



ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

№ 3(103)

•• 2023 ••

Український державний університет науки і технологій

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

№ 3 (103) 2023

Виходить 4 рази на рік ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

Автоматизовані та телематичні системи на транспорті
Екологія та промислова безпека
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси
Залізнична колія та автомобільні дороги
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Машинобудування
Рухомий склад і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2023

Засновник:
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. М., доктор технічних наук

ВИПУСКОВИЙ РЕДАКТОР

Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляев М. М., УДУНТ (Україна); Богдявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., УДУНТ (Україна); Вакулєнко І. О., УДУНТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головка Л. С., УДУНТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., УДУНТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., УДУНТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнецов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Сохацький А. В., Університет митної справи та фінансів (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., УДУНТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., УДУНТ (Україна); Шинкаренко В. І., УДУНТ (Україна).

Журнал зареєстровано Національною Радою України з питань телебачення і радіомовлення, рішення № 924 від 28.09.2023 р.
(До 28.09.2023 р.: Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України, свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.)
Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки).
Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 27.12.2023 р., протокол № 5

Видавець

Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро)
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022 р.

Адреса засновника
та редакції

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: stp.journal@ust.edu.ua;
сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

1936–1993 рр. – «Труди Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;

1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);

2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);

2013–2022 рр. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;

з 2023 р. – «Наука та прогрес транспорту»

Ukrainian State University of Science and Technologies

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 3 (103) 2023

Once a quarter ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

Automated and Telematic Systems on Transport
Ecology and Industrial Safety
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport, Power Systems and Complexes
Railroad and Roadway Network
Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling
Material Science
Mechanical Engineering
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro

2023

Founder:

UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Editor-in-Chief	Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Editor	Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., USUST (Ukraine); Bodnar B. E., USUST (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., USUST (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., USUST (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluji National Technical University (Ukraine); Sokhatsky A. V., University of customs and finances (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., USUST (Ukraine); Shinkarenko V. I., USUST (Ukraine); Śładkowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., USUST (Ukraine); Vakulenko I. O., USUST (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., USUST (Ukraine)

Journal was registered Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 924 dated 28.09.2023
(Until 28.09.2023: State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine, Certificate of registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012)
Edition is included in category B «List of scientific specialized publications of Ukraine» by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine no. 409 from 17.03.2020 (technical sciences).
Journal is registered in the International Catalogue of periodicals: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова, etc.
Published according to the Academic Council decision of the University from 27.12.2023, Protocol no. 5

Publisher Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro)
Certificate of Publisher ДК no. 7709 from 14.12.2022

Address of Founder Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua; journal site: <http://stp.diit.edu.ua/>

Edition is being published since 1936:

1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
2013–2022 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
since 2023 – «Наука та прогрес транспорту»

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.25-047.38

К. Л. КОСТЕНКО^{1*}, Т. М. СЕРДЮК^{2*}, В. В. СКАЛЬКО^{3*}

^{1*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта kostenkokristina679@gmail.com, ORCID 0009-0004-2917-6269

^{2*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта t.m.serdiuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2609-4071

^{3*}Каф. військової підготовки спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 09, ел. пошта viktorska66@ukr.net, ORCID 0009-0007-0276-9955

Роботизація діагностики систем залізничної автоматики та зв'язку

Мета. Дослідження спрямоване на: отримання нових знань про застосування електродвигунів у робототехніці; оцінку і вибір двигунів, які доцільно вживати в роботах, що пересуватимуться вздовж залізничної лінії і точно визначатимуть місце uszkodження; розробку методу діагностування пристроїв залізничної автоматики та зв'язку на основі роботизації їх технічного обслуговування й пошуку несправностей; оцінку використання робототехніки на залізницях України та світу. **Методика.** Проаналізовано інформацію з використання електродвигунів у робототехніці, а також застосування роботів на виробництві, яку автори отримали з огляду світової літератури, монографій, реферативних, повнотекстових та лекційних баз даних, наукового співробітництва з передовими кафедрами Університету Твенте, Нідерланди. **Результати.** У ході дослідження: 1) з'ясовано значення робототехніки, що дає можливість замінити людину на важких і тривалих роботах; 2) складено функціональну схему робота, приводу маніпулятора, його складові та принцип дії; 3) обґрунтовано різні типи використання приводів у роботах: електричних, пневматичних та гідравлічних; застосування в електричних приводах різних типів двигунів, їх принцип дії, значення та доступність; 4) визначено перспективність упровадження електроактивних полімерів та еластичних нанотрубок, які удосконалять у подальшому роботів; 5) запропоновано використання роботів у методах діагностування та виявлення пошкоджень систем автоматики та зв'язку, що полегшить та зменшить час обслуговування; 6) спрогнозовано подальший розвиток наукових досліджень та предметного напрямку на залізничному транспорті. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано використовувати роботів для пошуку несправностей у лініях залізничної автоматики та зв'язку, впровадити новітні приводи, які дозволяють удосконалити роботу роботів, зменшити кількість помилок під час визначення дефектів ліній, підвищити точність та ефективність визначення місця uszkodження лінії. **Практична значимість.** За отриманими результатами досліджень можна прогнозувати подальший розвиток наукових досліджень із роботизації діагностики систем залізничної автоматики та зв'язку, предметного напрямку на залізничному транспорті, навчання за новою спеціальністю 174 «Автоматика, робототехніка та комп'ютерно-інтегровані технології». Ці дослідження також можуть бути корисними під час організації науково-практичних семінарів, конференцій, лекцій, курсів підвищення кваліфікації тощо.

Ключові слова: робототехніка; електричний двигун; робот; кабельні лінії; акустичний метод; імпульсний метод

Вступ

Сьогодні, коли машини та автоматизовані пристрої оточують нас на виробництві, транспорті, у побуті, не віриться, що ще в 1920 році було вперше використано слово «робот» [12].

Саме прагнення замінити людину на важких роботах і породило ідею створення робота, потім перші спроби її реалізації і, нарешті, зумовило появу й розвиток сучасної робототехніки та роботобудівництва [8].

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

Робототехніка – це наука про створення та застосування роботів та інших засобів техніки різного призначення. Ця наука породжує нові напрями розвитку таких наук, як кібернетика та механіка. Для кібернетики це пов'язано перш за все з інтелектуальним керуванням, якого потребує пристрій, а для механіки – із багатоланковими механізмами типу маніпуляторів [1, 9].

Сучасні роботи – високотехнологічні пристрої, що виконують виробничі, сервісні, транспортні та навчальні функції. Під час створення перших роботів і аж до сьогодні зразком для них є фізичні можливості людини [8]. У достатньо розвинутому вигляді роботи, аналогічно людині, виконують активні силові та інформаційні взаємодії з навколишнім середовищем, завдяки чому можуть містити штучний інтелект та удосконалювати його.

У створенні роботів одним із відомих шляхів є копіювання людини та живої природи взагалі. Також не менш важливим є пошук принципово нових шляхів, які визначаються можливостями сучасної техніки. Перший приклад такого підходу – створення механічних рук шарнірного типу та захоплювачів із пальцями, що згинаються. Другий приклад підходу – використання електромагнітного поля для орієнтації та взяття предметів, а також колісний хід замість кроків [10, 12].

Завдяки появі робототехніки відбувається стрімке впровадження цих пристроїв у різних галузях господарства й технологій. Роботи знайшли своє призначення на виробництві, у медицині, побуті.

Мета

Основною метою цієї роботи є:

- дослідження розвитку робототехніки у світі, сфер застосування різних типів електродвигунів у робототехніці та мехатроніці;
- визначення функціональної схеми побудови робота для пошуку несправностей у лініях залізничної автоматики;
- розробка за цими дослідженнями методу діагностики залізничної автоматики та зв'язку.

Методика

Однією з головних проблем у системах залізничної автоматики та зв'язку є пошкодження кабельних ліній. На частку цієї категорії ушко-

джень припадає близько 9 % усіх відмов у пристроях залізничної автоматики та зв'язку. Методи їх виявлення є енергозатратними і потребують багато часу на пошук несправності. Також діагностика трубопроводів і кабельних ліній, визначення місця їх пошкоджень вимагає серйозного приладового забезпечення [4, 7, 11].

Сучасні трасошукачі функціонують за принципом електромагнітної індукції. Тому для полегшення та економії часу електромеханікам СЦБ було б доречно використовувати роботів та автоматизовані системи діагностування [1, 3].

Запропоновано функціональну схему робота (рис. 1), яка включає: виконавчу систему – маніпуляційну (один або декілька маніпуляторів) і пересування, якщо робот рухається, сенсорну систему, що постачає роботу інформацію про навколишнє середовище, та пристрій керування [2].

Такий робот дозволить діагностувати та виявляти пошкодження в лініях залізничної автоматики, значно полегшить працю, збільшить точність, зменшить час і витрати людської сили. Виконавча система складається з механічної системи та системи приводів. Механічна система маніпулятора – це зазвичай кінематичне коло з рухомих ланок із кутовим або поступальним переміщенням, яке закінчується робочим органом у вигляді пристрою захоплення або якого-небудь інструменту [2, 6].



Рис. 1. Функціональна схема робота

Fig. 1. Functional diagram of the robot

Для побудови автоматизованої системи діагностування кабельних ліній залізничної автоматики також необхідно визначитися з методом контролю параметрів кабельних ліній.

Акустичний метод дозволяє виявити пошкодження в кабелі на основі оцінки рівня звукового поля, тобто на місці ушкодження створюється

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

іскровий розряд, який під час прослуховування подає певні коливання на пристрій пошуку [1, 3]. Доречним було замінити цьому методі використання людської роботи на роботу робота. Пристрій, який використовують для пошуку пошкоджень у лінії, складається з генератора імпульсів ГВИ–2000 (5000); ГИ–20–2 (70–2), а також приймача акустичного сигналу – датчиків п'єзо- або електромагнітної системи. Тому робот, сконструйований на п'єзодвигуні, із цими генераторами, а також п'єзодатчиками, швидко зможе впоратися із поставленою метою.

Імпульсний метод полягає в тім, що в лінію подають напругу – зондувальні імпульси, які розповсюджуються по лінії, частково відображаються від неоднорідності хвильового опору й повертаються до місця, звідки вони були відправлені. Отримані результати – зондувальний імпульс та відображені сигнали – позначаються на екрані приладів з електронно-променевою трубкою. Завдяки цьому забезпечується достовірність і точність вимірювань. Метод дає хороший результат в разі обривів, короткого замикання, замикання проводів у багатопровідних мережах. Відсутність відображення сигналу свідчить про узгодження лінії за хвильовим опором, а в разі обриву відображений імпульс буде мати ту саму полярність, що і зондувальний імпульс [1, 3, 8].

Запропоновано робот на електродвигуні та з електронно-променевими трубками для заміни ним пристроїв, що беруть участь в імпульсному методі діагностування стану ліній залізничної автоматики і зв'язку. Поєднання акустичного та імпульсного методів дозволить швидко, безперейно й точно визначати місце і вид ушкодження в лініях залізничної автоматики. Тобто можна налаштувати робота так, що він відобразить не лише стан лінії, а і її параметри, місце обриву, вид ушкодження і таке інше. Відстань до місця неоднорідності визначатиметься за відомою швидкості розповсюдження імпульсу по лінії. При цьому точність вимірів залежатиме від частотної характеристики лінії.

Результати

Аналіз приводів і можливостей їх використання в роботах. Для отримання достовірних даних авторами виконано аналіз літературних джерел за обраною тематикою.

Привід є основною частиною робота. Завдяки приводу робот здатний реалізувати різноманітні виробничі операції та функції, які зазвичай безпосередньо виконувала людина.

Сьогодні стрімкий розвиток робототехніки потребує винайдення більш нових пристроїв, які б забезпечили надійність, доступну вартість і зручність експлуатації [9]. Тому розгляд цієї теми дозволить визначити більш новітні винаходи щодо реалізації, оновлення та поліпшення конструкції в робототехніці.

Основною причиною виникнення та розвитку робототехніки є потреба виробництва у гнучкій автоматизації з усуненням людини від непродуктивної участі в машинному виробництві та недостатність для цієї мети традиційних засобів автоматизації [8]. Тому завданням цієї науки, поряд зі створенням власне засобів робототехніки, є розробка основаних на них систем та комплексів різного призначення. Системи та комплекси, автоматизовані за допомогою роботів, прийнято називати роботизованими. Роботизовані системи, у яких роботи виконують основні технологічні операції, називають робототехнічними [5].

Роботи, порівняно з іншими електричними пристроями, відрізняються принципом побудови.

Основним елементом структури робота вважають привід – «м'язи» роботів. Привід включає перш за все двигун та пристрій керування ним. Крім цього, до складу приводу входять механізми для передачі та перетворення руху: редуктори, перетворювачі обертового руху в поступальний і навпаки, гальма, та муфта. Приводи працюють в основному в неусталених режимах та зі змінним навантаженням, при цьому перехідні процеси в них повинні бути практично неколивальними. Важливими параметрами приводів роботів є надійність, доступна вартість, зручність експлуатації.

У роботах знайшли застосування практично всі відомі типи приводів: електричні, гідравлічні та пневматичні; із поступальним та обертовим рухом; регульовані (за положенням та швидкістю) і нерегульовані; замкнені (зі зворотним зв'язком) та розімкнені; неперервної та дискретної дії (у тому числі крокові).

Типова схема приводу маніпулятора (рис. 2) має не лише загальний зворотний зв'язок щодо положення схеми, а й зворотний зв'язок щодо

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

швидкості, яка служить для керування швидкістю [6].

Застосування пневматичних приводів у робототехніці пояснює їх простоту, дешевизну та надійність. Пневматичні двигуни, які використовують у приводах, перетворюють енергію робочого середовища, що перебуває під тиском, у механічну енергію поступального або обертального руху. Ці приводи використовують в основному як нерегульовані з цикловим керуванням. Пневматичні приводи застосовують у роботах невеликої вантажопідйомності – до 10, рідше 20 кг [3, 10].

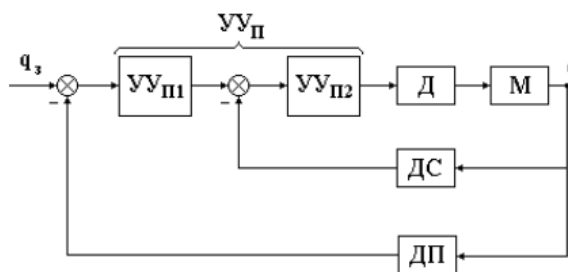


Рис. 2. Схема приводів маніпуляторів:
 Д – двигун; М – механізм передачі та перетворення переміщення;
 ДП, ДС – датчики положення та швидкості;
 УУП1, УУП2 – пристрій керування та дві його частини

Fig. 2. Scheme of manipulator drives:
 M – motor; M – mechanism for transmission and conversion of displacement;
 SP, SS – position and speed sensors;

CD_p, CD_{p1}, CD_{p2} – control device and its two parts

Гідравлічні приводи складніші та дорожчі порівняно з пневматичними та електричними. Гідравлічні двигуни мають такий самий принцип дії щодо перетворення енергії, як і пневматичні. За потужності 500–1000 Вт і більше вони володіють найкращими масогабаритними характеристиками, тому є основним типом приводу для важких та надважких роботів. Такими приводами керувати легко, тому вони знайшли застосування в роботах середньої вантажопідйомності, коли потрібні високоякісні динамічні характеристики [10].

Електричний привід, незважаючи на його хорошу керованість, простоту підведення енергії, великий ККД та зручність в експлуатації, має найгірші масогабаритні характеристики. Використання електромеханічних роботів

сприяло створенню нових типів електричних двигунів, які спеціально були призначені для роботів. Їх розміри мінімізовані [10].

У промислових роботах знайшли застосування колекторні та безколекторні електроприводи постійного струму; нерегульовані і з частотним керуванням асинхронні двигуни; крокові двигуни з регульовальними муфтами в поєднанні з нерегульованими асинхронними двигунами або двигунами постійного струму; електромагніти (соленоїдні та інших типів) [8, 9]. Слід зробити висновок, що в основному застосовують електроприводи з традиційним кутовим переміщенням [10].

Колекторний двигун постійного струму перетворює електричну енергію в механічну, завдяки вартості, простоті конструкції та легкості в обслуговуванні його використовують у приводах роботів. Безколекторні двигуни постійного струму ідеально підходять для малих приводів, які працюють у важких умовах або з високою точністю.

