачервоного підсвічування.

Технологія нічного бачення. Ключовою відмінністю поколінь камер нічного бачення є технологія підсилювача. Пристрій Gen1 вперше був розроблений у В'єтнамі, і тепер він визнаний початковим рівнем приладів нічного бачення. Пристрої Gen1 використовують підсилювальну трубку, яка підсилює навколишнє світло шляхом прискорення електронів, які потрапляють на поверхню зеленого люмінофора (як телевизор). Gen1, який використовується в оптимальних умовах, забезпечує видимість 68,58 — 91,44 м. В пристрої Gen2 додано мікроканальну пластину, яка збільшує кількість електронів до того, як вони контактують з люмінофорним екраном (таким чином підвищуються чіткість, якість і яскравість). Пристрої Gen2 можуть випускатися у варіантах з білим або зеленим люмінофором. Білі люмінофори зазвичай працюють довше, оскільки вони забезпечують підвищену чіткість, а також меншу втоми очей. Пристрої Gen2 в оптичних умовах можуть мати видимість у 137,16 — 182,88. Збройні сили США наразі використовують Gen3, у який додано фотокатод із арсеніду галію, що створює значно більше фотоелектронів, ніж у пристрої Gen2, і є ефективнішим у посиленні існуючого світла чи ІЧ-освітлення. Зображення отримані у пристрої Gen3 значно яскравіші та мають кращу оптичну чіткість, ніж попередні покоління приладів, і за оптимальних умов забезпечують видимість до 320,04 — 365,76 м. Нарешті, цифрове нічне бачення було започатковане на початку 2000-х років. Воно працює за тим же принципом, що й режими NV в цифрових камерах. Digital NV використовує CCD (пристрої зарядженого зв'язку) для обробки світла перед надсиланням на дисплей. Завдяки використанню цієї технології, Digital NV не пошкоджується великою кількістю світла і може використовуватися як вночі, так і вдень.

Нічне бачення за слабого освітлення покладається на технологію посилення зображення (аналогову), щоб забезпечити отримання кольорового зображення нічного бачення в атмосфері дуже слабого освітлення. Коли навколишнє світло потрапляє на заряджену пластину фотокатода, електрони випромінюються через вакуумну трубку і потрапляють на пластину мікроканалів, змушуючи висвітлювати на екрані зображення у такому ж шаблоні, що й світло, яке потрапляє на

фотокатод, і в діапазоні частот, що є видимими для людського ока. Аналогові системи відображатимуть зображення або у відтінках зеленого, або як біло/чорне, залежно від використовуваного електронно-оптичного перетворювача ЕОП (зелений або білий фосфор). Оскільки ця технологія використовує оптичний перегляд, а не цифровий підсилювач, чіткість і роздільна здатність аналогових пристроїв зазвичай набагато вища, ніж цифрових. Слід звернути увагу на світлочутливу трубку, потрібен ІЧ-фільтр або додатковий запобіжний захід, щоб обмежити вплив світла протягом дня. Існує ймовірність пошкодження внутрішньої підсилюючої трубки під впливом надто великої кількості навколишнього видимого світла (сонячне світло, фари автомобіля, прожектори).

Основні похибки камери нічного бачення:

1. Обмежена дальність зору камери нічного бачення, що може призвести до недостатнього видимого поля або недостатньої роздільної здатності.

2. Помилки калібрування: неправильне калібрування камери може призвести до некоректного відображення об'єктів та їхньої положення в зображенні. Калібрування камери повинно бути проведено з використанням еталонних джерел світла.

3. Обмежені можливості розпізнавання: камери нічного бачення можуть мати обмежені можливості розпізнавання об'єктів, особливо за умов великої дальності спостереження або низької освітленості.

4. Вплив погодних умов: камери нічного бачення можуть бути чутливими до погодних умов, таких як дощ, туман, сніг, хмарність тощо, що можуть спотворювати зображення та знижувати їхню чіткість.

5. Перешкоди: перешкоди, такі як дерева, будівлі, автомобілі тощо, можуть заважати правильному відображенню об'єктів у камері нічного бачення та знижувати її ефективність.

У якості камери нічного бачення для спроектованої системи обрано камеру переднього огляду з діодним підсвічуванням (рис. 4). Камера має середні габарити, міцний корпус та багатофункціональне кріплення з комірцем. Діодне інфрачервоне підсвічування дозволяє освітити область на відстані до 5 м.

Модель представлена з виходом під AV кабель.

Технічні характеристики:

- напруга живлення: DC 9V-35;
- датчик зображення: 1/3 "CMOS / CCD;
- система сканування: PAL/NTSC;
- ефективні пікселі: 648x488 пікселів;

- роздільна здатність TV сигналу: 480 TV-ліній;
 - відеовихід: cvbs 1.0VP.P.75ohm;
 - тип управління чутливістю: AGC (Automatic Gain Control) auto/n;
 - співвідношення сигнал/шум: краще 48 дБ;
 - електронний затвор: 1/60 ~ 1/100,0 с;
 - робоча температура: – 40 °С ~ 80 °С;
 - температура та вологість зберігання: – 40 °С ~ 105 °С, rh 95 %;
 - кут огляду: 120 просторових градусів.
- Виконання корпусу: всепогодне і водостійке виконання (IP 68/69).



Рисунок 4 – Камера нічного бачення

Тепловізор – це портативний або стаціонарний пристрій, здатний реєструвати тепловий розподіл температури об'єкта, що досліджується, в інфрачервоному діапазоні. Дані реєстрації прилад в режимі онлайн передає на дисплей, де оператор бачить у видимому спектрі даний розподіл. Зображення на екрані забарвлюється в різні кольори залежно від температурні ділянки об'єкта.

Області застосування приладу можуть бути різними:

1. насамперед для військових цілей, а також для охорони особливих територій та об'єктів;
2. будівництво, а також ефективна експлуатація будівель – визначення рівня тепловтрат;
3. медичне використання для діагностики деяких захворювань;
4. для швидкої діагностики та контролю справності роботи обладнання;
5. під час роботи рятувальних служб;
6. у промисловості та металургії;
7. для полювання, як прилади нічного бачення;
8. наука, зокрема, астрономія і астрофізика;
9. інші цілі.

Залежно від призначення такі прилади матимуть різну ціну та спеціалізацію. Матеріали, що в них використовуються, можуть відрізнятися, що впливає на чіткість зображення, точність роботи, дальність дії та вартість.

Якщо розглядати принцип роботи тепловізорів, то вони є реєстраторами інфрачервоного випромінювання. При цьому прилад має можливість перетворювати прийняте в ІЧ-діапазоні довжин хвиль зображення у видимий для людського ока спектр. Якщо температура на поверхні об'єкту має нерівномірний розподіл, різні ділянки на дисплеї будуть підсвічуватися різним кольором.

У загальному спрощеному випадку тепловізор складається з таких робочих частин:

1. вікно прийому ІЧ-випромінювання;
2. спеціальна лінза, чутлива до такого типу випромінювання;
3. датчик реєстратор чи сенсор;
4. контролер приладу;
5. дисплей для відображення отриманого результату сканування;
6. система керування пристроєм.