Асинхронні двигуни перетворюють електроенергію змінного струму в механічну, орієнтовані на професійну роботу з великими навантаженнями [3, 12].

Крокові електродвигуни обертаються, здійснюючи переміщення на певний кут керування контролера, що дозволяє обійтися без давача положення, оскільки контролеру точно відомо, на який кут було зроблено поворот ротора [12].

П'єзодвигуни й ультразвукові двигуни є сучасною альтернативою двигунам постійного струму. Принцип дії таких двигунів абсолютно відрізняється: маленькі п'єзоелектричні ніжки, які вібрують з частотою більше ніж 1 000 разів на секунду, змушують мотор рухатися по колу або по прямій. Перевага п'єзодвигунів – це висока швидкість і потужність, непорівнянна з їх розмірами. Такі двигуни вже застосовують у деяких роботах [10, 12].

Повітряні м'язи – простий, але потужний пристрій для забезпечення сили тяги. За накачуванням стисненим повітрям м'язи здатні скорочуватися до 40 % від власної довжини. Причиною цього є плетіння, видиме із зовнішнього боку, яке змушує м'язи бути або довгими й тонкими, або короткими й товстими. Через те, що спосіб їх функціонування схожий із біологічними м'язами, їх можна використовувати для виробництва роботів із м'язами й скелетом.

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

аналогічними м'язам й скелету тварин [8, 10, 12].

Електроактивні полімери – вид пластмас, який змінює форму у відповідь на електричну стимуляцію. Можуть бути сконструйовані таким чином, щоб гнутися, розтягуватися або скорочуватися. Однак досі немає електроактивних полімерів, які б були придатні для виробництва комерційних роботів, оскільки вони й досі залишаються неефективними або неміцними.

Еластичні нанотрубки – далекосяжна експериментальна технологія, що перебуває на ранній стадії розробки. Завдяки відсутності дефектів у нанотрубках волокно може еластично деформуватися на кілька відсотків. Людський біцепс можна замінити приводом із такого матеріалу діаметром 8 мм [10, 12].

Завдяки різній будові, простоті використання та можливості виконання робіт, недоступних для людини, роботи стрімко впроваджують у різних галузях господарства та технології. У деяких країнах робототехніка наявна на підприємстві, її докладно вивчають в університетах, де вона є однією з провідних спеціальностей [5, 6].

Досвід зарубіжжя. Кафедра «Автоматика та телекомунікації» Українського державного університету науки та технологій (УДУНТ) співпрацює із Університетом Твенте, Нідерланди, за програмою академічної мобільності ERASMUS+ (рис. 3–5).

Винахідники Університету Твенте розробляють роботизовані системи різних конструкцій для внутрішнього та зовнішнього застосування.

На рис. 4 показано розробку робота-птаха та дрона. Робот-птах створює деякий шум під час змаху крил і відлякує птахів з тих місць, де вони недоречні. Використовують цей винахід в аеропортах. Дрони застосовують у сільському господарстві, видобувній промисловості, геодезії, топографії, енергетиці, військовій промисловості для вирішення певних задач, діагностики й моніторингу ситуації.

Співробітники, студенти й аспіранти Університету Твенте виконують науково-дослідні роботи з автоматизованого діагностування стану трубопроводу шляхом застосування робота у вигляді черва шарнірної конструкції, який розташовано всередині трубопроводу. Робот

обертається в трубопроводі і за допомогою спеціальних датчиків визначає стан його поверхонь (рис. 5).



Рис. 3. Університет Твенте, Нідерланди

Fig. 3. University of Twente, the Netherlands



Рис. 4. Робот-птах і дрон університету Твенте, Нідерланди

Fig. 4. Robot bird and drone at the University of Twente, the Netherlands

Відвідування Університету Твенте надихнуло на свіжі думки щодо нової сфери впровадження роботів – системи залізничної автоматики та зв'язку, що є особливо актуальним в умовах нашого часу. Обмін досвідом, мобільність дає можливість розширити професійні знання для обох сторін (університетів, їх співробітників та студентів) і здобути прогрес у науково-технічному напрямі, знайти нові сфери застосування роботів, наприклад, у залізничній автоматичній та телекомунікаціях.

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ



Рис. 5. Фізична модель діагностування стану трубопроводу, лабораторія RAM, Університет Твенте, Нідерланди

Fig. 5. Physical model of pipeline condition diagnosis, RAM laboratory, University of Twente, the Netherlands

Наукова новизна та практична значимість

У результаті проведення дослідження розвитку робототехніки в галузі залізничної автоматики та зв'язку:

– проведено огляд розвитку робототехніки, що дає можливість замінити людину на важких і тривалих роботах;

– проаналізовано впровадження нових типів приводів – електричних, пневматичних та гідравлічних, доцільність їх використання у роботах, електроактивних полімерів та еластичних нанотрубок, які удосконалять у подальшому роботів;

– уперше запропоновано використання роботів для діагностування та виявлення пошкоджень ліній залізничної автоматики та зв'язку, їх функціональну схему, що полегшить працю,

збільшить точність, зменшить час на витрати людської сили;

– проаналізовано подальші перспективи розвитку наукових досліджень та предметного напрямку на залізничному транспорті, навчання за новою спеціальністю 174 «Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

Висновок

З'ясовано використання різних типів електродвигунів у конструкції роботів. Ґрунтуючись на результатах аналізу наведених джерел, можемо зробити висновок, що першими двигунами, які почали використовувати у приводах роботів, були двигуни постійного струму. Застосовували як колекторні, так і безколекторні двигуни постійного струму.

Також отримало розповсюдження використання асинхронних двигунів змінного струму та крокових електродвигунів, які призначені для роботів, що працюють із великим навантаженням.

Доведено, що техніки продовжують розробляти новітні, спростовані, якісні, низьковартісні та надійні приводи. Завдяки винайденим повітряним м'язам, електроактивним полімерам та еластичним нанотрубкам роботи повністю зможуть замінити людину у виконанні складних робіт. Доречно і доведення потреби використання в системах залізничної автоматики та зв'язку робототехніки задля діагностування кабельних ліній, що зменшує час на пошук несправностей, збільшує якість і точність виконаної роботи.

Подальше дослідження буде спрямовано на вивчення розвитку робототехніки та мехатроніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белухин Д. С. Сохранение группировок тяговых двигателей при импульсном регулировании напряжения. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2019. № 18. С. 39–45.
2. Лисенко О. І., Тачиніна О. М., Гальченко С. М., Рябова Л. В. Іваницька В. І. Гармаш Т. О., Макарова Я. І. Розробка системи автоматичного керування приводом робота-маніпулятора. 2019. *Проблеми інформатизації та управління*. Т. 1. №. 61. Р. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11>
3. Масленников Е. В, Горб П. Э, Сердюк Т. М, Иванов А. В. Стрелочные привода скоростных железнодорожных магистралей. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2013. № 5. С. 63–82.

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

4. *Приклади для контролю параметрів кабельних ліній*. URL: <https://promix.com.ua/uk/catalog/power-uk/diagcablin-uk-uk>
5. *Робототехніка : від глини до нано-матеріалів*. URL: <https://phm.cuspu.edu.ua/nauka/naukovo-populiarni-publikatsii/2130-robototekhnika-vid-hlyny-do-nano-materialiv.html>
6. *Розвиток робототехніки : майбутнє вже настало*. URL: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/razvitie-robototekhniki-budushee-uzhe-nastupilo/>
7. Botnarevscaia R., Serdiuk T. Analysis of operation of railway communication systems. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*. 2019. № 18. P. 59–64.
8. John J. Craig. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 3rd edition. 2004. Pearson. 408 p.
9. Lynch K. M., Park F. C. *Modern robotics : mechanics, planning, and control*. 2017. Cambridge University Press. 642 p.
10. Mckinnon P. *Robotics : Everything you need to know about robotics from beginner to expert*. 2016. CreateSpace Independent Publishing Platform. 238 p.
11. Serdiuk T., Ansari H. T., Botnarevscaia R. Electromagnetic Influence of AC Traction Network on the Railway Communication Lines. *2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)* (Spokane, 1-5 August, 2022). Spokane, 2022. P. 326–329. DOI: <https://doi.org/10.1109/emcsi39492.2022.9889435>
12. Thrun S., Burgard W. *Probabilistic Robotics : Intelligent Robotics and Autonomous Agent series*. First Edition. 2005. The MIT Press. 672 p.

K. L. KOSTENKO^{1*}, T. M. SERDIUK^{2*}, V. V. SKALKO^{3*}

^{1*}Dep. «Automatic and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail kostenkokristina679@gmail.com, ORCID 0009-0004-2917-6269

^{2*}Dep. «Automatic and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail. t.m.serdiuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2609-4071

^{3*}Dep. Military Training of Specialists of the State Special Transport Service, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 19 09, e-mail viktorska66@ukr.net, ORCID 0009-0007-0276-9955

Robotization of Diagnostics of Railway Automation and Communication Systems

Purpose. The study is aimed at: gaining new knowledge about the use of electric motors in robotics; evaluation and selection of motors that are appropriate for use in robots that will move along the railway line and accurately determine the location of damage; development of a method for diagnosing railway automation and communication devices based on robotization of their maintenance and fault finding; evaluation of the use of robotics on the railways of Ukraine and the world. **Methodology.** The authors analyzed information on the use of electric motors in robotics, as well as the use of robots in production, which they obtained from a review of world literature, monographs, abstract, full-text and lecture databases, and scientific cooperation with leading departments of the University of Twente, the Netherlands. **Findings.** In the course of the study: 1) the importance of robotics, which makes it possible to replace a person in heavy and long work, was clarified; 2) a functional diagram of the robot, the manipulator drive, its components and the principle of operation was drawn up; 3) various types of drives in robots were substantiated: electric, pneumatic and hydraulic; the use of different types of motors in electric drives, their principle of operation, value and availability; 4) the prospects for the introduction of electroactive polymers and elastic nanotubes that will improve robots in the future are determined; 5) the use of robots in methods of diagnosing and detecting damage to automation and communication systems is proposed, which will facilitate and reduce maintenance time; 6) further development of scientific research and subject area in railway transport is predicted. **Originality.** For the first time, it is proposed to use robots to find faults in railway automation and communication lines, to introduce the latest drives that allow to improve the work of robots, reduce the number of errors in identifying line defects, and increase the accuracy and efficiency of determining the location of line damage. **Practical value.** Based on the research results, we can predict the further development of scientific research on robotization of diagnostics of railway automation and communication systems, the subject area of railway transport,

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

and training in the new specialty 174 «Automation, Robotics and Computer-Integrated Technologies». This research can also be useful in organizing scientific and practical seminars, conferences, lectures, advanced training courses, etc.

Keywords: robotics; electric motor; robot; cable lines; acoustic method; pulse method

REFERENCES

1. Belukhin, D. S. (2019). Sokhranenie gruppировок tyagovykh dvigateley pri impulsnom regulirovanii napryazheniya. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 18, 39-45. (in Ukrainian)
2. Lysenko, O. I., Tachinina, O. M., Galchenko, S. M., Ryabova, L. V., Ivanitskaya, V. I., Garmash, T. O., Makarova, Ya. I. (2019). Development of system of automatic control of robotic arm drive. *Problems of Informatization and Management*, 1(61), 57-64. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.61.14040> (in Ukrainian)
3. Maslennykov, E. V., Gorb, P. E., Serdiuk, T. M., & Ivanov, O. V. (2013). Switch motors of speed railway. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 5, 63-82. (in Ukrainian)
4. *Instruments for diagnostic of cables*. Retrieved from <https://promix.com.ua/uk/catalog/power-uk/diagcablin-uk-uk> (in Ukrainian)
5. *Robototekhnika: vid hlyny do nano-materialiv*. Retrieved from <https://phm.cuspu.edu.ua/nauka/naukovopopuliarni-publikatsii/2130-robototekhnika-vid-hlyny-do-nano-materialiv.html> (in Ukrainian)
6. *Rozvytok robototekhniki: maibutnie vzhe nastalo*. URL: <https://metinvest-smc.com/ua/articles/razvitie-robototekhniki-budushee-uzhe-nastupilo/> (in Ukrainian)
7. Botnarevscaia, R., & Serdiuk, T. (2019). Analysis of operation of railway communication systems. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 18, 59-64. (in English)
8. John, J. (2004). *Craig. Introduction to Robotics: Mechanics and Control* (2nd ed.). Pearson. (in English)
9. Lynch, K. M., & Park, F. C. (2017). *Modern robotics: mechanics, planning, and control*. Cambridge University Press. (in English)
10. Mckinnon, P. (2016). *Robotics: Everything you need to know about robotics from beginner to expert*. CreateSpace Independent Publishing Platform. (in English)
11. Serdiuk, T., Ansari, H. T., & Botnarevscaia, R. Electromagnetic Influence of AC Traction Network on the Railway Communication Lines. In *2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMC&Si-Pi)* (pp. 326-329). Spokane, WA, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMCSI39492.2022.9889435> (in English)
12. Thrun S., Burgard W. (2005). *Probabilistic Robotics: Intelligent Robotics and Autonomous Agent series* (1st ed). The MIT Press. (in English)

Надійшла до редколегії: 23.05.2023

Прийнята до друку: 22.09.2023

УДК 621.311

Т. М. СЕРДЮК^{1*}, М. С. СЕРЧЕНКО^{2*}

^{1*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел.пошта t.m.serdiuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2609-4071

^{2*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел.пошта serchenko228@gmail.com, ORCID 0009-0007-7076-6211

Аналіз параметрів якості електричної енергії та пристроїв для їх вимірювання

Мета. Основна мета цього дослідження – дати оцінку явищам, які впливають на параметри якості електричної енергії (ПЯЕ), розглянути способи протидії погіршенню ПЯЕ, оцінити вплив електромагнітних завад на тіло людини, виконати огляд наявних пристроїв для вимірювання параметрів електричної енергії. **Методика.** Для отримання релевантних даних автори провели огляд літератури за темою роботи з використанням повнотекстових і реферативних баз даних. Розглянуто основні причини порушення електромагнітної сумісності (ЕМС) та способи протидії цим порушенням. Виділено основні параметри якості електричної енергії, умови для їх вимірювання та допустимі діапазони згідно з держстандартами України (ДСТУ). Проведено огляд пристроїв для вимірювання параметрів якості електричної енергії та пошук відповідного, який задовольняє українським стандартам. **Результати.** Автори довели: 1) проблема вимірювання параметрів якості електричної енергії є актуальною та важливою для її точного обліку; 2) контроль параметрів якості електроенергії та дотримання держстандартів дозволяє уникнути негативного впливу на систему електропостачання; 3) використання сучасних цифрових пристроїв вимірювання надає більшу точність вимірювання, ніж аналогові, до того ж вони здатні враховувати більшу кількість параметрів за одне вимірювання. **Наукова новизна.** Автори провели дослідження в галузі електромагнітної сумісності з використанням цифрового пристрою, що дає більш точні та надійні результати параметрів якості електричної енергії. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можна як корегувати особисті дослідницькі розвідки окремих вчених чи колективів науковців, так і прогнозувати подальші перспективи розвитку предметного напрямку «Електромагнітна сумісність» у системах тягового електропостачання на залізничному транспорті. Дослідження також можуть бути корисними під час вивчення дисциплін «Електромагнітна сумісність систем залізничної автоматики» та «Електричні кола та лінії залізничної автоматики», організації науково-практичних семінарів, курсів підвищення кваліфікації тощо.

Ключові слова: параметри якості електричної енергії; електромагнітна сумісність; прилади; гармоніки; напруга; струм; потужність

Вступ

Проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) в наш час має велике значення для електроенергетики як у теоретичному, так і в практичному плані. Зокрема, існує проблема якості електричної енергії, тобто дотримання параметрів якості електричної енергії. Значимість цієї проблеми настільки ж велика, як і відомі проблеми екології, енергетичної безпеки та енергоресурсозбереження. Її економічний характер свідчить про величезні збитки через невиконання вимог ЕМС. За різними оцінками, щорічні збитки сягають від 100 до 500 млрд євро [8].

Вимірювання якості електроенергії є найважливішим завданням у дотриманні безпечної та ефективної роботи електричних систем. Останнім часом попит на якісну електроенер-

гію зростає у зв'язку з широким використанням чутливої електронної техніки, такої як комп'ютери, медичні прилади та системи зв'язку. Неналежна якість електроенергії може призвести до відмови обладнання, втрати даних і навіть травм. Отже, необхідно вимірювати і контролювати параметри якості електроенергії (ПЯЕ), щоб забезпечити правильну роботу електричної системи. Вимірювання параметрів якості електроенергії важливе не тільки для безпечної роботи електричних систем, а й для ефективного використання енергії. Погана якість електроенергії може призвести до розтрати енергії та непотрібних витрат, а також до забруднення навколишнього середовища через підвищене споживання енергії. Вимірюючи і контролюючи якість електроенергії, можна

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

оптимізувати споживання енергії та знизити витрати, а також сприяти екологічній стійкості.

Крім того, потреба у вимірюванні якості електроенергії стає дедалі важливішою, оскільки поновлювані джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергія, інтегруються в електричну мережу. Мінливість цих джерел енергії може впливати на якість електроенергії, тому важливо контролювати і регулювати ПЯЕ для забезпечення стабільної та надійної роботи електричної системи. Таким чином, вимірювання параметрів якості електроенергії має вирішальне значення для досягнення безпечної та ефективної роботи електричних систем, підвищення енергоефективності та екологічної стійкості, а також інтеграції поновлюваних джерел енергії. Оскільки технології продовжують розвиватися, а електричні системи стають дедалі складнішими, важливість вимірювання якості електроенергії тільки зростатиме.

Мета

Основною метою наукової роботи є дати оцінку явищам, які впливають на параметри якості електричної енергії, розглянути способи протидії погіршенню ПЯЕ, оцінити вплив електромагнітних завад на тіло людини, зробити огляд наявних пристроїв для вимірювання параметрів електричної енергії.

Предмет дослідження – параметри якості електричної енергії та прилади для їх вимірювання.

Методика

Зазначену проблему широко досліджено в роботах, що присвячені електроживленню тягових систем.

У роботі В. І. Гаврилюка дано короткий огляд питань якості електроенергії на електрифікованих залізницях і відповідних стандартів, наведено основні порушення якості електричної енергії [13].

У роботі Т. М. Сердюк були розглянуті проблеми, пов'язані з енергоефективністю тягових і нетягових мереж, та заходи щодо збереження і поліпшення якості електроенергії [9].

Також у спільній роботі авторів В. Сиченко, Є. Косарева та ін. було проведено дослідження ПЯЕ на шинах власних потреб тягових підста-

нцій постійного та змінного струму та описано важливість дотримання цих показників [10].

Причини порушення ЕМС. Під час експлуатації високовольтного обладнання виникають проблеми, які пов'язані з ЕМС первинних (силових) та вторинних кіл (пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА), пристрої високо-частотного зв'язку (ВЧЗ), режимної та протиаварійної автоматики (ПА)). Вторинні кола мають робочу напругу, яка не перевищує сотні вольт, тобто на три порядки нижче, ніж у первинних колах системи електропостачання. Тому для вторинних кіл виникає небезпека впливу завад, замикань, грозових перенапружень, розрядів статичної електрики та ін. Найбільш тяжкі та часті порушення нормальної роботи електричної мережі 110 кВ та виникають у наслідок впливу розрядів блискавки. Короткочасна напруга в місці удару блискавки може досягати мільйонів вольт, чого достатньо для пробоя ізоляції практично будь-якої мережі. Для захисту від прямих ударів блискавки над дротами мережі встановлюють троси, а на підстанціях – вертикальні блискавковідводи. Для захисту від зворотного перебиття з опори на дрони необхідно кожен опору заземлити з невеликим опором заземлення, приблизно до 10 Ом. Для захисту обладнання підстанцій застосовують спеціальні розрядники або обмежувачі перенапруження (ОПН) [7].

Перехідні процеси та перенапруга наявні в будь-якій електроустановці та є одним з основних джерел аварій у мережах високої напруги. Як правило, вони мають вид затухаючих коливань, проходять через трансформатори та автотрансформатори в мережі іншої напруги та розповсюджуються на великі відстані, зв'язані електрично з місцем появи.

Аварії та оперативні комутації викликають небезпечний та заважаючий вплив кіл високої напруги «первинної комутації» на кола «вторинної комутації» з електронними пристроями інформаційної та комп'ютерної техніки електростанцій та підстанцій високої напруги. Вони можуть призвести до виходу з ладу пристроїв вторинної комутації у найбільш відповідальний момент аварії кіл первинної комутації, коли від кіл вторинної комутації потребується чітка, селективна та безперервна робота [7].

Параметри якості електроенергії. Якість електроенергії є важливим аспектом електро-

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

технічних систем. Вона відповідає певним вимогам і нормам, які встановлені регуляторними органами й орієнтовані на досягнення безпеки та ефективності електричних пристроїв.

Одним із параметрів якості електроенергії є рівень напруги:

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Нормативи встановлюють допустимі відхилення напруги від заданого рівня. Зміни в навантаженні, рівнях напруги та інших факторах можуть призводити до змін у напрузі в різних точках мережі. Для забезпечення стабільної роботи електричних пристроїв, важливо дотримуватись установлених норм для рівня напруги [3].

Коливання напруги є ще одним аспектом, який визначає якість електроенергії:

$$\rho U = \frac{U_{\text{min}} - U_{\text{max}}}{U_{\text{max}}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Якщо напруга змінюється занадто швидко, то це може вплинути на працездатність інших електричних пристроїв. Допустимі відхилення від заданого рівня напруги залежать від типу пристрою, їх встановлюють відповідно до нормативних документів. Коливання напруги мають фіксовані межі, які гарантують надійну роботу електричних систем.

Ще одним аспектом, що впливає на якість електроенергії, є флікер. Флікер відчувається як миготіння чи мерехтіння світла, що може викликати роздратування та погіршення зору [3]:

$$P_{fl} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \leq 1 \quad (3)$$

Встановлені норми для рівня флікеру, які залежать від типу лампи чи пристрою, дозволяють забезпечити комфортні умови для споживачів електричної енергії.

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС (NAEN), або коефіцієнт несинусоїдальності, визначають шляхом порівняння діючого значення напруги з усіма гармоніками, які наявні в цій напрузі, з дійсним значенням першої гармоніки (50 Гц):

$$K_v = \frac{1}{U_{\text{ном}}} \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100 \% = \frac{U_v \Sigma}{U_1} \quad (4)$$

У формулі для розрахунку коефіцієнта несинусоїдальності також використовують порядок останньої врахованої гармоніки та дійсне значення кожної гармоніки.

Нормальні й максимальні значення коефіцієнта несинусоїдальності повинні відповідати певним обмеженням залежно від рівня напруги в електричній мережі. Для напруги до 1 кВ ці обмеження становлять 5 і 10 % відповідно, для напруги 6...20 кВ – 4 і 8 %, для напруги 35 кВ – 3 і 6 %, а для напруги 110 кВ і вище – 2 і 4 % [4].

Напруга гармонік є синусоїдальною напругою з частотою, що становить множник основної частоти (50 Гц) напруги електропостачання:

$$NEAN = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_2)^2} \quad (5)$$

Їх можна виміряти за допомогою відносної амплітуди окремої гармоніки відносно амплітуди основного складника напруги. Також для оцінки напруги гармонік можна використовувати сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС (NEAN), який порівнює загальну спотворену напругу з дійсним значенням першої гармоніки.

Напруга інтергармонік є синусоїдальною напругою з частотою, коефіцієнт пропорційності якої до основного складника напруги не є цілим числом. Рівень інтергармонік зазвичай зростає в енергосистемах низької і середньої напруги (1–35 кВ) через використання нових технологій і перетворювачів частоти. Інтергармоніки низького рівня можуть впливати на якість електричного струму, який використовують у системах із моделюванням звуків.

Відхилення частоти визначають так:

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}} \quad \text{або} \quad qf = \frac{f - f_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

Відхилення частоти раніше регулювали більш жорстко. Вони негативно впливають на роботу електроніки: збільшення частоти понад +0,1 Гц призводить до спотворень зображення, наприклад, на екрані телевізора, а зниження частоти від 49,9 до 49,5 Гц збільшує розмах телевізійного сигналу. Крім того, частота має важливе значення для роботи електродвигунів,

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

трансформаторів і реакторів зі сталевими сердечниками.

Згідно з нормами ДСТУ EN 50160:2014, для систем, підключених до зовнішнього електропостачання, частота повинна бути $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$ протягом 99,5 % часу за рік, а під час вимірювання – $50 \text{ Гц} +4...-6 \%$ [4]. Для систем, що не підключені до зовнішнього електропостачання, граничні значення відхилення частоти становлять $\pm 2 \%$ протягом 95 % часу за тиждень і $\pm 15 \%$ протягом 100 % часу вимірювання.

Провали напруги й перенапруги виникають у випадкових аварійних ситуаціях або в разі перемикачів навантаження. Поріг початку провалу напруги зазвичай становить 90 % від номінальної напруги, а поріг початку перенапруги – 110 %. Оцінку провалів напруги здійснюють відповідно до стандарту EN 61000–4–30 залежно від поставленої мети оцінки [6].

Небаланс напруги або напругу зворотної послідовності визначають як коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю (K_{2U}). Згідно зі стандартом ГОСТ 13109–97, K_{2U} повинен бути не більше 2 % протягом 95 % часу вимірювання та не більше 4 % протягом 100 % часу вимірювання від напруги прямої послідовності, яка є основним складником. Однак стандарт ДСТУ EN 50160:2014 встановлює більш жорсткі вимоги, дозволяючи лише 3 % від напруги прямої послідовності для K_{2U} .

Усі ці вимоги до якості електроенергії спрямовані на досягнення безпеки та якісної роботи електроприладів. Відповідна якість електроенергії впливає на ефективність і тривалість роботи пристроїв, а також забезпечує комфортні умови для користувачів [3, 4, 11].

Прилади вимірювання показників ЕМС. Згідно з вимогами МЕК, параметри ЕМС обов'язково потрібно контролювати шляхом відхилення частоти та напруги K_{2U} та $K_{U(n)}$ [5].

Вимірювання цих параметрів потрібно проводити згідно з вимогами для класів А та В.

Вимірювальний пристрій може мати різні класи вимірювання для різних параметрів.

Прилади для вимірювання та оцінки результатів вимірювання параметрів якості електроенергії зазвичай мають функціональний ряд, який складається з таких основних елементів: вимірювальні перетворювачі; пристрої вимірювання; пристрої оцінки результатів вимірю-

вання. Узагальнену структурну схему приладу для вимірювання ПЯЕ подано на рис. 1.

Для вимірювання показників ЕМС застосовують як однофункціональні прилади, призначені для вимірювання одної характеристики ЕМС або одного параметру якості, багатфункціональні прилади та системи, так звані аналізатори показників якості електроенергії, що дозволяють вимірювати та оцінювати декілька характеристик чи ПЯЕ. Широко застосовують комп'ютерні вимірювальні системи.

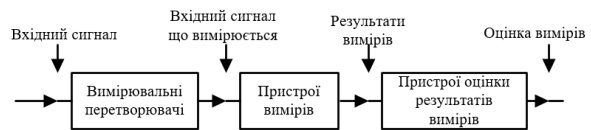


Рис. 1. Структурна схема приладу для вимірювання ПЯЕ

Fig. 1. Schematic diagram of the device for measuring the PQA

У наш час виробляють та експлуатують вимірювальні прилади й системи, основані на цифровій техніці. Як приклад можна розглянути аналізатор якості енергії PM175, призначений для вимірювання та реєстрації основних параметрів електричної енергії та потужності, у тому числі показників якості електричної енергії, у системах електропостачання загального призначення [2].

Аналізатори можуть бути під'єднані через вимірювальні трансформатори струму та напруги. Основним їх застосуванням є моніторинг та запис параметрів енергії в мережах низької та середньої напруги. Аналізатор параметрів якості електроенергії SATEC PM175 подано на рис. 2.



Рис. 2. Аналізатор параметрів якості електроенергії SATEC PM175

Fig. 2. Analyser of power quality parameters SATEC PM175

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

PM175 вимірює, обчислює і реєструє всі показники якості електричної енергії, визначені в ДСТУ OIML D11:2012, ДСТУ EN 62052–11:2015, ДСТУ EN 62053–22:2015 [5]:

- 1) сталі відхилення напруги в режимах найбільшого, найменшого і добового навантаження;
- 2) викривлення синусоїдальності кривої напруги;
- 3) коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги;
- 4) несиметрія напруг зворотної та нульової послідовності;
- 5) відхилення частоти;
- 6) розмах зміни напруги та дозу флік ера;
- 7) провали напруги;
- 8) імпульсну напругу й тимчасові перенапруги;
- 9) має клас точності 0.2S.

Також для вимірювання параметрів якості електричної енергії використовують аналізатор PQM–700UA (рис. 3), характеристики якого наведено нижче [1].



Рис. 3. Аналізатор параметрів якості електроенергії PQM–700UA із сертифікатом класу S

Fig. 3. Analyser of power quality parameters PQM–700UA with class S certificate

Аналізатор параметрів якості електричної енергії використовують для проведення реєстрації та аналізу основних параметрів якості електричної енергії в мережах електропостачання.

PQM–700UA – це пристрій, призначений для вимірювання та аналізу основних параметрів якості електричної енергії в мережах із частотою 50/60 Гц. Він може працювати навіть у складних погодних умовах і не позначається електричними полями, що дозволяє його вста-

новлювати навіть безпосередньо на ЛЕП. Корпус має ступінь захисту IP65 для більшої надійності [1].

PQM–700UA може працювати в широкому температурному діапазоні від -20 до $+55$ С. Стабільну роботу в умовах негативних температур забезпечує вбудований підігрів. У разі відімкнення зовнішнього живлення пристрій продовжить працювати завдяки внутрішній Li-Ion акумуляторній батареї.

Також широко використовують пристрій контролю якості електроенергії SICAM P855 від компанії SIEMENS (рис. 4) [15].



Рис. 4. Пристрій контролю якості електроенергії SICAM P855

Fig. 4. SICAM P855 power quality monitoring device

Багатофункціональний пристрій SICAM P855 використовують для збору, відображення й передачі електричних величин, наприклад, змінної напруги і струму, потужності, гармоніки і т. д. Вимірювані величини і події реєструють і обробляють відповідно до вимог стандарту якості електроенергії MEK 61000–4–30. Отримані величини можна виводити на АРМ або в систему автоматизації/SCADA-систему через комунікаційні інтерфейси або відображати на дисплеї пристрою. Додатково до функції моніторингу пристрій SICAM P855 також виконує комбіновану функцію реєстрації та оцінки даних. Отримані величини можуть бути записані на вибраних інтервалах часу за допомогою різних засобів реєстрації, таких як реєстратор параметрів якості електроенергії або реєстратор аварійних подій. Довгострокові дані та події можна оцінити безпосередньо через веббраузер пристрою і відобразити у вигляді звіту відповідно до стандартів якості електроенергії (EN 50160 [4]).

Реєстрація отриманих значень відповідно до вимог стандарту з контролю якості електроене-

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

ргії MEK 61000–4–30, включаючи мерехтіння, передбачас:

1) автоматичне складання звіту про якість електроенергії згідно з EN 50160;

2) функцію реєстрації середніх значень і аварійних подій;

3) експорт даних у формати PQDIF і COMTRADE;

4) пам'ять 2 ГБ для зберігання даних реєстратора;

5) оцінку подій на HTML-сторінках через вбудований вебсервер.

Широкий спектр застосування має вимірювач потужності Yokogawa WT5000 в масштабах сучасної промисловості: електромобілі, відновлювальні джерела енергії, промислова робототехніка, побутова та офісна техніка, тестування трансформаторів, пристроїв компенсації реактивної потужності, сервоприводів, іншого силового та медичного обладнання [17].

Цей пристрій дозволяє вимірювати електричні параметри з високою точністю – похибка до 0,01 % показання +0,02 % в діапазоні 50...60 Гц або 0,02 % від показань +0,05 % діапазону постійного струму. Він є багатоканальним і дозволяє під'єднати одночасно до семи каналів для вимірювання вхідної потужності контролера та зміни вихідної потужності двигуна. Містить вбудовану функцію аналізу гармонік до 500 порядку на напругу, струм та потужність. Функція вимірювання гармонік може одночасно виконати вимірювання гармонік на вході контролера та вході двигуна.

З огляду на перелічені вище можливості та переваги пристроїв аналізу якості електричної енергії було обрано прилад Yokogawa WT5000 для проведення експериментальних досліджень.