Всі об'єкти випромінюють інфрачервону енергію, відому як тепла сигнатура. Інфрачервона камера (також відома як тепловізор) виявляє та вимірює інфрачервону енергію об'єктів. Камера перетворює ці інфрачервоні дані в електронне зображення, яке показує вимірний розподіл температур на поверхні об'єкта.

Інфрачервона камера містить оптичну систему, що фокусує інфрачервону енергію на спеціальний чіп детектора (матрицю датчиків), який містить тисячі пікселів детектора, розташованих у сітці.

Кожен піксель матриці датчиків реагує на сфокусовану на ньому інфрачервону енергію та виробляє електронний сигнал. Процесор камери отримує сигнал від кожного пікселя та застосовує до нього математичні розрахунки, щоб створити колірну карту видимої температури об'єкта. Кожне значення температури позначається окремим кольором. Отримана матриця кольорів надсилається в пам'ять і на дисплей камери як зображення температури (теплове зображення) цього об'єкта.

Багато інфрачервоних камер також містять камеру видимого світла, яка автоматично фіксує стандартне цифрове зображення при необхідності. Змішуючи ці зображення, легше співвіднести проблемні зони на інфрачервоному зображенні з фактичним обладнанням або областю, що перевіряється.

Оскільки інфрачервона камера призначена для захоплення теплової енергії в навколишньому середовищі, її основні компоненти призначені для обробки інфрачервоного випромінювання. Особливо це стосується блоку введення. Мова йде про лінзи та датчики, канал, через який має проходити інфрачервоне випромінювання.

Хоча тепловізійні камери є важливими приладами для виявлення теплових випромінювань, які є невидимими для ока, але вони можуть вносити деякі помилки та мати недоліки. Основні похибки тепловізійних камер викликані наступними факторами:

1. Недостатня роздільна здатність: може призвести до помилкових відображень об'єктів на зображенні. Це особливо важливо для вимірювання температури на поверхні об'єкта.

2. Вплив зовнішніх факторів: тепловізійні камери можуть бути чутливими до зовнішніх факторів, таких як сонячна радіація, вітер, дощ, туман тощо. Ці фактори можуть спотворювати зображення і знижувати точність вимірювання температури.

3. Помилки калібрування: неправильне калібрування тепловізійної камери може призводити до похибок вимірювання температури. Калібрування повинно бути проведено з використанням еталонних джерел температури.

4. Нерівномірна чутливість по всьому зображенню: це може призводити до спотворень у відображенні температури та інші.

Тепловізійна камера TELEDYNE FLIR TAU 2

Тау 2 (рис. 5) є серією тепловізійних камер, вироблених компанією FLIR Systems. Ці камери використовують технологію відтворення інфрачервоних зображень для вимірювання теплових сигнатур об'єктів. З їх допомогою можна виявляти термічні витoki, проводити дослідження теплового випромінювання об'єктів, контролювати процеси нагріву та охолодження, а також виявляти різні небезпечні ситуації.

Тау 2 пропонується в різних моделях з різними роздільними здатностями і чутливостями. Вони можуть бути встановлені на різних платформах, таких як дрони, роботи, автомобілі тощо. Покращена електроніка забезпечує реалізацію потужних режимів обробки зображення, які значно покращують деталізацію та контрастність. Параметри камери включають повну радіометрію, підвищену чутливість (<30 мК) і частоту кадрів 640/60 Гц. Оскільки конфігурації Тау 2 640 і 336 мають спільні електричні функції, можна створити

загальні інтеграції, які бездоганно працюватимуть з обома форматами.



Рисунок 5 – Тепловізійна камера

Експеримент з використанням тепловізійної камери TELEDYNE FLIR TAU 2 може включати в себе різноманітні завдання, пов'язані з вимірюванням теплових показників об'єктів та аналізом зображень, отриманих з камери.

Одним з можливих експериментів є вимірювання температури поверхонь різних матеріалів з використанням тепловізійної камери, що було виконано за допомогою розробленої системи (рис. 6). Для цього можна використовувати каліброване інфрачервоне джерело, щоб точно виміряти температуру об'єктів на зображенні.

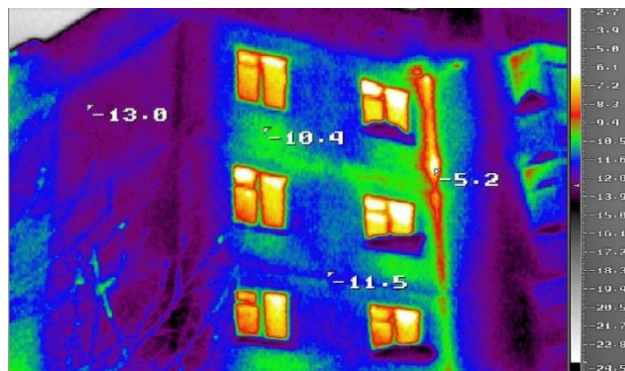


Рисунок 6 – Експериментальні дослідження тепловізійної камери Тау 2

Іншим експериментом може бути аналіз динаміки теплових процесів на поверхнях об'єктів. Наприклад, тепловізійна камера може використовуватися для визначення ступеня теплового випромінювання елементів космічного апарату або дослідних зразків, які перебувають в умовах вакууму.

Також можна провести експерименти з використанням тепловізійної камери для дослідження теплового випромінювання людського тіла та його змін при фізичних

навантаженнях.

Усі ці експерименти можуть бути корисні для науково-дослідних робіт, а також для різних галузей промисловості, включаючи автомобільну, авіаційну та космічну промисловість, медицину, будівництво та енергетику.

Зображення об'єкта, отримане з тепловізійної камери, містить різні кольори, які відповідають різним температурам поверхні об'єкта. Для вимірювання температури поверхні об'єкта з використанням тепловізійної камери потрібно знати його емісію, яка визначається властивостями матеріалу, з якого виготовлений сам об'єкт. Це можна зробити з використанням каліброваного інфрачервоного джерела, що дає змогу точно вимірювати температуру об'єктів на зображенні.

Подібний експеримент з вимірювання температури поверхні об'єктів з використанням тепловізійної камери та його результати можуть бути корисними в різних галузях, таких як медицина, будівництво, енергетика, автомобільна і космічна промисловість тощо.

Висновки

Досліджено автоматизовану систему з автономною стабілізацією на базі мобільної платформи для вимірювання теплових показників об'єктів. Розроблену 3D модель мобільної платформи для вимірювання теплових показників об'єктів з автономною системою стабілізації. Здійснено вибір оптичних пристроїв для вимірювання теплових показників об'єктів, а саме, камеру нічного бачення для керування рухом платформи та тепловізійну камеру для безпосереднього вимірювання теплових показників об'єктів. Приведено опис роботи камери день-ніч та проаналізовано галузі її застосування. Описано фізичний принцип роботи тепловізійних камер та галузі їх використання. Показано, що якість зображення змінюється залежно від того активний чи пасивний тепловізор. Проведено експериментальні дослідження розробленої мобільної роботизованої платформи для вимірювання теплових показників об'єктів з автономною системою стабілізації та наведено їх результати.

Список використаних джерел

1. Аналіз розвитку та застосування тепловізорів. URL: <http://surl.li/ghwrb>.
2. Неня О. В. Відмінності й особливості пристроїв нічного бачення та тепловізорів. *Сучасна спеціальна техніка*. 2017. № 3(50). С. 75-86. URL: <http://surl.li/ghwqf>.

3. How Thermal Cameras Work and Why They're So Important. Advantages. URL: <http://surl.li/ghwqk>.

4. Неня О. В. Сучасні тепловізори для спеціального та повсякденного застосування. *Сучасна спеціальна техніка*. 2016. № 4(47). С. 108-120. URL: <http://surl.li/tgop>.

5. На що звернути увагу під час вибору тепловізора. URL: <https://gre4ka.info/zhyttia/69389-na-sho-zvernuti-uvagu-pid-chas-viboru-teplovizora>.

6. Francisco, R., Francisco, V., Carlos, L. (2019, March-April). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 16(2), 1-22. URL: <http://surl.li/ghwri>. <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>.

7. Mobile Robotics: A Brief Overview. URL: <http://surl.li/ghwqz>.

8. Ткачук А. Г., Добржанський О. О., Богдановський М. В., Кравчук А. Р. Проектування інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72), № 2. С. 108-113.

9. Ткачук А. Г. Градувальна характеристика чутливого елемента системи стабілізації оптичних пристроїв на базі роботизованої платформи. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72), № 5. С. 159-163.

10. Mohd, J. H., Mohd, M. (2017). Night Vision Technology: An Overview. *International Journal of Computer Applications*, 167(13), 37-42. <https://doi.org/10.5120/ijca2017914562>.

11. New Aerial Solar Farm Inspection Takes Off for Wesii. URL: <http://surl.li/ghwqs>.

12. High Performance, Reliable LWIR Thermal Imaging with Teledyne FLIR Tau 2 Series. URL: <https://www.flir.com/oem/tau-series/>.

13. Teledyne FLIR Releases Tau2+ Longwave Infrared Thermal Camera Module with Enhanced Performance and Increased Sensitivity. URL: <http://surl.li/ghwqx>.

14. High Performance, Reliable LWIR Thermal Imaging with Teledyne FLIR Tau 2 Series. Indian Defence Review. URL: <http://surl.li/ghwpy>.

15. Rupesh, P. R., Swapnil, S. R., Manisha, P. W. (2013). Night Vision Techniques and Their Applications. *International Journal of Modern Engineering Research*. 3(2), 816-820. URL: <http://surl.li/ghwoy>.

References

1. Analiz rozvytku ta zastosuvannia teplovizoriv [Analysis of the development and application of thermal imagers]. URL: <http://surl.li/ghwrb>.
2. Nenia, O. V. Vidminnosti y osoblyvosti prystroiv nichnoho bachennia ta teplovizoriv [Differences and features of night vision devices and thermal imagers]. *Suchasna spetsialna tekhnika – Modern special equipment*. 2017. # 3(50). P. 75-86. URL: <http://surl.li/ghwqf>.
3. How Thermal Cameras Work and Why They're So Important. Advantages. URL: <http://surl.li/ghwqk>.
4. Nenia, O. V. Suchasni teplovizory dlia spetsialnoho ta povsiakdennoho zastosuvannia [Modern thermal imaging cameras for special and everyday use]. *Suchasna spetsialna tekhnika – Modern special equipment*. 2016. # 4(47). P. 108-120. URL: <http://surl.li/tgop>.
5. Na shcho zvernuty uvahu pid chas vyboru teplovizora [What to pay attention to when choosing a thermal imager]. URL: <https://gre4ka.info/zhyttia/69389-na-sho-zvernuti-uvagu-pid-chas-vyboru-teplovizora>.
6. Francisco, R., Francisco, V., Carlos, L. (2019, March-April). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 16(2), 1-22. URL: <http://surl.li/ghwri>. <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>.
7. Mobile Robotics: A Brief Overview. URL: <http://surl.li/ghwqz>.
8. Tkachuk A. H., Dobrzhanskyi O. O., Bohdanovskyi M. V., Kravchuk A. R. Proektuvannia informatsiino-vymiriuvalnoi systemy dlia monitorynhu naiavnosti shkidlyvykh ta vybukhonebezpechnykh haziv na bazi robotyzovanoi husenychnoi platformy [Designing an information and measuring system for monitoring the presence of harmful and explosive gases based on a robotic tracked platform]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky. Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical sciences*. 2022. Vol. 33(72), # 2. P. 108-113.
9. Tkachuk A. H. Hraduiuvalna kharakterystyka chutlyvoho elementa systemy stabilizatsii optychnykh prystroiv na bazi robotyzovanoi platformy [Graduation characteristic of the sensing element of the optical device stabilisation system based on a robotic platform]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky. Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical sciences*. 2022. Vol. 33(72), # 5. P. 150-163.
10. Mohd, J. H., Mohd, M. (2017). Night Vision Technology: An Overview. *International Journal of Computer Applications*, 167(13), 37-42. <http://doi.org/10.5120/ijca2017914562>.
11. New Aerial Solar Farm Inspection Takes Off for Wesii. URL: <http://surl.li/ghwqs>.
12. High Performance, Reliable LWIR Thermal Imaging with Teledyne FLIR Tau 2 Series. URL: <https://www.flir.com/oem/tau-series/>.
13. Teledyne FLIR Releases Tau2+ Longwave Infrared Thermal Camera Module with Enhanced Performance and Increased Sensitivity. URL: <http://surl.li/ghwqx>.
14. High Performance, Reliable LWIR Thermal Imaging with Teledyne FLIR Tau 2 Series. Indian Defence Review. URL: <http://surl.li/ghwpy>.
15. Rupesh, P. R., Swapnil, S. R., Manisha, P. W. (2013). Night Vision Techniques and Their Applications. *International Journal of Modern Engineering Research*. 3(2), 816-820. URL: <http://surl.li/ghwoy>.

Надійшла до редакції: 07.05.2023

В. П. Ягліньський, д.т.н., С. С. Гутиря, д.т.н., В. В. Вовк*Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна***НЕОДНОЗНАЧНІСТЬ ТА СИНГУЛЯРНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ
ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ТИПУ БІГЛАЙД**

В статті розглянуті питання планування і отримання формоутворюючих траєкторій механізмів паралельної структури типу біглайд. Розглянуті можливості формування функціональних траєкторій двоосного двокоординатного біглайда у прямій задачі у вигляді узагальнених координат ступенів рухомості і в оберненій задачі у вигляді координат полюса схвата. Виявлені умови виникнення неоднозначності положення механізму у прямій і оберненій задачах. З метою уникнення неоднозначності запропоновано керування процесом формування траєкторії за допомогою додаткового параметра. В процесі комп'ютерного 3-D моделювання досліджені сингулярні конфігурації механізму двоосного біглайда з паралельними напрямними. Розроблені аналітичні моделі процесу формування траєкторій та запропоновані кінематичні умови уникнення процесів запирання механізму у сингулярних конфігураціях. Для механізму паралельної структури типу біглайд виявлені сингулярні конфігурації з квазінульовою та від'ємною жорсткістю. З використанням принципу Лагранжа віртуальних переміщень отримані аналітичні моделі узагальнених коефіцієнтів жорсткості механізму в залежності від сформованої конфігурації.