Результати

Експериментальні дослідження. Для дослідження залежності параметрів якості електричної енергії від типу навантаження в низьковольтній мережі Українського державного університету науки і технологій 220 В частотою 50 Гц було вирішено скористатись аналізатором потужності Yokogawa WT5000 (рис. 5), який являє собою універсальну платформу і забезпечує виключну точність і продуктивність. Лабораторний експеримент було виконано на базі лабораторії групи силової електроніки й електромаг-

нітної сумісності Університету Твенте під керівництвом і за підтримки професора Франка Леферінка і доцента Баса тен Хева [16].

Прилад Yokogawa WT5000 є двадцяти каналним і забезпечує точні вимірювання: активної P , Вт, реактивної Q , вар, і повної S , ВА, потужностей; λ – коефіцієнта потужності, φ – фазового кута, f_U – частоти напруги живлення, Гц. Цей вимірювач потужності застосовують для точного вимірювання гармонік та визначення ефективності інверторів, оберտальних електроприводів, освітлення, побутової техніки, офісного устаткування, джерел потужності в промисловому машинобудуванні. Прилад дозволяє виміряти такі параметри для контролю якості електроенергії: U_{rms} – напругу від 0...15 В і 0...1000 В; I_{rms} – струм 0...5 А і 0...30 А; частоту f_U до 1 МГц, споживану потужність, обертовий момент, швидкість обертання ротора двигуна з його оцінюванням.

Метою цього дослідження було спостереження за змінами параметрів якості електричної мережі університету, що є побутовим споживачем 2-ої категорії, у разі змінювання характеру навантаження від активного до активно-реактивного опорів: насос для басейну з десятьма режимами регулювання швидкості. На рис. 5 жовтою кривою показана напруга живлення, а зеленою – струм керування швидкістю обертання водяного насоса.

Результати дослідження виявили в системі електропостачання університету активно-емнісне навантаження, це видно за даними табл. 1. До того ж коефіцієнт потужності є дуже низьким, що не відповідає вимогам [3–7, 11]. У ряді випадків емнісне навантаження переважає над індуктивним, як наслідок струм випереджає напругу за фазою.



Рис. 5. Аналізатор потужності Yokogawa WT5000

Fig. 5. Yokogawa WT5000 power analyzers

Таблиця 1

**Результати вимірювання параметрів якості електроенергії
за допомогою аналізатора потужності Yokogawa WT 5000 power analyse**

Table 1

**Results of measuring power quality parameters with
the Yokogawa WT5000 power analyse**

До- сліджен- ня	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Максимальна напруга живлення $U=300$ [V]									
Максимальний струм живлення $I=20$ [A]									
U_{rms} [V]	228,78	226,303	226,949	226,619	226,684	226,621	227,395	227,577	227,468
I_{rms} [A]	1,0197	1,0182	1,8726	2,1364	2,1016	2,1445	1,8003	1,9261	1,9318
P [W]	106,2	104,52	102,74	90,94	88,97	90,78	76,2	65,98	66,02
S [VA]	233,3	203,41	424,99	484,91	476,41	486,0	409,38	438,3	439,93
Q [var]	-207,7	-205,3	-412,3	-475,5	-468,03	-477,4	-402,2	-433,3	-434,4
λ	0,455	0,453	0,242	0,188	0,187	0,187	0,186	0,15	0,15
φ [°]	62,918	63,022	76,010	79,174	79,237	79,235	79,272	81,343	81,359
fU [Hz]	50,007	50,021	50,026	49,998	50,005	50,006	50,011	50,009	50,004

За результатами досліджень можна зробити висновок, що коливання напруги і частоти не виходять за межі ДСТУ EN 50160:2014 [4]. Коефіцієнт потужності під час дослідження впливу характеру навантаження на параметри якості електричної енергії є меншим за встановлені норми, він повинен дорівнювати $\lambda=0,9\dots 1$. Це вимагає встановлення лічильників активної і реактивної потужності і компенсації збиткової реактивної потужності.

Недоліком виконаних досліджень є обмежена кількість виміряних параметрів якості електроенергії. Тобто для визначення гармонійного складу напруги і струму необхідно використовувати додаткове обладнання і методи вимірювання.

Отже, контроль параметрів якості електричної енергії та дотримання держстандартів дозволяє уникнути негативного впливу на систему електропостачання, підвищити точність обліку споживаної електроенергії за умовою використання сучасних цифрових пристроїв вимірювання, що надають більшу точність, ніж аналогові прилади, та здатні надавати резуль-

тати про більшу кількість параметрів за одне вимірювання.

Вплив електромагнітних завад на організм людини. Вплив електромагнітних завад на тіло людини обумовлено струмами, індукованими в тілі, які призводять до зміни різниці потенціалів між поверхнями мембран та нагрівання тканин.

Вплив магнітного поля залежно від частоти ілюструє рис. 6 [12], де продемонстровано такі ефекти впливу на організм людини:

- 1) поява миготіння на периферійних ділянках зору;
- 2) відчуття наявності поля;
- 3) порушення зору, головні болі;
- 4) порушення роботи серця;
- 5) порушення роботи нервової системи;
- 6) нагрів тканин при потужності 4 Вт/кг.

Таким чином, можна зробити висновок, що у випадку низькочастотних полів високої напруженості переважає вплив зміни різниці потенціалів на мембранах клітин, а за високо-частотних полів великої потужності переважає вплив нагрівання тканин.

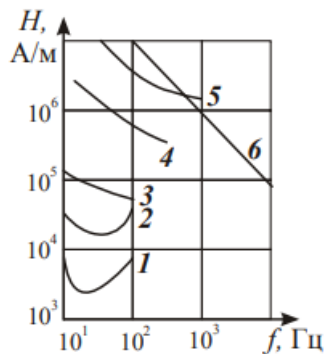


Рис. 6. Вплив магнітного поля на організм людини залежно від частоти

Fig. 6. Effect of magnetic field on the human body depending on frequency

Методика забезпечення електромагнітної сумісності. Як спосіб забезпечення електромагнітної сумісності та зниження рівнів показників якості електроенергії розроблені та створені фільтрокомпенсаційні пристрої.

Фільтрокомпенсаційні пристрої, побудовані на базі резонансних або складних комбінованих пристроїв, забезпечують фільтрацію вищих гармонік (ВГ) та інтергармонік (ІГ) і компенсацію реактивної потужності.

Фільтри поділяються на фільтри шуму, фільтри гармонік (активні та пасивні) тощо. Фільтри шуму використовують, щоб уникнути небажаних частотних сигналів струму або напруги (шуму) від чутливого обладнання. Цього можна досягнути за допомогою комбінації конденсаторів та індуктивностей, яка створює низький опір до основної частоти та високий імпеданс до вищих частот, тобто фільтр низьких частот. Фільтри гармонік використовують для зменшення небажаних гармонік. Пасивні фільтри складаються з низькоомного шляху до частот гармонік, які необхідно послабити за допомогою пасивних компонентів (індукторів, конденсаторів і резисторів) [14].

Ще більшими можливостями володіють активні фільтри, за допомогою яких можна зменшувати рівень інтергармонік.

Активні фільтри (АФ) є перспективними багатофункціональними пристроями, які забезпечують фільтрацію ВГ та ІГ, компенсацію реактивної потужності, зменшують глибину та тривалість провалів напруги, регулюють напругу у споживача. Загалом АФ являють собою джерело реактивного струму навантаження основ-

ної частоти, ВГ та ІГ і призначені для їх компенсації. Як активні фільтри використовують інвертори напруги, побудовані на тиристорах або транзисторах.

Наукова новизна та практична значимість

Під час дослідження було вирішено скористатись аналізатором потужності Yokogawa WT5000 як універсальною платформою, яка забезпечує найвищу точність та продуктивність. Цей прилад дозволив провести вимірювання низки найважливіших параметрів, включаючи напругу, струм, активну, реактивну та повну потужності, фазовий кут, а також частоту.

Результати дослідження виявили в системі перевагу ємнісного навантаження, що підтверджено аналізом вимірювання повної потужності. Це свідчить про те, що струм випереджає напругу за фазою.

Такий висновок становить важливе наукове відкриття, яке підкреслює, що в розглянутій системі переважають ємнісні характеристики, що має суттєве значення для оптимізації роботи електричних систем.

Результати цього дослідження мають вагоме значення сфері електроенергетики та електротехніки. Отримана інформація надає цінні дані для проєктувальників та інженерів, які працюють з електроенергетичними системами. Вони можуть використовувати ці дані для:

1. Ефективної експлуатації та налаштування систем (розуміючи домінуючі ємнісні характеристики, фахівці можуть правильно регулювати параметри електричних систем, щоб досягти оптимального рівня продуктивності та надійності).

2. Запобігання можливим збоям та неполадкам (розуміння того, що ємнісне навантаження переважає, дозволяє вжити конкретних заходів для запобігання можливим проблемам, пов'язаним із цією особливістю системи).

3. Модернізації та поліпшення енергоефективності (одним із головних значень цього дослідження є здатність до точного аналізу системи, що надає можливість розробити та впровадити ефективні заходи для поліпшення енергоефективності).

4. Зменшення непотрібних витрат (інформація, отримана в ході дослідження, може служити основою для оптимізації споживання електроенергії, що призведе до значного зменшення непотрібних витрат).

5. Збереження навколишнього середовища (шляхом ефективного використання електроенергії можна зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та сприяти його збереженню).

У цілому точне вимірювання та моніторинг параметрів якості електроенергії є невід’ємною частиною ефективної та стійкої роботи електричних систем у сучасному світі.

Крім того, дослідження підкреслює важливість використання сучасних і точних методів вимірювання якості електроенергії. Це дозволяє забезпечити стабільну та надійну роботу електричних систем, що є надзвичайно важливим.

Висновки

Належне вимірювання параметрів якості електроенергії необхідне для досягнення безпечної та ефективної роботи електричних систем, підвищення енергоефективності та скорочення непотрібних витрат. Крім того, це може допомогти запобігти забрудненню навколишнього середовища, спричиненому підвищеним споживанням енергії.

Тому важливо інвестувати в надійні і точні пристрої та методи вимірювання якості електроенергії, щоб забезпечити стабільну і надійну роботу електричних систем. Очікується, що в міру розвитку технологій пристрої для вимірювання якості електроенергії стануть ще досконалішими, це спростить і зробить ефективнішим вимірювання та контроль параметрів якості електроенергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Аналізатор параметрів якості електричної енергії PQM-700UA з сертифікатом S клас.* URL: <https://sonel.ua/ua/p1567754-analizator-parametriv-yakosti.html>
2. *Аналізатор параметрів якості електроенергії SATEC PM175.* URL: <https://www.satec-global.com.ua/analizatori-yakosti/pm175/>
3. *ГОСТ 13109-97 Електрична енергія. Норми якості електричної енергії в системах електроживлення загального призначення.* [Чинний від 01.01.2000]. Київ : Держстандарт України, 1999. 31 с.
4. *ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT).* [Чинний з 1.10.2014]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.
5. *ДСТУ EN 62053-22:2015 Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму. Спеціальні вимоги. Частина 22. Лічильники активної енергії статичні (класів точності 0,2 S і 0,5 S) (EN 62053-22:2003, IDT).* [Чинний від 10.11.2022]. 2022. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=74517
6. *ДСТУ IEC 61000-4-30:2010 Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (IEC 61000-4-30:2008, IDT).* [Чинний з 01.07.2012]. Київ : Держстандарт України, 2016.
7. *Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ).* URL: <https://www.diagram.com.ua/list/44.shtml#pte>
8. Про затвердження плану заходів з реалізації етапу «Реформування енергетичного сектору (до 2020 року)» Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». *Верховна Рада України*, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/497-2018-%D1%80#Text>
9. Сердюк Т. Електромагнітна сумісність і аналіз параметрів якості електричної енергії споживачів тягових підстанцій. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2019. № 17. С. 48–60.
10. Сиченко В., Косарев С., Кузнецов В., Малиш С., Кордін А., Данилов А., Полях О., Курочка О. Якість електричної енергії на шинах власних потреб тягових підстанцій електрифікованих залізниць. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2018. № 16. С. 57–61.

11. *СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго*. [Чинний від 03.02.2021]. 2021.
URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=94285
12. *СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-55:2011 Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення*. [Чинний від 29.01.2012]. Київ : Міненерговугілля, 2012. 98 с.
13. Havryliuk V. I. A review of power quality issues in electrified rails. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2017. № 14. С. 11–20. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsr2017/137704>
14. Kumar P. A Review of power Quality Problems, Standards and Solutions. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 04. Iss. 01. P. 1765–1775.
15. *Siemens Sicam P855 7KG85 Series Device Manual*.
URL: <https://www.manualslib.com/manual/1581656/Siemens-Sicam-P855-7kg85-Series.html>
16. ten Have B., Hartman T., Moonen N., Keyer C., Leferink F Faulty Readings of Static Energy Meters Caused by Conducted Electromagnetic Interference from a Water Pump. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2019. Vol. 17. P. 15–19. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj17.205>
17. *WT5000 Precision Power Analyzer*. URL: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/power-analyzers/wt5000/>

T. M. SERDYUK^{1*}, M. S. SERCHENKO²

^{1*}Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail serduchecket@gmail.com, ORCID 0000-0002-2609-4071

²Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail serchenko228@gmail.com, ORCID 0009-0007-7076-6211

Analysis Of Power Quality Parameters and Devices for Their Measurement

Purpose. The main objective of this study is to assess the phenomena that affect the parameters of power quality, to consider ways to counteract the deterioration of power quality, to assess the effect of electromagnetic interference on the human body, and to review the available devices for measuring the parameters of electric energy. **Methodology.** To obtain relevant data, the authors conducted a literature review on the topic of the work using full-text and abstract databases. The main causes of electromagnetic compatibility (EMC) violations and ways to counteract these violations are considered. The main parameters of electricity quality, conditions for their measurement and permissible ranges according to the State Standards of Ukraine (SSU) are highlighted. A review of devices for measuring the parameters of electricity quality and the search for a suitable one that meets Ukrainian standards was carried out. **Findings.** The authors have proved: 1) the problem of measuring electricity quality parameters is relevant and important for its accurate accounting; 2) control of electricity quality parameters and compliance with state standards allows avoiding negative impact on the electricity supply system; 3) the use of modern digital measuring devices provides greater measurement accuracy than analog ones, and they are able to take into account more parameters in one measurement. **Originality.** The authors conducted a study in the field of electromagnetic compatibility in the field of electromagnetic compatibility using a digital device that gives more accurate and reliable results of power quality parameters. **Practical value.** Based on the results obtained, it is possible both to correct the personal research of individual scientists or teams of scientists and to predict further prospects for the development of the subject area «Electromagnetic Compatibility» in traction power supply systems in railway transport. The research can also be useful in the study of the disciplines «Electromagnetic Compatibility of Railway Automation Systems» and «Electrical Circuits and Lines of Railway Automation», organization of scientific and practical seminars, advanced training courses, etc.