Ключові слова: *запирання механізму, конфігурація, узагальнені координати, квазінульова і від'ємна жорсткість.*

V. P. Yahlinskyi, DSc, S. S. Hutyria DSc, V. V. Vovk**AMBIGUITY AND SINGULARITY MECHANISMS OF PARALLEL
STRUCTURE OF BIGLIDE TYPE**

The article deals with the issues of planning and obtaining shaping trajectories of the mechanisms of a parallel structure of the biglide type. The possibilities of forming functional trajectories of a biaxial two-coordinate biglide in the direct problem in the form of generalized coordinates of the degrees of freedom and the inverse problem in the form of gripper pole coordinates are considered. The conditions for the occurrence of ambiguity in the position of the mechanism in direct and inverse problems are revealed. To avoid ambiguity, it is proposed to control the process of forming a trajectory using an additional parameter. In the process of computer 3-D modeling, singular configurations of the biaxial biglide mechanism with parallel guides were studied. Analytical models for the formation of trajectories are developed and kinematic conditions are proposed for avoiding locking processes in the mechanism in singular configurations. Singular configurations with quasi-zero and negative stiffness have been found for the mechanism of a parallel structure of the biglide type. Using the Lagrange principle of virtual (possible) displacements, analytical models of the generalized stiffness coefficients of the mechanism are obtained depending on the formed configuration. Configurations with quasi-zero stiffness correspond to zero values of the stiffness coefficients, and for negative stiffness, a characteristic transition through a singular configuration. Analytical expressions for the relative rigidities of the biglide mechanism are obtained and diagrams of their change for different configurations are constructed. The influence of the design parameters of the biglide on the value of the relative generalized stiffness of the entire mechanism has been studied. It has been established that within the range of configuration angle change from 0 to 12° and from 45° to 80°, the values of relative stiffness coefficients are much higher than within the range from 15° to 45°, which allows controlling the rigidity of the mechanism and having a positive effect on the positioning accuracy of the pole. biglide.

Keywords: *mechanism locking, configuration, generalized coordinates, quasi-zero and negative stiffness.*

DOI 10.32684/2412-5288-2023-1-22-45-52

Вступ

Період технічної еволюції 2000-2020 років відрізняється створенням гами різноманітних роботів-верстатів на основі механізмів паралельної структури (МПС) [1, 2]. Свердлильні, фрезерні верстати-роботи на основі МПС мають високу маневреність, а також забезпечують можливість вертикального компонування. Характерними рисами такої конструкції є комбінація шпіндельної головки із платформою, до якої прикріплені кінці двох, трьох або шести прямолінійних штанг, що переміщуються лінійно, але не уздовж осей координат X, Y, Z [3, 4]. Промислові платформи (ПП) на основі МПС сприяють значному розширенню можливостей сучасного технологічного обладнання, особливо в умовах значних динамічних навантажень, а також у складі верстатів-роботів з багатокоординатною системою управління при виконанні операцій з обробки складних поверхонь [5]. Точність позиціонування серійних моделей верстатів-роботів досягає 1...5 мкм, частота обертання шпинделя – 30000 об/хв, швидкість переміщень ПП – 90 м/хв, максимальні пришвидження – 10 м/с² (при випробуваннях – 50 м/с²) [6].

Постановка проблеми в загальному виді

Найпростішими конструкціями МПС прийнято вважати структури із двома рухомими штангами постійної довжини типу біглайд (рис. 1, 2, 3), а зі штангами змінної довжини – типу біпод. Дельта-роботи містять механізми із примусовим обертовим рухом опорного шарніра, розташованого на нерухомому базисі. Застосування ПП на основі дельта-механізмів дозволило значно збільшити продуктивність технологічного устаткування в харчовій промисловості [7]. Відомим різновидом дельта-механізмів з поєднанням конструктивних особливостей біглайда і біпод є МПС типу ножиці (на основі V-подібного з'єднання ланок (рис. 3, 4) [5, 6]. Також розроблено комбіновані структури МПС на основі триподу-триаглайду, які застосовують для захисту обладнання від ударів та вібрацій [1, 2].

Досвід експлуатації технологічного обладнання на основі МПС і відомі дослідження показали, що проблема визначення та аналіз функціональних параметрів типових конструкцій МПС типу біглайд досліджені недостатньо, зокрема:

– не вирішена проблема неоднозначності функціонування у певних конфігураціях робочого простору;

– не визначено системну залежність жорсткості МПС від формоутворюючої

конфігурації;

– не розглянуті питання виникнення і унеможливлення функціонування біглайда у сингулярних конфігураціях;

– не досліджені умови виникнення квазінульової та від'ємної жорсткості МПС.

Особливо важливою уявляється задача визначення областей оптимальних значень жорсткості МПС на стадії проектування.

Для дослідження функціональної ефективності МПС типів одноосовий та двоосовий біглайд визнано обрати за необхідне:

– розробити аналітичні моделі визначення і уникнення неоднозначності конфігурацій МПС в робочому просторі;

– дослідити умови виникнення сингулярних операцій;

– визначити параметри жорсткості біглайда у робочому просторі залежно від формоутворюючої конфігурації МПС;

– визначити та дослідити умови виникнення квазінульової та від'ємної жорсткості МПС;

– виконати комп'ютерне 3-D моделювання функціональних траєкторій біглайда зі умов виникнення сингулярності та квазінульової та від'ємної жорсткості.

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

Першою науковою працею, у якій розроблено нову концепцію гібридних каркасних компонувань верстатів на основі МПС за модульним принципом є монографія українських вчених Ю. М. Кузнецова, Д. А. Дмитрієва й Г. Ю. Диневича [8]. Розглянуто сучасний стан проблеми створення технологічного устаткування з паралельною кінематикою, досвід досліджень ПП на основі МПС в Україні та за кордоном, еволюцію й прогнозування розвитку аналогічних пристроїв у робото- і верстатобудуванні. Наведено приклади оригінальних, захищених патентами, каркасних компонувань структурних схем і конструкцій багатофункціонального устаткування на основі МПС.

Методологічні основи підвищення технічного рівня верстатів-роботів на основі МПС розглянуті в наукових працях [8, 9].

Формуванню критеріїв відтворення функціональних властивостей технологічного обладнання присвячені роботи [8, 9].

ПП на основі МПС за схемою біглайда у загальному вигляді складається із рухомої частини (платформи) і нерухомої (основи), з'єднаних між собою штангами постійної довжини (рис. 4). Штанги мають на кінцях циліндричні шарніри, один із яких забезпечує можливість поступального руху відносно основи

[1, 8]. Платформа та її елементи здійснюють плоский рух.

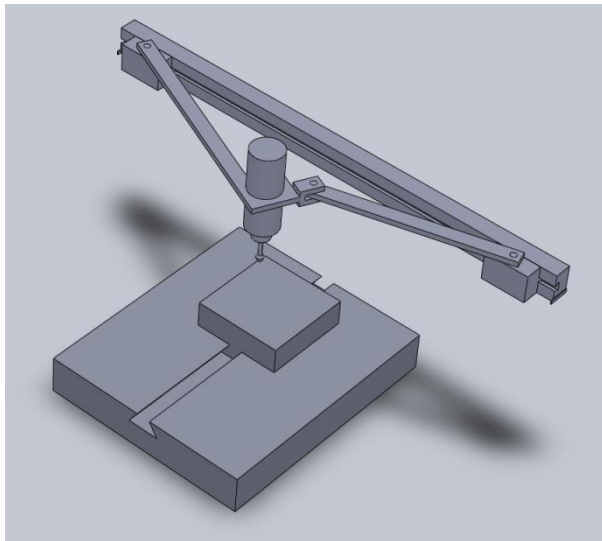
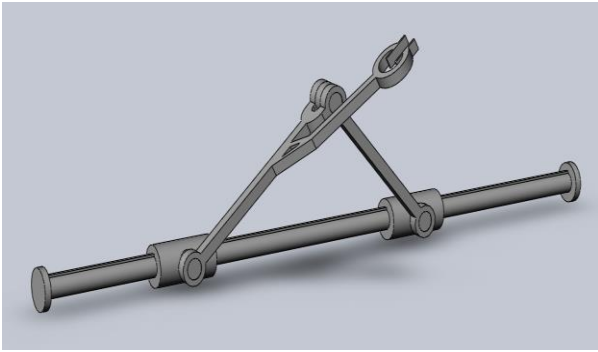


Рисунок 1 – Модель одноосового двокоординатного біглайда

Серед конструкцій діючих верстатів-роботів з МПСК типу біглайд, що містять два паралельних кінематичних ланцюга з двома керованими приводами, розташованими по одному в кожному ланцюгу, є відомим верстат типу *SPECHT Experimental* (ФРН) з горизонтальним розташуванням шпинделя [11, 12]. Конструкція містить вертикальні паралельні напрямні і рухомий стіл, що рухається перпендикулярно площині напрямних. Така компоновка верстату забезпечує максимальну швидкість вихідної ланки (шпинделю) до 2 м/с і пришвидшення до 15 м/с². За таким же принципом побудовано верстат моделі *Trijoint 900 H* з горизонтальним розташуванням шпинделю, розроблений у Чеському технічному університеті (м. Прага) і виготовлений фірмою *Kovosvit MAS* [1, 8]. Гарантована точність позиціонування біглайдів, за певних умов застосування, досягає 40...50 мкм.

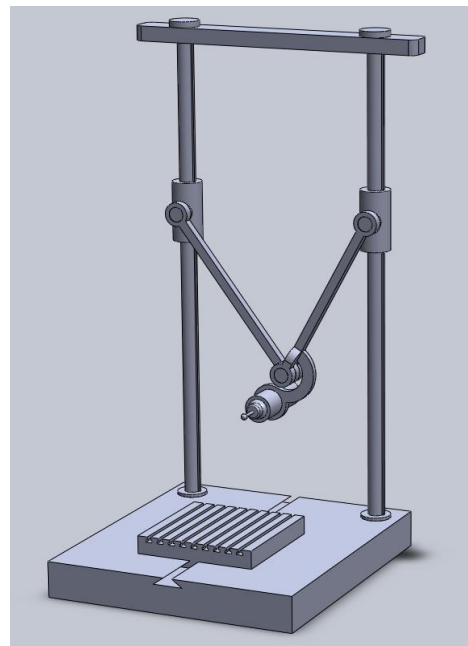
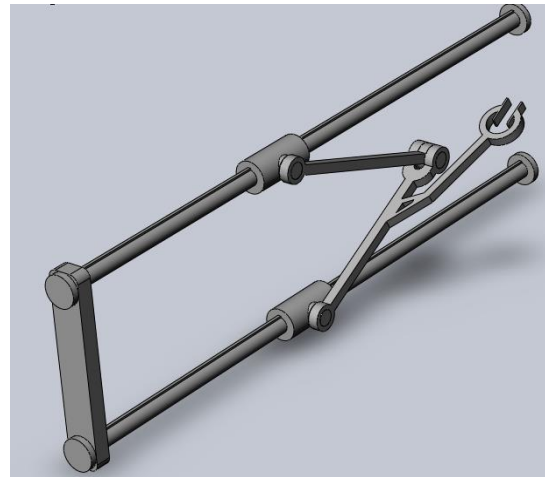


Рисунок 2 – Твердотільна модель двоосового двокоординатного біглайда

Викладення основного матеріалу.

Серед множини конструкцій МПС у складі сучасних верстатів-роботів, виділяють дві основні групи [8]:

- просторові механізми з телескопічними штангами керовано-змінної довжини (біпод, трипод, лінапод, пентапод, гексапод);

- механізми зі штангами (стрижнями) постійної довжини, шарнірно пов'язаними з рухомими каретками, які розташовані на напрямних станини (біглайд, триглайд, гексаглайд).

У верстатах другої групи механізми приводів і двигуни розташовані на станині, а основні навантаження сприймають напрямні верстата, що дозволяє зменшити рухомі маси ланок, підвищити швидкість переміщень до 30 м/хв і точність обробки до 0,1 мкм.

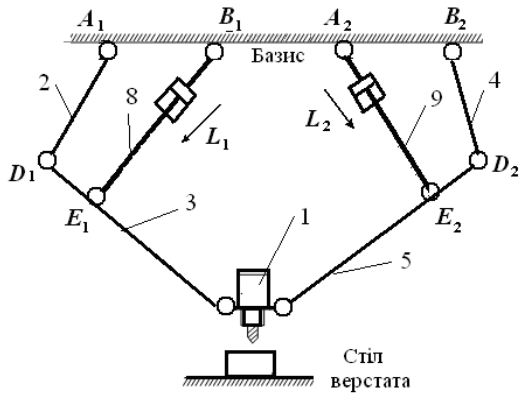


Рисунок 3 – Схема МПС типу “ножиці” з ланками змінної довжини: A_1, B_1, A_2, B_2 – нерухомі опори; 1 – інструментальна головка; 2, ..., 5 і 8, 9 – позначення штанг постійної та змінної довжини; L_1, L_2 – подовження штанг

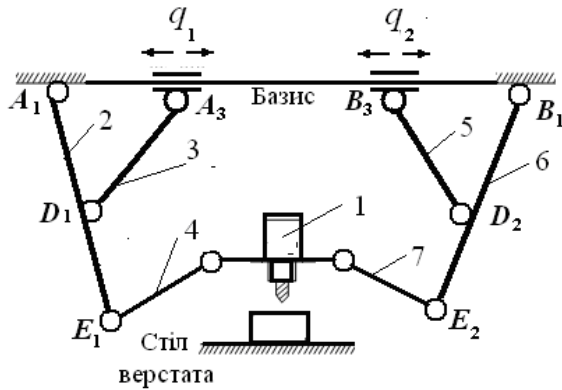


Рисунок 4 – Схеми МПСК типу “ножиці” з ланками постійної (б) довжини: A_3, B_3 – рухомі опори; 1 – інструментальна головка; 2, ..., 7 – позначення штанг постійної довжини; q_1, q_2 – узагальнені координати

Водночас, за даними практичного застосування, є відомим негативний прояв недостатньої жорсткості конструкцій МПС, а також її мінливість при виконанні технологічних операцій, що спричиняє зміни частотних характеристик системи, небажані явища резонансного типу, збільшення часу перехідних процесів тощо.