Keywords: parameters of electric power quality; electromagnetic compatibility; devices; harmonics; voltage; current; power

REFERENCES

1. *Analizator parametriv yakosti elektrychnoi enerhii PQM-700UA z sertyfikatom S klas.* Retrieved from <https://sonel.ua/ua/p1567754-analizator-parametriv-yakosti.html> (in Ukrainian)
2. *Analizator parametriv yakosti elektroenerhii SATEC PMI75.* Retrieved from <https://www.satec-global.com.ua/analizatori-yakosti/pm175/> (in Ukrainian)

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

3. *Elektrychna enerhiia. Normy yakosti elektrychnoi enerhii v systemakh elektrozhyvlennia zahalnoho pryznachennia, 31 GOST 13109-97.* (1999). (in Ukrainian)
4. *Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh merezhakh zahalnoi pryznachnosti, 27 DSTU EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT).* (2014). (in Ukrainian)
5. *Zasoby vymiriuvannia elektrychnoi enerhii zminnoho strumu. Spetsialni vymohy. Chastyna 22. Lichylnyky aktyvnoi enerhii statychni (klasiv tochnosti 0,2 S i 0,5 S) (EN 62053-22:2003, IDT), DSTU EN 62053-22:2015.* (2016). Retrieved from http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=74517 (in Ukrainian)
6. *Elektromahnitna sumisnist. Chastyna 4-30. Metody vyprobuvannia ta vymiriuvannia. Vymiriuvannia pokaznykiv yakosti elektrychnoi enerhii (IEC 61000-4-30:2008, IDT), DSTU IEC 61000-4-30:2010.* (2016). (in Ukrainian)
7. *Rules for the technical operation of consumer electrical installations (PTE).* Retrieved from <https://www.diagram.com.ua/list/44.shtml#pte> (in Ukrainian)
8. Pro zatverdzhennia planu zakhodiv z realizatsii etapu «Reformuvannia enerhetychnoho sektoru (do 2020 roku)» Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist». (2018). *Verkhovna Rada of Ukraine.* Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/497-2018-%D1%80#Text> (in Ukrainian)
9. Serdiuk, T. (2019). Elektromahnitna sumisnist i analiz parametriv yakosti elektrychnoi enerhii spozhyvachiv tiahovykh pidstantsii. *Electromagnetic compatibility and safety in railway transport, 17*, 48-60. (in Ukrainian)
10. Sychenko, V., Kosarev, E., Kuznetsov, V., Malyshev, S., Kordin, A., Danilov, A., Polyakh, O., & Kurochka, O. (2018). Quality of electric energy on tires of own needs of traction substations of electrified railways. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport, 16*, 57-61. (in Ukrainian)
11. *Normy yakosti elektrychnoi enerhii v mahistralnykh ta mizhderzhavnykh elektrychnykh merezhakh NEK Ukrenerho, SOU NEK 03.120.4-14:2021.* (2021). Retrieved from http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=94285 (in Ukrainian)
12. *Metodyka vymiriuvannia yakosti elektrychnoi enerhii v systemakh elektropostachannia zahalnoho pryznachennia, 98 COV-H EE40.1-37471933-55:2011.* (2012). (in Ukrainian)
13. Havryliuk, V. (2017). A review of power quality issues in electrified rails. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport, 14*, 11-20. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecstr2017/137704> (in English)
14. Kumar, P. (2017). A Review of power Quality Problems, Standards and Solutions. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 04(01)*, 1765-1775. (in English)
15. *Siemens Sicam P855 7KG85 Series Device Manual.* Retrieved from <https://www.manualslib.com/manual/1581656/Siemens-Sicam-P855-7kg85-Series.html> (in English)
16. ten Have, B., Hartman, T., Moonen, N., Keyer, C., & Leferink, F. (2019). Faulty Readings of Static Energy Meters Caused by Conducted Electromagnetic Interference from a Water Pump. *Renewable Energy and Power Quality Journal, 17*, 15-19. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj17.205> (in English)
17. *WT5000 Precision Power Analyzer.* Retrieved from <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/power-analyzers/wt5000/> (in English)

Надійшла до редколегії: 26.05.2023

Прийнята до друку: 26.09.2023

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 629.423-048.24

О. С. ШАПОВАЛОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +380 (056) 373 15 31, ел. пошта shapovalov93as@gmail.com, ORCID 0000-0002-3151-6574

Система взаємного навантаження допоміжних електричних машин з покриттям втрат від джерел механічної потужності

Мета. Підвищення рівня безпеки, зниження собівартості утримання рухомого складу на сьогодні є актуальною проблемою залізниць України. Наявні стенди з випробування допоміжних машин, як правило, побудовані за схемою з безпосереднім навантаженням випробуваної електричної машини і не відповідають сучасним вимогам щодо якості та енергоефективності проведення випробувань. У зв'язку з цим виникає необхідність проектування енергоефективних стендів із випробування допоміжних машин електрорухомого складу. **Методика.** Для досягнення мети використано аналітичний метод дослідження, визначення оптимальної структури стенда. У роботі розглянуто діаграму балансу напруг у системі взаємного навантаження. Окремо наведено розрахунки, на основі яких побудовано розрахункові схеми електричної та механічної частини стенда, за допомогою ж розрахункових схем визначено умови покриття всіх втрат у системі взаємного навантаження. **Результати.** У ході проведених досліджень було отримано рівняння балансу потужностей у системі взаємного навантаження. На основі складених рівнянь побудовано модель системи взаємного навантаження з покриттям усіх втрат від одного джерела механічної потужності. Основною перевагою розробленої моделі є те, що вона може бути реалізована як методом числових розрахунків за складеними системами рівнянь, так і за допомогою об'єктно-орієнтованого програмування у спеціалізованих програмних комплексах. **Наукова новизна.** Запропоновано раціональну схему випробування допоміжних машин із покриттям втрат від одного джерела механічної потужності. Використання одного джерела потужності дозволяє значно зменшити додаткове споживання електричної енергії за рахунок більш ефективного використання допоміжного обладнання, зокрема джерела механічної потужності. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можна визначити параметри схеми з випробування допоміжних машин на стадії проектування стенда. Упровадження результатів дослідження на підприємствах з ремонту допоміжних машин дозволить знизити витрати електроенергії на проведення післяремонтних випробувань за рахунок вищої енергетичної ефективності схеми випробувань.

Ключові слова: випробування; взаємне навантаження; допоміжні машини; схема заміщення; енергетична ефективність; математична модель

Вступ

Підвищення рівня безпеки на транспорті, а також ефективності роботи транспортної галузі є одним із пріоритетних напрямів Національної транспортної стратегії України [5, 6]. На сьогодні в інвентарному парку тягового рухомого складу залізниць переважають локомотиви і МВРС із колекторними допоміжними ма-

шинами постійного струму. Як відомо, цей тип електричних машин має відносно низькі показники надійності. Це пов'язано з конструктивними особливостями таких машин. Наявність щітково-колекторного вузла як найменш надійного вузла в конструкції, значних вібраційних навантажень, коливань рівня наруги в живильній мережі призводить до аварійних виходів із ладу допоміжних електромашин.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Кількість непланових ремонтів МВРС, викликаних виходом із ладу допоміжних машин протягом 2008–2012 років, складає 2,034 % від загальної кількості позапланових ремонтів [3]. За таких обставин отримати високий рівень ефективності роботи залізничної галузі практично неможливо.

Одним із можливих варіантів підвищення надійності роботи допоміжних машин є впровадження сучасних стендів із випробування електричних машин рухомого складу. Згідно з чинними нормативними документами [2, 4], кожна відремонтована електрична машина обов'язково має пройти приймально-здавальні випробування. До програми випробувань усіх колекторних машин, як тягових, так і допоміжних, входить випробування на нагрівання. Для тягових електричних машин відомі та широко розповсюджені дві основні схеми випробування за методом взаємного навантаження: схема з послідовно-паралельним з'єднанням джерел потужності та схема з механічним покриттям втрат холостого ходу [1, 8, 11].

Випробування на нагрівання допоміжних машин здебільшого проводять методом безпосереднього навантаження без повернення електричної енергії до мережі. Це пояснюється відносною простотою випробувальної схеми, а також достатньо низькою потужністю електричних машин. Сьогодні, коли вартість електроенергії для всіх споживачів, а особливо для промислових, із кожним роком зростає, актуальною є проблема зменшення витрат електроенергії на випробування. Цього можна досягти шляхом упровадження системи взаємного навантаження під час випробування допоміжних машин [9, 10].

Мета

Основною метою цього дослідження є вибір оптимальної схеми випробування з максимальною енергетичною ефективністю. Досягти цього можливо шляхом математичного моделювання схеми випробування. Моделювання дозволяє провести аналіз досліджуваної схеми шляхом розв'язку системи диференціальних рівнянь, щоб визначити її основні параметри та оптимізувати з найменшими матеріальними витратами, оскільки на етапі проектування немає необхідності в побудові самої схеми ви-

пробувань. Також моделювання сприяє підвищенню якості самих випробувань, оскільки відпадає необхідність мати «еталонну» електричну машину, результати випробувань можна порівняти з розрахованими даними.

Методика

Схему системи взаємного навантаження допоміжних електромашин із покриттям усіх втрат джерел механічної потужності наведено на рис. 1.

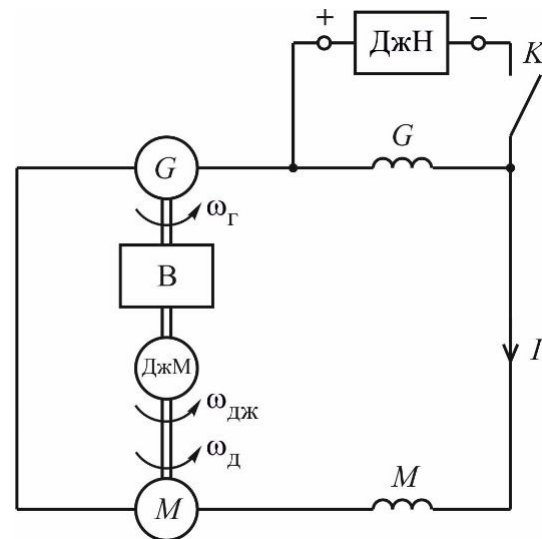


Рис. 1. Схема випробного стенда

Fig. 1. Diagram of the test bench

Обмотки якорів та збудження двигуна M і генератора G з'єднані послідовно в замкнутому колі. Вали електромашин з'єднані між собою через варіатор B і джерело механічної потужності ДжМ. Таким джерелом може бути двигун постійного струму незалежного збудження або асинхронний двигун, частота обертання якого може регулюватися в широких межах.

Джерело напруги ДжН в цій системі необхідне для забезпечення самозбудження генератора G . Контакт K у схемі замикається тільки на час запуску схеми, а в режимі випробування розімкнутий.

Діаграму, яка характеризує баланс напруги в колі залежно від струму навантаження, наведено на рис. 2.

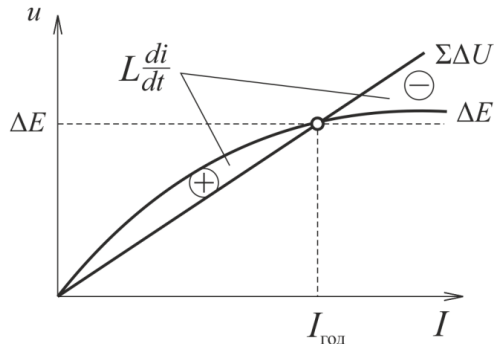


Рис. 2. Діаграма балансу напруг

Fig. 2. Diagram of voltage balance

Характеристики керувальних параметрів, які забезпечують режим взаємного навантаження:

$$K_{\omega} > 1;$$

$$M_{дж} > 0,$$

де K_{ω} – коефіцієнт передачі кутової швидкості варіатора В, який можна визначити так:

$$K_{\omega} = \frac{\omega_r}{\omega_d}, \quad (1)$$

де ω_r – кутова швидкість генератора; ω_d – кутова швидкість двигуна.

Схему заміщення електричного кола систем взаємного навантаження (ВН) наведено на рис. 3.

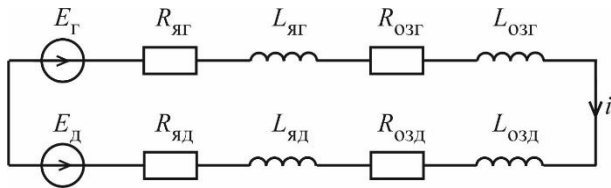


Рис. 3. Схема заміщення електричного контуру

Fig. 3. Electrical circuit replacement scheme

Е. р. с. генератора та двигуна визначаються таким чином:

$$E_r = c\Phi_r\omega_r;$$

$$E_d = c\Phi_d\omega_d.$$

Рівняння динамічної рівноваги для електричних кіл системи, схема заміщення якої наведена на рис. 3, матиме вигляд:

$$\Delta E = \sum R \cdot i + \sum L \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

де ΔE – небалансна е. р. с. електромашин; $\sum R$ – сумарний активний опір кола; $\sum L$ – сумарна індуктивність кола. Визначають їх так:

$$\Delta E = E_r - E_d;$$

$$\sum R = R_{яг} + R_{яд} + R_{озг} + R_{озд};$$

$$\sum L = L_{яг} + L_{яд} + L_{озг} + L_{озд}.$$

Небалансна е. р. с. може бути подана у вигляді:

$$\Delta E = c\Phi_r\omega_r - c\Phi_d\omega_d.$$

Якщо взяти, що в нормальному режимі

$$\Phi_r = \Phi_d = \Phi,$$

вираз для ΔE матиме вигляд:

$$\Delta E = c\Phi(\omega_r - \omega_d).$$

З урахуванням виразу (1) для K_{ω} вираз для ΔE можна перетворити таким чином:

$$\Delta E = c\Phi\omega_d(K_{\omega} - 1). \quad (3)$$

На рис. 4 наведено схему механічної частини системи взаємного навантаження.

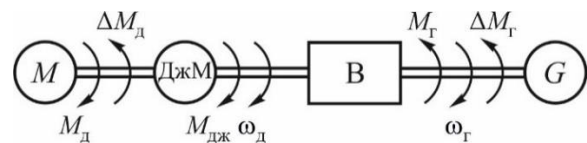


Рис. 4. Схема механічної частини стенда

Fig. 4. Scheme of the mechanical part of the stand

Електромагнітні моменти двигуна й генератора визначаються за виразами:

$$M_d = c\Phi_d i;$$

$$M_r = c\Phi_r i.$$

З урахуванням узятого припущення

$$\Phi_d = \Phi_r = \Phi,$$

Отримаємо:

$$M_d = M_r = c\Phi i. \quad (4)$$

Рівняння динамічної рівноваги для механічної частини системи взаємного навантаження має вигляд:

$$M_d + M_{дж} = K_\omega M_r + \Delta M_d + K_\omega \Delta M_r + \sum J \frac{d\omega_d}{dt}, \quad (5)$$

де ΔM_d і ΔM_r – моменти опору, обумовлені втратами холостого ходу в двигуні та генераторі відповідно; $\sum J$ – сумарний момент інерції системи, приведеної до валу двигуна.

Для спрощення аналізу припустимо:

$$\Delta M_d = \Delta M_r = \Delta M.$$

Об'єднавши вирази (2) і (5), отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} c\Phi\omega_d (K_\omega - 1) = \sum R \cdot i + \sum J \frac{di}{dt}; \\ M_{дж} = c\Phi i (K_\omega - 1) + \Delta M (1 + K_\omega) + \sum J \frac{d\omega_d}{dt}. \end{cases} \quad (6)$$

В усталеному режимі ця система набуває вигляду:

$$\begin{cases} c\Phi\omega_d (K_\omega - 1) = \sum R \cdot i; \\ M_{дж} = c\Phi i (K_\omega - 1) + \Delta M (1 + K_\omega). \end{cases} \quad (8)$$

Помноживши ліву та праву частини рівняння (8) на i , а ліву та праву частини рівняння (9) на ω_d , після перетворень та заміни позначок отримаємо рівняння балансу потужностей у вигляді:

$$\begin{cases} P_{емд} (K_\omega - 1) = \sum \Delta P_{ел}; \\ P_{дж} = P_{емд} (K_\omega - 1) + \Delta P_{xx} (1 + K_\omega), \end{cases} \quad (10)$$

де $P_{дж}$ – потужність механічного джерела ДжМ; ΔP_{xx} – втрати холостого ходу однієї електричної машини; $P_{емд}$ – електромагнітна потужність двигуна, яку встановлюємо так:

$$P_{емд} = E_d \cdot i = c\Phi\omega_d \cdot i;$$

$$\sum \Delta P_{ел} = \sum Ri^2.$$

Результати

Із системи рівнянь (10) та (11) можна отримати загальне рівняння балансу потужностей:

$$P_{дж} = \sum \Delta P_{ел} + \Delta P_{xx} (1 + K_\omega).$$

За допомогою системи диференціальних рівнянь (6)–(7) побудовано модель електромеханічних процесів у системі взаємного навантаження, подану на рис. 5.

Вхідними параметрами в моделі є момент $M_{дж}$ і коефіцієнт передачі кутової швидкості K_ω . Вихідними параметрами є струм навантаження електромашини і та кутова швидкість двигуна ω_d (генератора ω_r).

Наукова новизна та практична значимість

У результаті проведених досліджень створено модель системи взаємного навантаження з покриттям усіх втрат від джерела механічної енергії (двигуна). Модель можна використати як основу для побудови стенда з випробування допоміжних машин електрорухомого складу.

Наведена модель дозволяє:

- визначити параметри привідного двигуна та варіатора на етапі проектування стенда, знаючи паспортні дані випробувальних машин;
- підвищити якість проведення випробування за рахунок визначення оптимальних параметрів випробуваних електромашин, що дозволяє відмовитись від «еталонної» електричної машини;
- знизити собівартість ремонтів за рахунок вищої енергоефективності запропонованої схеми порівняно з наявними;
- оптимізувати як структуру стенда, так і режим випробувань із мінімальними витратами електричної енергії.

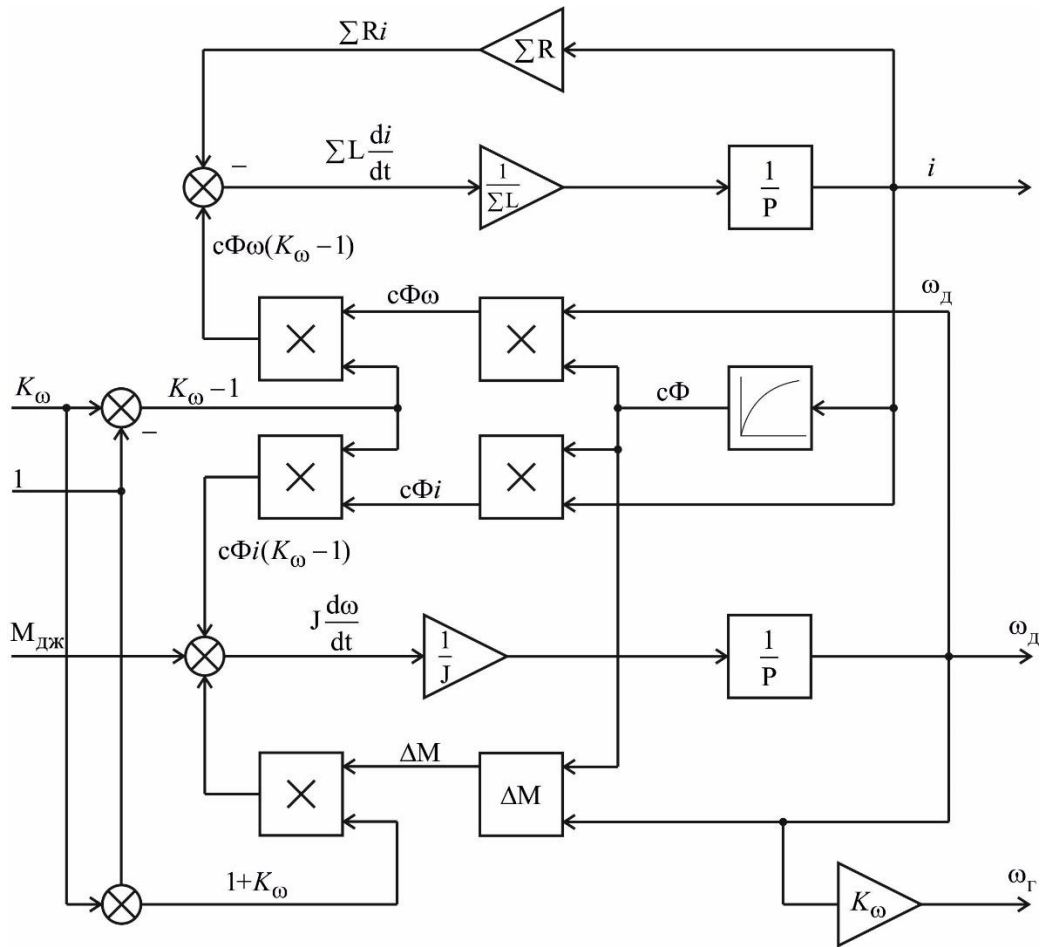


Рис. 5. Модель системи взаємного навантаження

Fig. 5. Model of the mutual load system

Висновки

Модернізація наявних, і побудова нових енергоефективних стендів для випробування допоміжних машин електрорухомого складу дозволить значно підвищити надійність роботи

допоміжних електричних машин, знизити кількість позапланових ремонтів, що в остаточному підсумку дає можливість знизити витрати на утримання рухомого складу, а отже, підвищити ефективність його роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арпуль С., Афанасов А. М., Білухін Д. С., Васильєв В. Є., Шаповалов О. С., Буряк С. Ю. Визначення раціонального режиму взаємного навантаження тягових двигунів магістральних електровозів. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265370>
2. ДСТУ ГОСТ 2582:2017 *Машини електричні обертові тягові. Загальні технічні умови (ГОСТ 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ)* [Дійсний від 2017-03-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 50 с.
3. Муха А. М., Балійчук О. Ю., Скогарєв І. Є. Аналіз роботи допоміжних електричних машин електропоїздів залізниць України. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту*. Донецьк, 2014. Вип. 37. С. 143–150.

4. *Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063*. Київ : Видавничий дім «САМ», 2003. 286 с.
5. *Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»*. 2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top>
6. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text>
7. Gavrilovic B. A mechatronic approach for the detection of wheel slip/slide and antislip control of locomotive with AC traction motors. *American journal of mechanics and applications*. 2017. Vol. 5. Iss. 6. P. 47–52. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11>
8. Jacobs S., Vandenbossche L., Attrazic E. How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design. A Serviceable Contribution to Electric Vehicles. *IEEE Electrification Magazine*. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2018.2889550>
9. Sahoo S. K., Bhattacharya T. Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31. Iss. 6. P. 4429–4439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398>
10. Sequeira J. L., Casimiro T. M. Portable steam engines and traction engines and their use in rural areas: The case of Lezíria Ribatejana, Portugal. *Industrial Archaeology Review*. 2018. Vol. 40. Iss. 1. P. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921>
11. Tudor E., Strambeanu D., Lipcinski D., Nicolaie S., Ilie C., Ovezza D., Tanase N., Voina A., Fartan M. Locomotive Diesel Engine Test Stand with Energy Recovery in the Electrical Network. *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE) (Craiova, 27-29 May 2021)*. Craiova, 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icate49685.2021.9464995>

O. S. SHAPOVALOV^{1*}

^{1*}Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +380 (056) 373 15 31, e-mail shapovalov93as@gmail.com, ORCID 0000-0002-3151-6574

System of Mutual Loading of Auxiliary Electric Machines with Coverage of Losses from Mechanical Power Sources

Purpose. Increasing the level of safety and reducing the cost of rolling stock maintenance is an urgent problem for Ukrainian railways today. Existing test benches for auxiliary machines are usually built according to the scheme with direct loading of the tested electric machine and do not meet modern requirements for the quality and energy efficiency of testing. In this regard, there is a need to design energy-efficient test benches for testing auxiliary machines of electric rolling stock. **Methodology.** To achieve this goal, we used an analytical method of research to determine the optimal structure of the test bench. The paper considers the voltage balance diagram in the mutual load system. Separately, the calculations are presented, on the basis of which the design diagrams of the electrical and mechanical parts of the test bench are constructed, and the conditions for covering all losses in the mutual load system are determined using the design diagrams. **Findings.** In the course of the research, the power balance equation in the mutual load system was obtained. On the basis of the equations, a model of a mutual load system with coverage of all losses from a single source of mechanical power was built. The main advantage of the developed model is that it can be implemented both by numerical calculations using composite systems of equations and by object-oriented programming in specialized software systems. **Originality.** A rational scheme for testing auxiliary machines with the coverage of losses from a single source of mechanical power is proposed. The use of a single power source can significantly reduce the additional consumption of electrical energy due to the more efficient use of auxiliary equipment, in particular, a mechanical power source. **Practical value.** Based on the results obtained, it is possible to determine the parameters of the scheme for testing auxiliary machines at the design stage of the test bench. Implementation of the research results at auxiliary machine repair enterprises will reduce electricity consumption for post-repair testing due to the higher energy efficiency of the test scheme.

Keywords: testing; mutual load; auxiliary machines; substitution scheme; energy efficiency; mathematical model

REFERENCES

1. Arpul, S. V., Afanasov, A. M., Bilukhin, D. S., Vasyliiev, V. Y., Shapovalov, O. S., & Buriak, S. Y. (2022). Determination of the Rational Mode of Mutual Loading of Traction Engines of Main Electric Locomotives. *Science and Transport Progress*, 1(97), 13-22. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265370> (in Ukrainian)
2. *Mashyny elektrychni obertovi tzhaghovi. Zagaljni tekhnichni umovy (GhOST 2582-2013, IDT; IEC 60349-1:2010, NEQ; IEC 60349-2:2010, NEQ), 50 DSTU GOST 2582:2017.* (2017). (in Ukrainian)
3. Mukha, A. M., Baliichuk, O. Yu., Skohariiev, & I. Ye. (2014). Analiz roboty dopomizhnykh elektrychnykh mashyn elektroizdiv zaliznyts Ukrainy. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 37, 143-150. (in Ukraine)
4. *Pravyla remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektropojizdiv. CT-0063.* (2003). Kyiv: Vydavnychyj dim «SAM». (in Ukrainian)
5. *Pro skhvalennja Energhetychnoji strateghiji Ukrajiny na period do 2035 roku «Bezpeka, energhoefektyvnistj, konkurentospromozhnistj».* (2017). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#top> (in Ukrainian)
6. *Pro skhvalennja Nacionaljnoji transportnoji strateghiji Ukrajiny na period do 2030 roku.* (2018). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#Text> (in Ukrainian)
7. Gavrilovic, B. (2017). A Mechatronic Approach for the Detection of Wheel Slip/Slide and Antislip Control of Locomotive with AC Traction Motors. *American Journal of Mechanics and Applications*, 5(6), 47-52. <https://doi.org/10.11648/j.ajma.20170506.11> (in English)
8. Jacobs, S., Vandenbossche, L., & Attrazic, E. (2019). How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design: A Serviceable Contribution to Electric Vehicles. *IEEE Electrification Magazine*, 7(1), 39-48. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2018.2889550> (in English)
9. Sahoo, S. K., & Bhattacharya, T. (2016). Rotor Flux-Oriented Control of Induction Motor With Synchronized Sinusoidal PWM for Traction Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 4429-4439. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2475398> (in English)
10. Sequeira, J. L., & Casimiro, T. M. (2018). Portable Steam Engines and Traction Engines and Their Use in Rural Areas: The Case of Lezíria Ribatejana, Portugal. *Industrial Archaeology Review*, 40(1), 11-17. DOI: <https://doi.org/10.1080/03090728.2018.1430921> (in English)
11. Tudor, E., Strambeanu, D., Lipcinski, D., Nicolaie, S., Ilie, C., Ovezea, D., Tanase, N., Voina, A., & Fartan, M. (2021, May). Locomotive Diesel Engine Test Stand with Energy Recovery in the Electrical Network. In *2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)* (pp. 1-6). Craiova, Romania. DOI: <https://doi.org/10.1109/icate49685.2021.9464995> (in English)

Надійшла до редколегії: 16.05.2023

Прийнята до друку: 19.09.2029

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.912

І. М. ДЕМИДОВИЧ^{1*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 586 99 48, ел. пошта 2019demidovichinn@gmail.com, ORCID 0000-0002-3644-184X

Методи інтелектуального аналізу тексту

Мета. Методики обробки природномовних текстів застосовують для вирішення широкого кола завдань. Одне з найважчих завдань під час роботи з природномовним текстом для різних мов полягає в пошуку певних показників для подальшого визначення його авторства. Проблема досі є актуальною через відсутність уніфікованого інструменту чи методу для роботи з текстами різних мов. Робота з текстами української мови вимагає врахування її особливостей побудови слів та речень для отримання кращого результату. Основною метою представленої статті є аналіз наявних методів обробки текстів, їх особливостей та результативності в роботі з текстами різних мов. **Методика.** Методи обробки природномовних текстів систематизовано за типами й форматом, згідно з використанням інструментарієм та підходами. Для кожного методу розглянуто його особливості, результативність, сферу застосування та обмеження. Використано засоби системного аналізу для формування остаточної характеристики методу з урахуванням його призначення та можливостей. **Результати.** У ході дослідження методів виявлено такі з них, які використовують для інтелектуального аналізу текстів різних мов, їх сферу застосування, результативність у роботі з різними мовами, сильні та слабкі сторони. Це дозволить обрати ефективний інструментарій для роботи з текстами української мови. Установлено, що інтелектуальна обробка текстів – складне завдання, яке потребує індивідуального підходу до кожної мови для врахування її особливостей та отримання кращого результату. **Наукова новизна.** Сформовано основу для вибору ефективного методу в роботі з україномовними текстами, проаналізовано та систематизовано наявні методи інтелектуальної обробки тексту, їх особливості застосування, можливості та ефективність у роботі з текстами різних мов. **Практична значимість.** Робота дозволила визначити найбільш перспективні, ефективні та доцільні методи інтелектуального аналізу природномовних текстів, щоб у подальшому їх використати для обробки україномовних текстів.

Ключові слова: природномовні тексти; інтелектуальна обробка текстів; частотний аналіз; стемінг; синтаксичний аналіз; нейронні мережі

Вступ

Інтелектуальний аналіз тексту (ІАТ), також відомий як інтелектуальний аналіз текстових даних [14] або виявлення знань із текстових баз даних [20], зазвичай належить до процесу вилучення цікавих і нетривіальних шаблонів або знань із неструктурованих текстових документів. Це напрям інтелектуального аналізу даних і штучного інтелекту, метою якого є отримання інформації з колекцій текстових документів

і який ґрунтується на застосуванні ефективних методів машинного навчання та обробки природної мови. Найбільша складність виникає під час роботи з природною мовою або з текстами без чіткої структури контенту.

Основними сферами застосування ІАТ є інформаційний пошук, виділення інформації, категоризація та обробка природної мови [56].

Інформаційний пошук. Концепція інформаційного пошуку (ІП) була розроблена у зв'язку

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

з роботою із системами баз даних протягом багатьох років. Пошук інформації – це об'єднання запитів та віднайдення необхідного з великої кількості текстових документів.

У зв'язку з величезною кількістю текстів інформаційний пошук знайшов широке застосування. Існує багато інформаційно-пошукових систем, наприклад, онлайнсистеми бібліотечних каталогів, системи керування документами в режимі онлайн та системи пошуку в інтернеті [19].

Виділення інформації. Метод вилучення інформації визначає ключові слова та зв'язки в тексті. Реалізується шляхом пошуку попередньо визначених послідовностей у тексті так званим – зіставленням шаблону. Програмне забезпечення визначає зв'язки між усіма ідентифікованими місцями, людьми і часом, щоб надати користувачеві значущу інформацію. Ця технологія дуже корисна в роботі з великими обсягами інформації. Традиційний інтелектуальний аналіз даних передбачає, що інформація, яку шукають, уже у формі реляційної бази даних [19].

Категоризація. Категоризація передбачає визначення основних тем документа шляхом його зіставлення із попередньо визначеним набором тем. Класифікуючи документ, комп'ютерна програма часто сприйматиме документ як «мішок слів». Вона не намагається обробити фактичну інформацію, як це робить вилучення інформації. Швидше категоризація лише підраховує слова, які з'являються, і, виходячи з підрахунку, визначає основні теми, які охоплює документ. Категоризація часто спирається на глосарій, для якого попередньо визначені теми та зв'язки ідентифікуються шляхом пошуку великих термінів, більш вузьких термінів, синонімів і споріднених термінів [7].

Обробка природної мови. Обробка природної мови (NLP) – це сфера досліджень і застосування, яка вивчає, як комп'ютерні технології можна використовувати для розуміння та обробки тексту природною мовою. Дослідники NLP прагнуть зібрати знання про те, як люди розуміють і використовують мову, щоб розробити відповідні інструменти та методи, за допомогою яких комп'ютерні системи зможуть розуміти та маніпулювати природними мовами для виконання бажаних завдань [23].

Основи NLP лежать у ряді дисциплін, а саме: комп'ютерні та інформаційні науки, лінгвістика, математика, електротехніка та електронна інженерія, штучний інтелект і робототехніка, психологія та ін. Застосування NLP включає низку сфер досліджень, таких як машинний переклад, обробка тексту природною мовою та резюмування, встановлення авторства текстів та виявлення плагіату, інтерфейси користувача, багатомовний та міжмовний пошук інформації, розпізнавання мовлення, штучний інтелект та експертні системи тощо [24].

Наразі більшість методів обробки природної мови та категоризації текстів можна розділити на два широкі напрями: застосування статистичних методів і використання машинного навчання [42].

Мета

Робота з текстами української мови вимагає врахування її особливостей побудови слів та речень для отримання кращого результату. Метою представленої статті є аналіз наявних методів обробки текстів, зокрема їх особливостей та результативності під час роботи з текстами різних мов для визначення найкращих підходів у роботі з україномовними текстами.