Серед відомих досліджень жорсткості МПС та відповідних методів найбільш ефективними уявляються моделювання жорсткості методом кінцевих елементів [1, 4, 8]; експериментальне визначення жорсткості МПС [8]; теоретичний аналіз матричним методом жорсткості шестикоординатного МПС з використанням плюкерівих координат ліній штанг [1].

Основою кінематики двоосового біглайда є ковзання уздовж напрямних основ штанг незмінної довжини l_1 і l_2 (рис. 5) [1, 8, 10].

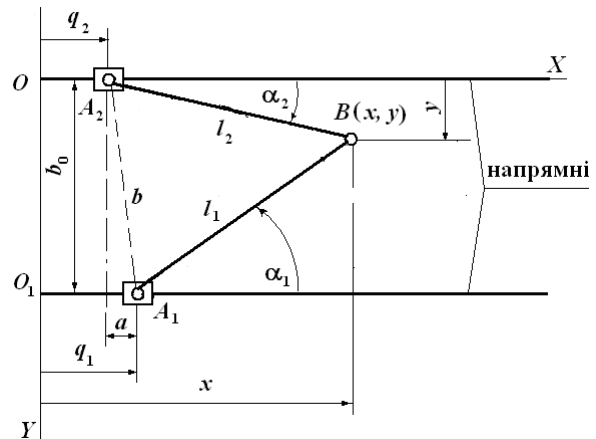


Рисунок 5 – Схема переміщення біглайда (α_1 і α_2 – кути конфігурації біглайда)

Результати комп'ютерного моделювання МПС типу біглайд підтвердили наявність сингулярних конфігурацій і конфігурацій з присутністю квазінульової та від'ємної жорсткості.

Із геометричних співвідношень (рис. 5) отримано програми руху такого біглайда у прямій (1) та зворотній (2) задачах кінематики

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= x - k_0 \cdot \sqrt{l_1^2 - y^2}, \\ q_2 &= x - k_0 \cdot \sqrt{l_2^2 - (b_0 - y)^2} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= q_1 + \frac{l_1}{b} \left[-\gamma_1 (q_1 - q_2) + b_0 \cdot k_0 \cdot \sqrt{1 - \gamma_1^2} \right] \\ y &= \frac{l_1}{b} \left[\gamma_1 b_0 - (q_1 - q_2) \cdot k_0 \cdot \sqrt{1 - \gamma_1^2} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{l_1^2 - l_2^2 + b^2}{2bl_1}, \\ b^2 &= b_0^2 + a^2 = b_0^2 + (q_1 - q_2)^2 \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

де k_0 – коефіцієнт неоднозначності в сингулярних конфігураціях (рис. 6, 7).

Сингулярним конфігураціям біглайда відповідають неоднозначності його розташування у робочому просторі (рис. 6). Виявлено, що такі неоднозначності зумовлені знаками $\pm$ перед радикалом у формулах (1) і (2). Запропоновано усунення неоднозначності у сингулярних конфігураціях МПС типу біглайд

уведенням у формули параметру однозначності k_0 (табл. 1, 2).

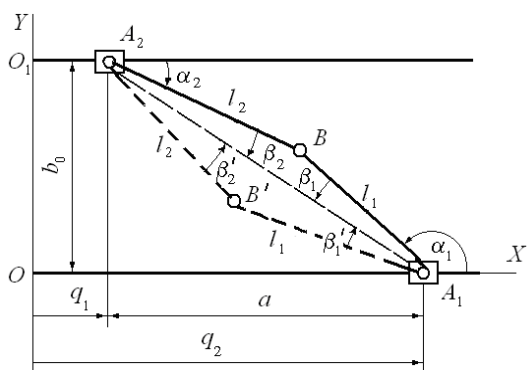


Рисунок 6 – Розрахункова схема неоднозначності конфігурацій двоосового біглайда у прямій задачі кінематики

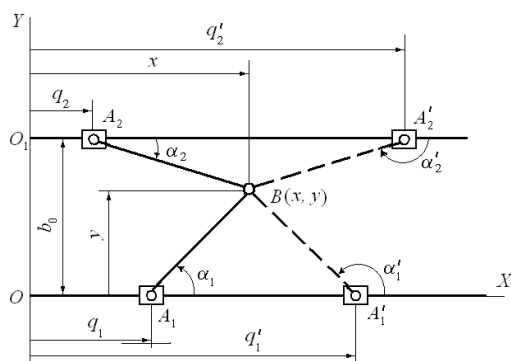


Рисунок 7 – Розрахункова схема неоднозначності конфігурацій двоосового біглайда у зворотній задачі кінематики

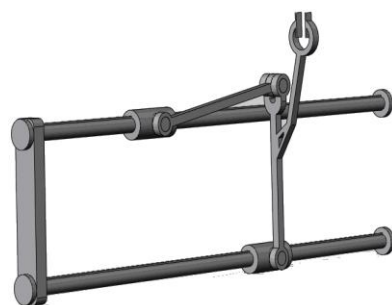
Таблиця 1 – Параметр однозначності конфігурацій двоосового біглайда

Пряма задача кінематики	
Характерні точки, рис. 6	Параметр k_0
B	1
B'	-1

Таблиця 2 – Параметр однозначності конфігурацій двоосового біглайда

Зворотна задача кінематики		
Узагальнені координати	Характерні точки, рис. 7	Параметр k_0
q_1	A_1	1
q_2	A_2	1
q'_1	A'_1	-1
q'_2	A'_2	-1

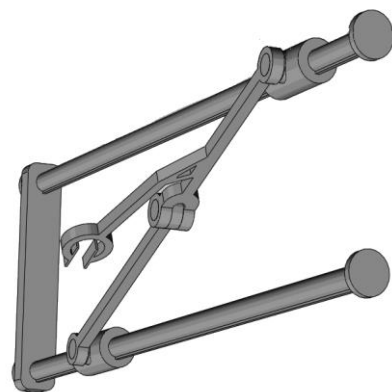
Сингулярні конфігурації характеризуються не тільки неоднозначністю визначення положення, а й максимальними значеннями параметрів жорсткості (рис. 8, 9).