Методика

Сьогодні існує багато методів та інструментів для роботи з природномовними текстами різних сфер та напрямів. Незважаючи на це більшість із них, незалежно від досліджуваної мови, можна систематизувати згідно з основними підходами до аналізу побудови тексту на різних рівнях та показників, які використовують для формалізації особливостей авторського стилю.

Однією з найпоширеніших методологій визначення авторства тексту є стилOMETричний аналіз, який передбачає дослідження різних мовних особливостей і шаблонів у тексті для виявлення унікальних стилів письма. Нижче наведено опис кроків, які зазвичай застосовують у цій методології.

Вибір ознак. СтилOMETричний аналіз часто починається з вибору ознак або атрибутів із тексту, які можна кількісно виміряти. Ці характеристики можуть включати частоту слів, довжину речень, багатство словника, використання пунктуації, синтаксичні структури тощо.

Виділення функцій. Коли функції визначено, їх витягують або обчислюють із тексту. Цей крок передбачає перетворення тексту у формат, який можна аналізувати алгоритмічно. Наприклад, перетворення слів у числове представлення за допомогою таких методів, як TF-IDF або вбудовування слів.

Відображення ознак. Визначені ознаки організовано у вектор ознак, структурований набір числових значень, який представляє кожен зразок тексту або стиль написання автора.

Моделі машинного навчання. Різні алгоритми машинного навчання застосовують до векторів функцій, щоб вивчати шаблони та створювати моделі, які відрізняють різних авторів або стилі написання. Загальні використовувані алгоритми включають k -найближчих сусідів, опорні векторні машини, дерева рішень, нейронні мережі тощо.

Позначення авторства. Коли модель навчена та перевірена, її можна використовувати для визначення авторства невідомих текстів шляхом порівняння їхніх стилістичних особливостей із вивченими шаблонами.

Удосконалення. Цей етап може знадобитися для ітераційного уточнення моделі, щоб підвищити точність і врахувати різні стилі написання або мовні зміни з часом.

Стилометричний аналіз застосовували в різних галузях, включаючи судову лінгвістику, літературознавство та виявлення плагіату. Однак важливо зазначити, що хоча ця методологія досить ефективна, вона не завжди може забезпечити достовірні результати через складність мови та варіативність стилю письма.

Тож досліджувані методи в роботі можна умовно поділити на дві групи: статистичні методи аналізу для встановлення певних значущих ознак тексту та машинне навчання для роботи з отриманими показниками.

Статистичний аналіз тексту працює з частотою різних за розміром одиниць тексту для знаходження закономірностей, що будуть характеризувати сам текст та відображати особливості його побудови.

Для статистичного аналізу тексту можна виділити такі рівні: частота літер, послідовності літер деякої довжини, слів, словосполучень, речень тощо.

Кожний із рівнів статистичного аналізу має свої особливості, точність і може бути використаний для відображення різних аспектів тексту, який досліджують.

Машинне навчання – це техніка аналізу даних, яка вчить комп'ютери робити те, що є природним для людей і тварин: вчитися на досвіді. Алгоритми машинного навчання використовують обчислювальні методи, щоб «вивчати» інформацію безпосередньо з даних, не покладаючись на заздалегідь визначене рівняння як модель [33]. Алгоритми адаптивно поліпшують свою продуктивність зі збільшенням кількості зразків, доступних для навчання.

Модель машинного навчання для роботи з текстом включає три найпоширеніші модулі: дерева рішень (DT), нейронні мережі (NN), наївні басівські класифікатори та машини опорних векторів (SVM).

Кожен із представлених напрямів дослідження природномовного тексту застосовано для вирішення різних завдань відповідно до їх особливостей. Далі розглянемо безпосередньо практичні методи кожного з напрямів аналізу тексту та можливості їх застосування.

Результати

Частотний аналіз. Проблему статистичної та частотної структури текстів, складання частотних словників мови конкретного автора або окремо взятих текстів мовознавці досліджували в багатьох мовах (німецькій, англійській, деяких слов'янських мовах тощо) [7–38].

Такий аналіз ґрунтується на побудові частотного словника автора за вибраним текстом шляхом обчислення частоти вживання кожної з отриманих одиниць тексту [3, 27]. Досвід складання подібних словників наочно демонструє, що словесне наповнення будь-якого досить довгого тексту має власну статистичну структуру. У результаті чого можна стверджувати, що в кожного автора є співвідношення часто і рідко вживаних лексем. Саме це співвідношення читач і сприймає як багатий чи бідний словник автора [6].

Далі, після проведення частого аналізу, виділяють визначальні ознаки кожного з текстів. Однією з таких характеристик є авторський інваріант [9]. Це числовий параметр, який дає можливість розрізнити твір за авторським стилем.

Дуже часто, як показали попередні дослідження прози, на цей показник істотно впливає частота вживання службових слів (таких, як прийменники чи частки).

Частотним характеристикам текстів присвячено багато робіт, у яких було розглянуто подібності між авторами ІХХ–ХХ століть. Також були проаналізовані подібні словники для різних слов'янських мов, таких як чеська, польська, сербська та болгарська [1].

Для атрибуції текстів використовують різні методи, проте найвищі результати дає використання частотних характеристик тексту [43], *N*-грам [34, 59] та їх різних варіацій, а також частоти слів (усіх або будь-якої окремої їх категорії [21]) та частин слів [49].

Один із широко використовуваних серед усіх перелічених методів аналізу тексту є метод *N*-грам [11]. Його часто використовують для виявлення плагіату [63], ефективність становить 70–80 %.

N-грамом в алфавіті називають довільний ланцюжок довжиною *N*. Як ланки такого ланцюжка можна використовувати символи та окремі слова. Метод полягає в підрахунку та порівнянні профілів частоти *N*-грамів для різних текстів. Як показали раніше наведені дослідження, використання *N*-грам найбільшою мірою відображає особистий стиль автора завдяки фіксуванню послідовностей лексичних конструкцій [21, 28]. Стиль тексту багато в чому визначає частота і порядок вживання в ньому різних частин мови [2], що задовольняє умовам застосування методу *N*-грам.

Аналіз на основі *N*-грамів дозволяє виявити характерні поєднання слів та їх складність для конкретного твору або автора. На основі цих даних можна визначити характерний стиль автора. Це твердження справедливе як для звичайних, так спеціалізованих текстів [11].

Токенізація та стемінг. Для лексичного аналізу існує процес розбиття тексту на елементарні одиниці – токени. Такий процес називають токенизацією, він є зазвичай початковим етапом стемінгу, адже дозволяє працювати зі словом як з окремою сутністю, при цьому знаючи його контекст. Зазвичай лексичний аналіз відбувається на рівні слів. Однак іноді буває важко визначити, що мається на увазі під «словом».

Перетворення морфологічних форм слова в основу здійснюють за умови, що кожна з них семантично пов'язана. Є два моменти, які слід враховувати в разі використання стемера:

1. Передбачено, що морфологічні форми слова мають однакове базове значення, отже, повинні відповідати одній основі.

2. Слова, які мають різне значення, слід зберігати окремо.

Ці два правила є достатніми, якщо результуючі основи корисні для наших програм видобутку тексту чи обробки мови.

У мовах із відносно простою морфологією вплив коренів менший, ніж у мовах із більш складною морфологією. Більшість проведених експериментів зі стемінгом, стосуються англійської та інших західноєвропейських мов.

Стемінг у широкому сенсі можна визначити як практику об'єднання семантично еквівалентних варіантів слів з одним і тим же коренем шляхом видалення словотворчих і словозмінних афіксів. Із технічної точки зору це процедура, яка намагається видалити суфікси для об'єднання варіантів слів в один.

Для англійської, як і для багатьох західноєвропейських мов, стемінг – це переважно метод видалення суфіксів. Тобто стемінг – це процедура видалення суфіксів, які приєднуються наприкінці слів. Тож стемінг-алгоритми для англійської та інших європейських мов зазвичай не враховують префікси та інфікси. Тому стемінг насамперед пов'язаний з морфологією суфіксів.

Результати стемінгу іноді дуже схожі на визначення кореня слова, та його алгоритми базуються на інших принципах. Тому слово після обробки за алгоритмом стемінгу може відрізнитися від морфологічного кореня слова.

Алгоритми стемінгу можна класифікувати на три групи: методи усічення, статистичні методи і змішані методи. Кожна з цих груп має типові способи знаходження основи варіантів слів.

Одним із найбільш поширених стемерів є стемер Мартіна Портера. Алгоритм набув поширення і став стандартним алгоритмом стемінгу для англійської мови. Цей стемер використовує методи усічення.

Оригінальна версія стемера була призначена для англійської мови, але згодом Портер, використовуючи основну ідею алгоритму, написав стемер для поширених індоєвропейських мов,

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

у тому числі для деяких слов'янських мов [58].

Завдяки своїм особливостям метода також має високу ефективність 75–85 %.

Синтаксичний аналіз. Синтаксичний аналіз різних частин тексту є досить популярним методом аналізу самої роботи автора, її семантики, спрямованості та основної ідеї твору. Проте цей вид аналізу текстів різних напрямів стикається зі складністю автоматичного формування синтаксичних моделей [30]. Це значною мірою обумовлено складністю структури самої мови, варіативністю використовуваних словоформ і самої структури речень. Незважаючи на це, зазначений метод дослідження тексту несе найбільшу кількість інформації про авторський стиль: незалежно від тематики тексту синтаксична структура мови автора буде явно відображати його власний стиль мовлення.

Відомі різні дослідження формалізації природної мови [25]. Один із методів роботи з природною мовою – використання граматик [47]. Наприклад, проведено подібні дослідження для італійської [35].

На відміну від проблеми категоризації тексту, мета якої полягає у визначенні теми або списку тем для тексту на основі його змісту, синтаксичний аналіз тексту абстрагується від конкретної галузі і намагається зрозуміти незалежні від змісту риси тексту, які є «лінгвістичними виразами» окремих авторів [16].

Ідея використання інформації про частини мови не нова й успішно застосована в низці завдань класифікації стилів, де оброблено, зокрема, тексти англійською мовою [22, 26]. Як правило, на основі частин мови витягують їх послідовності, що повторюються.

Описаний підхід добре працює для англійських текстів, оскільки структура англійської досить формальна, і порядок слів у реченні чітко закріплений за певною частиною мови. Крім того, самі слова мають не так багато різних словоформ, і в разі додавання або видалення префікса чи суфікса переходять до розряду іншої частини мови. Проте під час використання такого методу для інших мов можуть виникнути труднощі, тож робота з будь-якою мовою потребує врахування її особливостей, що робить неможливим створення універсального інструменту та вимагає кропіткого налаштування під кожен окремий випадок, маючи ефективність 75–90 %.

Дерева рішень є парадигмою машинного навчання, спеціально розробленого для підтримки описової класифікації та пояснення, чому класифікація відбулася саме так.

Ця техніка на основі дерева, у якій будь-який шлях, починаючи з кореня, описано послідовністю розділення даних до тих пір, поки не буде досягнуто логічного результату в листовому вузлі [64]. Це ієрархічна ілюстрація зв'язків знань, які містять вузли та зв'язки. Коли відношення використовують для класифікації, вузли представляють цілі [40].

Дерева рішень є одним із найпотужніших методів, його використовують у різних галузях, таких як машинне навчання, обробка зображень та ідентифікація шаблонів. Це послідовна модель, яка об'єднує серію базових тестів ефективно та узгоджено, де числова характеристика порівнюється з пороговим значенням у кожному тесті [12]. Концептуальні правила набагато легше побудувати, ніж числові ваги в нейронній мережі зв'язків між вузлами [8, 18]. В основному використовують метод для групування, але, крім того він є зазвичай використовуваною моделлю класифікації в Data Mining [17]. Вузли та гілки складаються з кожного дерева. Кожен вузол представляє ознаки в категорії, що підлягає класифікації, і кожна підмножина визначає значення, яке може прийняти вузол [13]. Завдяки своєму простому аналізу та точності на багатьох формах даних, дерева рішень знайшли багато полів реалізації [36].

У сфері обробки природної мови, згідно з наявним дослідженням, ефективність методу сягала 75–85 % у роботі з різними мовами та напрямками текстів.

Нейронні мережі ґрунтуються на моделі людського мозку як метафори [42]; вони складаються з великої кількості взаємодіючих простих арифметичних процесорів.

Як і у випадку з біологічними мережами, окремі вузли в штучних нейронних мережах називають нейронами. Ці нейрони є обчислювальними одиницями, які отримують вхідні дані від інших нейронів, виконують обчислення на цих вхідних даних і передають їх іншим нейронам. На обчислення в нейроні впливають ваги вхідних з'єднань цього нейрона, оскільки вхідні дані нейрона масштабуються за вагою. Цю вагу можна розглядати як аналог міцності синаптичного зв'язку. Відповідним чином змінюючи ці

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

вагові коефіцієнти, можна вивчити загальну обчислювальну функцію штучної нейронної мережі, що є аналогом вивчення синаптичної сили в біологічних нейронних мережах [5]. Ідея полягає в тому, щоб поступово змінювати ваги щоразу, коли поточний набір ваг робить неправильні прогнози [5].

Існують дослідницькі роботи, авторам яким вдалося перетворити такі мережі на набори правил, щоб дізнатися, чого навчилася мережа [15, 44]. Однак у багатьох інших роботах усе ще називають такий спосіб підходом «чорної скриньки» [52, 44], через труднощі в розумінні процесу прийняття рішень нейронною мережею, що може призвести до невідомості про успішність тестування. Ефективність методу має широкий розбіг – від 74 до майже 92 %.

На жаль, нейронні мережі не можуть перевершити інші методи, у першу чергу опорний вектор машини, на даний момент, мабуть, найточніший із відомих методів класифікації [31].

Наївний Баєс – це простий імовірнісний класифікатор, який оцінює набір імовірностей шляхом обчислення частоти та розташування значення в наборі даних [55].

Наївні баєсівські класифікатори виконують аналогічну класифікацію, але без деревоподібної структури. Натомість вони покладаються на просте обчислювальне застосування теореми Баєса для виведення ймовірності того, що схема класифікації виведе найбільш ймовірну категорію з урахуванням спостережуваних даних. Їх називають «наївними», тому що вони використовують прості і нереалістичні припущення про незалежність (наприклад, вони можуть припустити, що частина слова «я» не залежить від частоти слова «я», свідомо хибне припущення), проте все ж можуть працювати напроцуд добре і надзвичайно швидко розвиватися і тренуватися [62].

Наївні моделі Баєса популярні в додатках машинного навчання через їхню простоту, що дозволяє кожному атрибуту робити свій внесок в остаточне рішення однаково й незалежно від інших атрибутів. Ця простота прирівнюється до обчислювальної ефективності, що робить метод привабливим і придатним для багатьох галузей. Однак те, що робить їх популярними, також є причиною, яку наводять деякі дослідники, які

вважають цей підхід слабким. Усе ж у разі використання у відповідних галузях ці моделі пропонують швидке навчання, швидкий аналіз даних і прийняття рішень, а також просту інтерпретацію результатів тесту [62]. Існують дослідницькі роботи [29, 60], які намагаються пом'якшити припущення про незалежність змінних шляхом введення прихованих змінних у їхніх деревоподібних або ієрархічних класифікаторах.

Удосконалення стандартного правила або його використання у співпраці з іншими методами може значно поліпшити результати [4]. Наприклад, NBTree [60] досліджують роботу гібриду, використовуючи правило Байєса для побудови дерева рішень. Інші дослідницькі роботи [29] модифікували свої класифікатори, щоб навчатися на позитивних і немаркованих прикладах.

Алгоритм легко і швидко передбачає клас тестового набору даних. Він також добре справляється з багатокласовим прогнозуванням. Продуктивність наївного баєсівського класифікатора краща, ніж в інших простих алгоритмах, таких як логістична регресія, і вимагає менше навчальних даних. Обмеженням цього алгоритму є припущення про незалежність ознак. Однак у реальних завданнях цілком незалежні ознаки трапляються вкрай рідко.

Метод має середню ефективність порівняно з іншими, усього 70–80 %.

Машини опорних векторів [53] мають сильні теоретичні основи та чудові емпіричні успіхи. Їх застосовували для таких завдань, як розпізнавання рукописних цифр, розпізнавання об'єктів і класифікація тексту.

Хоча здатність до навчання та обчислювальна складність навчання на опорних векторних машинах може не залежати від розмірності простору, однак зменшення обчислювальної складності є важливою проблемою для ефективною обробки великої кількості термінів у практичних застосуваннях класифікації тексту [24].