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Комп'ютерне моделювання сингулярних конфігурацій двоосового двокоординатного біглайда (плоского біглайда з паралельними напрямними)

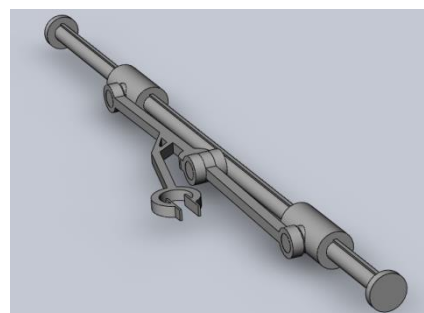


Рисунок 9 – Сингулярна конфігурація одноосового двокоординатного біглайда

З умови сумісності деформацій біглайда (рис. 10) отримано:

$$x_1 = u + \sqrt{l_1^2 - (b_0 - y)^2} - \sqrt{l_1^2 - (b_0 - y - v)^2}; \quad (4)$$

$$x_2 = u + \sqrt{l_2^2 - y^2} - \sqrt{l_2^2 - (y + v)^2}. \quad (5)$$

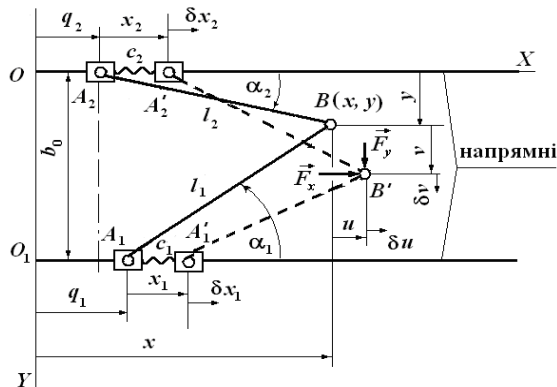


Рисунок 10 – Схема переміщень біглайда під дією сил F_x, F_y (α_1 і α_2 кути конфігурації)

Характеристики сил пружності визначено з використанням принципу віртуальних переміщень Лагранжа у вигляді

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = J^0 K_0 J \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{pmatrix}, K_0 = \begin{pmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{pmatrix},$$

де c_1, c_2 – сталі коефіцієнти узагальненої жорсткості приводів біглайда;

K_0 – діагональна матриця узагальненої жорсткості.

За умови $c_1 = c_2 = c$ визначено функції від кута α_2 коефіцієнтів відносних жорсткостей

$$\left. \begin{aligned} f_{c1} &= c_{xy}/c = \operatorname{tg} \alpha_2 - \gamma_0 / \sqrt{1 - \gamma_0^2}, \\ f_{c2} &= c_{yy}/c = \operatorname{tg}^2 \alpha_2 + \gamma_0^2 / (1 - \gamma_0^2), \end{aligned} \right\}$$

$$\gamma_0 = \frac{b_0 - l_2 \sin \alpha_2}{l_1}. \quad (6)$$

Встановлено, що у межах $\alpha_2 = 0 \div 12^\circ$ та $\alpha_2 = 45 \div 80^\circ$ значення коефіцієнтів відносних жорсткостей більші, ніж у межах $\alpha_2 = 15 \div 45^\circ$ (рис. 11). Встановлено залежність жорсткості від відносних розмірів ланок біглайда b_0/l_1 , а також виявлено наявність квазінульової та від'ємної жорсткості, що свідчить про можливість зниження точності позиціонування у відповідних конфігураціях біглайда (рис. 11).

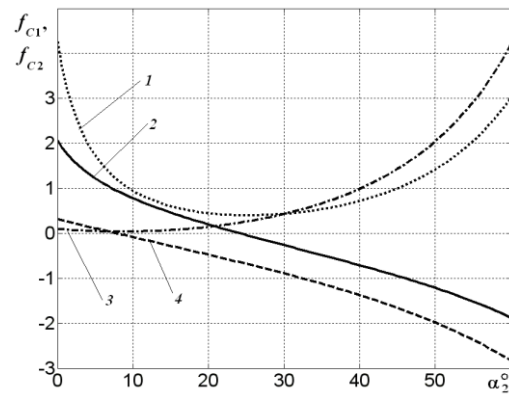


Рисунок 11 – Залежність жорсткості біглайда від кута конфігурації α_2 при $l_2/l_1 = 1,2$ (криві 1 і 2 відповідають значенню $b_0/l_1 = 0,9$; 3 і 4 – $b_0/l_1 = 0,3$)

На основі характеристик кінематики біглайда у формі похідних за часом від співвідношень (1) та (2) отримано аналітичні умови відсутності запирання механізму у вигляді

$$\ddot{q}_1 \neq \ddot{q}_2 \neq 0, \quad \ddot{x} \neq \ddot{y} \neq 0. \quad (7)$$

Висновки

1. Запропонована методика унеможливлення неоднозначних конфігурацій двоосового біглайда шляхом керування додатковим параметром.

2. Шляхом комп'ютерного 3-D моделювання виявлені умови виникнення сингулярних конфігурацій МПС типу біглайд та запропоновані аналітичні умови відсутності запирання механізму.

3. Визначені параметри жорсткості біглайда у робочому просторі залежно від формують конфігурації МПС та досліджені умови виникнення квазінульової та від'ємної жорсткості МПС.

4. Отримано аналітичні вирази для жорсткостей механізму біглайда і встановлено залежність жорсткості від відносних розмірів ланок біглайда, що дає змогу впливати на точність позиціонування полюса біглайда.

Список використаних джерел

1. Яглинский В. П., Гутыря С. С. Теория и практика моделирования технического уровня технологических машин. *Моделирование технологических процессов механической обработки и сборки*: коллективная монография. Москва: Издат. дом "Спектр", 2014. С. 224-272.

2. Gutyrta, S., Yaglinitskiy, V., Gaydamaka, A. (2016). System Model of a Technical Level of Rolling Bearings. *British Journal of Applied Science & Technology*, 13(2), 1-8. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/20747>.

3. Кузнєцов Ю. М., Дмитрієв Д. О. Візуалізація формуютьуючих рухів механізмами паралельної структури в верстатах нових компоновок. *Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя*. Тернопіль, 2008. № 1. С. 61-70.

4. Ягліньський В., Гутіря С. Обґрунтування показників надійності промислових роботів і платформ у складі технологічного обладнання. *Scientific foundations of solving engineering tasks and problems: monograph*. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2021. Pp. 599-609. <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II-599-609>.

5. Yaglinitskiy, V., Al-Obaydi A., Kozerskiy, G., Moskvichev, N. (2016). Kinematics Rods of Simulator-Hexapod. *British Journal of Applied Science & Technology*. 16(3). 1-7. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/26274>.

6. Кузнєцов Ю. М., Дмитрієв Д. О. Моделювання технологічних рухів в верстатах з паралельною кінематикою при обробці складно-профільних поверхонь. *Зб. наук. праць НТУ «ХПІ» «Современные технологии в машиностроении»*. 2008. Вып. 1. С. 81-89.

7. Hutyria S., Yaglinitskiy V., Chanchin A., Khomiak Y., Popov V. (2020). Evolution of trolleybus: directions, indicators, trends. *Diagnostyka*, 21(1), 11-26. <https://doi.org/10.29354/diag/116080>.

8. Кузнєцов Ю. М., Дмитрієв Д. О., Діневич Г. Ю. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури. Херсон: ПП Вишемирський В. С., 2009. 456 с.

9. Ягліньський В. П., Козерацький Г. В., Хихловський А. Б. Паретооптимізація параметрів тренажера-гексапода по критеріям маневренності. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. праць*. Харків, 2018. № 25 (1301). С. 163-167. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_25.pdf.

10. Козерацький Г. В., Ягліньський В. П., Хихловський А. Б., Озернюк О. Т. Кваліметрична модель технічного рівня тренажера-гексапода. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. Зб. наук. пр.* Харків, 2018, № 25 (1301). С. 68-74. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_25.pdf.

11. Chiodo, E., Lauria, D. (2012, October). *Stochastic index definition and estimation for*

reliability and quality assessment of transportation systems. Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), IEEE, Bologna, Italy, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ESARS.2012.6387419>.

References

1. Yaglinitskiy V.P., Gutyrta S.S. Teoriya i praktyka modelirovaniya technicheskogo urovniya technologicheskix mashin. *Modelirovanie technologicheskix procesov mechanicheskoy obrabotki i sborky: kolektivnaya monografiya*. Moskva: Izdat. dom "Spektr", 2014. S. 224-272.

2. Gutyrta, S., Yaglinitskiy, V., Gaydamaka, A. (2016). System Model of a Technical Level of Rolling Bearings. *British Journal of Applied Science & Technology*, 13(2), 1-8. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/20747>.

3. Kuznetsov Yu. M., Dmytriiev D. O. Vizualizatsiia formoutvoriuiuchykh rukhiv mekhanizmamy paralelnoi struktury v verstatakh novykh komponovok. *Visnyk TDTU im. Ivana Puliuia*. Ternopil, 2008. # 1. S. 61-70.

4. Yaglinitskiy V., Hutyria S. *Obgruntuvannia pokaznykiv nadiinosti promyslovykh robotiv i platform u skladi tekhnologichnoho obladdannia* Scientific foundations of solving engineering tasks and problems: monograph. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2021. Pp. 599-609. <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II-599-609>.

5. Yaglinitskiy, V., Al-Obaydi A., Kozerskiy, G., Moskvichev, N. (2016). Kinematics Rods of Simulator-Hexapod. *British Journal of Applied Science & Technology*. 16(3). 1-7. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2016/26274>.

6. Kuznetsov Yu., Dmytriiev D. Modeluvania technologichnyh ruhiv v verststah z paralelnou kinematykou pry obrobtti skladnyh profilnyh poverhon. *Zb. nauk. prats NTU "KhPI" "Sovremennye tehnologii v mashynostroenii"*. 2008. Vyp. 1. S. 81-89.

7. Hutyria S., Yaglinitskiy V., Chanchin A., Khomiak Y., Popov V. (2020). Evolution of trolleybus: directions, indicators, trends. *Diagnostyka*, 21(1), 11-26. <https://doi.org/10.29354/diag/116080>.

8. Kuznetsov Yu. M., Dmytriiev D. O., Dinevych H. Yu. Komponovky verstativ z mekhanizmamy paralelnoi struktury. Kherson: PP Vyshemyrskiy V. S., 2009. 456 s.

9. Yaglinitskiy V. P., Kozerskiy H. V., Khykhlovskiy A. B. Paretooptymyzatsiya parametrov trenazhera-heksapoda po kryteriyam manevrennosti. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR. Zb. nauk. prats.*

- Kharkiv, 2018. # 25 (1301). S. 163-167. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_25.pdf.
10. Kozeratskyi H. V., Yahlinskyi V. P., Khykhlovskyi A. B., Ozerniuk O. T. Kvalimetrychna model tekhnichnoho rivnia trenazhera-heksapoda. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR. Zb. nauk. pr.* Kharkiv, 2018, # 25 (1301). S. 68-74. URL: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_25.pdf.
11. Chiodo, E., Lauria, D. (2012, October). *Stochastic index definition and estimation for reliability and quality assessment of transportation systems*. Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), IEEE, Bologna, Italy, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ESARS.2012.6387419>.

Надійшла до редакції 15.02.2023

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Безвесільна О. М.	36	Кисельова О. І.	6
Братченко Г. Д.	23	Коломієць Л. В.	6, 14
Вовк В. В.	45	Лимаренко О. М.	14
Грабовський О. В.	6	Передерко А. Л.	14
Гутиря С. С.	45	Ткачук А. Г.	36
Добржанський О. О.	36	Цимбалюк А. Г.	14
Квасніков В. П.	23	Цимбалюк Д. А.	14
Квашук Д. М.	23	Яглінський В. П.	45

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна	Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю, доктор технічних наук, професор
БРАТЧЕНКО Геннадій Дмитрович	Військова академія (м. Одеса), м. Одеса, провідний науковий співробітник наукового центру, доктор технічних наук, професор
ВОВК Вікторія Валентинівна	Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Інститут цифрових технологій, дизайну та транспорту, 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	Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, декан Українсько-Іспанського навчального інституту, доктор технічних наук, професор
ДОБРЖАНСЬКИЙ Олександр Олексійович	Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б. Б. Самотокіна, кандидат технічних наук, доцент
КВАСНІКОВ Володимир Павлович	Національний авіаційний університет, м. Київ, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, доктор технічних наук, професор, заслужений метролог України
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
КОЛОМІЄЦЬ Леонід Володимирович	Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, професор кафедри метрології, якості та стандартизації, доктор технічних наук, професор
ЛИМАРЕНКО Олександр Михайлович	Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Інститут цифрових технологій, дизайну та транспорту, завідувач кафедри динаміки машин і механічної інженерії, кандидат технічних наук, доцент
ПЕРЕДЕРКО Анатолій Леонтійович	Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, професор кафедри метрології, якості та стандартизації, доктор технічних наук
ТКАЧУК Андрій Геннадійович	Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир, завідувач кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна, кандидат технічних наук, доцент

ЦИМБАЛЮК
Анатолій
Григорович

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку,
м. Одеса, аспірант кафедри метрології, якості та стандартизації*

ЦИМБАЛЮК
Дмитро
Анатолійович

*Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку,
м. Одеса, аспірант кафедри метрології, якості та стандартизації*

ЯГЛІНСЬКИЙ
Віктор
Петрович

*Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса,
Інститут цифрових технологій, дизайну та транспорту, професор
кафедри динаміки машин та механічної інженерії, доктор технічних
наук, професор*

Наукове видання

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

Випуск 1(22) 2023

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 27.09.2023
Формат 60*88/8. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 6,5
Тираж 100 прим.
65045, м. Одеса, вул. В. Арнаутська, 60.
www.aprel.od.ua*