Машина опорних векторів є технікою класифікації, яка прагне знайти гіперплощину, що розбиває дані за їх міткою класу, і в той же час уникати надмірної фільтрації даних [10]. Вивчення гіперплощини в лінійній здійснюють шляхом перетворення задачі за допомогою лінійної алгебри [48]. І це створює двійкову класифікацію, за-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

сновану на розділенні гіперплощини на повторно відображеному просторі екземплярів.

Цей метод є одним із найвідоміших методів оптимізації очікуваного рішення [37, 54]. Його надзвичайна здатність до узагальнення разом з оптимальним рішенням і розрізняльною здатністю привернула увагу для інтелектуального аналізу даних, розпізнавання образів і машинного навчання в останні роки. Було показано, що SVM перевершують інші методи навчання під наглядом [41]. Завдяки хорошій теоретичній основі та хорошій здатності до узагальнення SVM стали одним із найбільш використовуваних методів класифікації. Ефективність застосування становить 77–90 %.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше закладено основу для створення інструменту з аналізу побудови україномовних текстів за допомогою систематизації наявних методів та розробок, що працюють для інших мов. Виявлено можливості роботи з тестами таких методів:

1. Статистичних:
 - частотний аналіз [3, 7, 11, 27, 49];
 - стемінг [58];
 - синтаксичний аналіз [25, 30, 44, 47, 50, 53].
2. Методів машинного навчання:
 - дерева рішень [12, 13, 17, 36, 64];
 - нейронні мережі [5, 15, 16, 42, 44];

– наївні баксівські класифікатори [4, 29, 56, 60, 62];

– машини опорних векторів [10, 24, 37, 53, 54].

Аналіз дав змогу виділити найбільш значні методи роботи з природномовними текстами. Закладено теоретичні основи для створення інструменту для роботи з україномовними текстами.

Висновки

Було проведено аналіз найефективніших методів, які найчастіше використовують для аналізу та атрибуції тексту з подільшим визначення авторства.

Кожен із методів не є універсальним та має недоліки. Крім того, робота з різними мовами вимагає врахування їх особливостей безпосередньо в побудові слів та речень. Це потребує модифікації методів та налаштування на роботу з особливостями обраної мови для отримання кращого результату.

Однак, незважаючи на необхідність створення окремого інструменту для роботи саме з українською мовою, методи є ефективними. Результат визначення авторства знаходиться в діапазоні від 74 до 92 % правильно встановлених випадків. Ці результати варіювалися залежно від використовуваного методу, мови і стилю аналізованого тексту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бук С. Слов'янський досвід укладання частотних словників мови письменника. *Проблеми слов'янознавства*. 2011. Вип. 60. С. 217–224.
2. Войтенко К. І. Функціональний стиль художнього мовлення. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія»: серія- «Філологія»*. 2012. Вип. 26. С. 53–56.
3. Перебийніс В. С. *Статистичні методи для лінгвістів* : навчальний посібник. Вінниця : Нова книга, 2002. 168 с.
4. Addin O., Sapuan S. M., Mahdi E., Othman M. A Naive-Bayes classifier for damage detection in engineering materials. *Materials and Design*. 2007. Vol. 28. Iss. 8. P. 2379–2386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.07.018>
5. Aggarwal C. C. *Machine learning for text*. Springer International Publishing. 2018. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73531-3>
6. Alekseev P. M. *Frequency dictionaries (Häufigkeitswörterbücher)*. *Quantitative Linguistik : ein internationales Handbuch = Quantitative linguistics : an international handbook*. Berlin; New York : Walter de Gruyter, 2005. P. 312–324.
7. Alsaleem S. Automated Arabic Text Categorization Using SVM and NB. *International Arab Journal of e-Technology*. 2011. Vol. 2. Iss. 2. P. 124–128.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

8. Barros R., Basgalupp M., de Carvalho A., Freitas A. A Survey of Evolutionary Algorithms for Decision-Tree Induction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. 2012. Vol. 42. Iss. 3. P. 291–312. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2011.2157494>
9. Bensefia A., Nosary A., Paquet T., Heutte L. Writer Identification By Writer’s Invariants. *Proceedings Eighth International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*. 2002. P. 274–279. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWFHR.2002.1030922>
10. Brownlee J. Support Vector Machines for Machine Learning. *Machine Learning Algorithms*. 2016. URL: <https://machinelearningmastery.com/support-vector-machines-for-machine-learning/>
11. Cavnar W. B., John M. T. *N-Gram-Based Text Categorization*. Michigan, 1994. P. 161–175.
12. Damanik I. S., Windarto A. P., Wanto A., Andani S. R., Saputra W. Decision Tree Optimization in C4. 5 Algorithm Using Genetic Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1255. Iss. 1. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1255/1/012012>
13. Dey A. Machine learning algorithms: a review. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. 2016. Vol. 7. Iss. 3. P. 1174–1179.
14. Fayyad U., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P. *From data mining to knowledge discovery: An Overview*. AI Magazine. 1996. Vol. 17, No. 3. P. 1–36.
15. Fletcher G. P., Hinde C. J. Interpretation of Neural Networks as Boolean Transfer Functions. *Knowledge-Based Systems*. 1994. Vol. 7. Iss. 3. P. 207–214.
16. Gamon M. Linguistic correlates of style: authorship classification with deep linguistic analysis features. *Proceedings of the 20th International Conference on Computational Linguistics*. 2004. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.3115/1220355.1220443>
17. Gavankar S. S., Sawarkar S. D. Eager decision tree. *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* (Mumbai, 07-09 April 2017). Mumbai, 2017. P. 837–840. DOI: <https://doi.org/10.1109/I2CT.2017.8226246>
18. Gupta G. A self-explanatory review of decision tree classifiers. *International conference on recent advances and innovations in engineering (ICRAIE-2014)* (Jaipur, 09-11 May 2014). Jaipur, 2014. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/icraie.2014.6909245>
19. Gupta V., Gurpreet S. L. A Survey of Text Mining Techniques and Applications. *Journal of emerging technologies in web intelligence*. 2009. Vol. 1. Iss. 1. P. 60–76. DOI: <https://doi.org/10.4304/jetwi.1.1.60-76>
20. Hearst M. A. *Text data mining: Issues, techniques, and the relationship to information access*. 1997. URL: <https://people.ischool.berkeley.edu/~hearst/talks/dm-talk/>
21. Hoover D. L. Frequent word sequences and statistical stylistics. *Literary and Linguistic Computing*. 2002. Vol. 17. Iss. 2. P. 157–180. DOI: <https://doi.org/10.1093/lle/17.2.157>
22. Juola P. Authorship attribution. *Foundations and Trends® in Information Retrieval*. 2007. Vol. 1. Iss. 3. P. 233–334. DOI: <https://doi.org/10.1561/15000000005>
23. Jusoh S., Alfawareh H. M. Natural language interface for online sales. *2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems* (Kuala Lumpur, 25-28 Nov. 2007). Kuala Lumpur, 2007. P. 224–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/icias.2007.4658379>
24. Kim H., Howland P., Park H., Christianini N. Dimension reduction in text classification with support vector machines. *Journal of machine learning research*. 2005. Vol. 6. Iss. 2. P. 37–53.
25. Kohan Ya. O. On the possibilities of formalizing natural languages. *TAAPSD*. 2016. Vol. 3. P. 137–143.
26. Koppel M., Schler J., Argamon S. Computational methods in authorship attribution. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*. 2009. Vol. 60. Iss. 1. P. 9–26. DOI: <https://doi.org/10.1002/asi.20961>
27. Köhler R., Altmann G. Aims and Methods of Quantitative Linguistics. *Problems of Quantitative Linguistics*. 2005. P. 12–42.
28. Kruczek J., Kruczek P., Kuta M. Are N-gram Categories Helpful in Text Classification? *Computational Science – ICCS 2020*. 2020. P. 524–537. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50417-5_39
29. Langseth H., Nielsen T. Classification using Hierarchical Naïve Bayes models. *Machine Learning*. 2006. Vol. 63. Iss. 2. P. 135–159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-006-6136-2>
30. Li J., Liu M., Qin B., Liu T. A survey of discourse parsing. *Frontiers of Computer Science*. 2022. Vol. 16. Iss. 5. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11704-021-0500-z>
31. Luo X. Efficient English text classification using selected Machine Learning Techniques. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60. Iss. 3. P. 3401–3409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.02.009>

32. Lytvyn V., Pukach P., Vysotska V., Vovk M., Kholodna N. Identification and Correction of Grammatical Errors in Ukrainian Texts Based on Machine Learning Technology. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Iss. 4. P. 904–923. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11040904>
33. Mahesh B. Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2020. Vol. 9. Iss. 1. P. 381–386.
34. Markov I., Baptista J., Pichardo-Lagunas O. Authorship Attribution in Portuguese Using Character N-grams. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2017. Vol. 14. Iss. 3. P. 59–78. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.14.3.2017.3.4>
35. Mazzei A., Lombardo V. Building a large grammar for Italian. *Proceedings of the Fourth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'04)*. 2004. P. 51–54.
36. Mrva J., Neupauer Š., Hudec L., Ševcech J., Kapec P. Decision Support in Medical Data Using 3D Decision Tree Visualisation. *2019 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)* (Iasi, 21-23 Nov. 2019). Iasi, 2019. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/EHB47216.2019.8969926>
37. Platt J. *Sequential minimal optimization: a fast algorithm for training support vector machines*. 1998. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/sequential-minimal-optimization-a-fast-algorithm-for-training-support-vector-machines/>
38. Popescu I., Altmann G. Some aspects of word frequencies. *Glottometrics*. 2006. Vol. 13. P. 23–46.
39. Popescu I. *Word frequency studies*. Berlin, New York : De Gruyter Mouton, 2009. 276 p. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110218534>
40. Priyanka N. A., Kumar D. Decision tree classifier: a detailed survey. *International Journal of Information and Decision Sciences*. 2020. Vol. 12. Iss. 3. P. 246–269. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijids.2020.108141>
41. Raheja J. L., Mishra A., Chaudhary A. Indian sign language recognition using SVM. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2016. Vol. 26. P. 434–441. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661816020164>
42. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, London, 2003. 1132 p.
43. Sari Y., Vlachos A., Stevenson M. Continuous N-gram Representations for Authorship Attribution. *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics*. 2017. Vol. 2. P. 267–273. DOI: <https://doi.org/10.18653/v1/e17-2043>
44. Segaran T. *Programming Collective Intelligence*. O'Reilly Media Inc. 2007. 360 p.
45. Shynkarenko V. I., Demidovich I. M. Constructive-synthesizing modeling of natural language texts. *Computer systems and information technologies*. 2023. Vol. 3. P. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2023-3-10>
46. Shynkarenko V. I., Demidovich I. M. Natural Language Texts Authorship Establishing Based on the Sentences Structure. *COLINS-2022 : 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems* (Gliwice, 12–13 May 2022). Gliwice, 2022. P. 328–337.
47. Silberstein M. A new linguistic engine for nooj: Parsing context-sensitive grammars with finite-state machines. *Communications in Computer and Information Science*. 2017. P. 240–250. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73420-0_20
48. Srinivas R. *Managing Large Data Sets Using Support Vector Machines*. 2010. URL: https://www.researchgate.net/publication/254701776_Managing_Large_Data_Sets_Using_Support_Vector_Machines
49. Sidorov G. O. Automatic Authorship Attribution Using Syllables as Classification Features. *Rhema*. 2018. P. 1–19.
50. Tal B. *Neural Network – Based System of Leading Indicators, CIBC World Markets*. 2003.
51. Towell G., Shavlik J. Extracting Refined Rules from Knowledge-Based Neural Networks. *Machine Learning*. 1993. Vol. 3. Iss. 1. P. 71–101. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00993103>
52. Tu J. V. Advantages and disadvantages of using artificial neural networks versus logistic regression for predicting medical outcomes. *Journal of Clinical Epidemiology*. 1996. Vol. 49. Iss. 11. P. 1225–1231. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0895-4356\(96\)00002-9](https://doi.org/10.1016/s0895-4356(96)00002-9)
53. Vapnik V. *Estimation of Dependences Based on Empirical Data*. Springer Verlag, 1982. 505 p.
54. Vapnik V. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, 1998.
55. Vijayarani S., Muthulakshmi M. Comparative Analysis of Bayes and Lazy Classification Algorithms. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. 2013. Vol. 2. Iss. 8. P. 3118–3124.
56. Vijayarani M. Preprocessing Techniques for Text Mining – An Overview. *International Journal of Computer Science & Communication Networks*. 2015. Vol. 5 (1). P. 7–16.

57. Vysotska V., Holoshchuk S., Holoshchuk R. A Comparative Analysis for English and Ukrainian Texts Processing Based on Semantics and Syntax Approach. *COLINS*. 2021. P. 311–356.
58. Vysotska V., Lytvyn V., Kovalchuk V., Kubinska S., Dilai M., Rusyn B., Pohreliuk L., Chyrun L., ..., Brodyak O. Method of Similar Textual Content Selection Based on Thematic Information Retrieval. *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (Lviv, 17-20 Sept. 2019). Lviv, 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/stc-csit.2019.8929752>
59. Vysotska V., Markiv O., Teslia S., Romanova Y., Pihulechko I. Correlation Analysis of Text Author Identification Results Based on N-Grams Frequency Distribution in Ukrainian Scientific and Technical Articles. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3171. P. 277–314.
60. Wang L.-M., Li X.-L., Cao C.-H., Yuan S.-M. Combining decision tree and Naive Bayes for classification. *Knowledge-Based Systems*. 2006. Vol. 19. Iss. 7. P. 511–515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2005.10.013>
61. Wimmer G., Altmann G., Hřebíček L., Ondrejovič S., Wimmerová S. *Úvod do analýzy textov*. Bratislava, 2003. 344 p.
62. Xhemali D., Hinde C. J., Stone R. Naive Bayes vs. Decision Trees vs. Neural Networks in the Classification of Training Web Pages. *International Journal of Computer Science*. 2009. Vol. 4. Iss. 1. P. 16–23.
63. Yalcin, K., Cicekli, I., Ercan, G. An external plagiarism detection system based on part-of-speech (POS) tag n-grams and word embedding. *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 197. P. 116677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116677>
64. Yang F. An Extended Idea about Decision Trees. *2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)* (Las Vegas, 05-07 Dec. 2019). Las Vegas, 2019. P. 349–354. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSCI49370.2019.00068>
65. Zeldes A., Schroeder C. T. Computational Methods for Coptic: Developing and Using Part-of-Speech Tagging for Digital Scholarship in the Humanities. *Digital Scholarship in the Humanities*. 2015. Vol. 30. Iss. suppl_1. P. i164–i176. DOI: <https://doi.org/10.1093/llc/fqv043>

I. M. DEMIDOVICH^{1*}

^{1*}Dep. «Computer Information Technologies», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana st. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 586 99 48, e-mail 2019demidovichinn@gmail.com, ORCID 0000-0002-3644-184X

Methods of Intellectual Text Analysis

Purpose. Natural language text processing techniques are used to solve a wide range of tasks. One of the most difficult tasks when working with natural language texts for different languages is to find certain indicators for further determining its authorship. The problem is still relevant due to the lack of a unified tool or method for working with texts in different languages. Working with texts in Ukrainian requires taking into account its peculiarities of word and sentence construction to obtain the best result. The main purpose of this article is to analyze the existing methods of text processing, their features and effectiveness in working with texts of different languages. **Methodology.** Natural language text processing methods are systematized by type and format, according to the tools and approaches used. For each method, its features, effectiveness, scope, and limitations are considered. The means of system analysis were used to form the final characterization of the method, taking into account its purpose and capabilities. **Findings.** The study of methods has revealed the following ones used for the intellectual analysis of texts in different languages, their scope, effectiveness in working with different languages, strengths and weaknesses. This will make it possible to choose an effective toolkit for working with Ukrainian texts. It has been established that intelligent text processing is a complex task that requires an individual approach to each language to take into account its peculiarities and obtain the best result. **Originality.** The basis for choosing an effective method for working with Ukrainian-language texts is formed, the existing methods of intellectual text processing, their application features, capabilities and efficiency in working with texts of different languages are analyzed and systematized. **Practical value.** The work allowed us to identify the most promising, effective and appropriate methods of intellectual analysis of natural language texts in order to use them for processing Ukrainian-language texts in the future.

Keywords: natural language texts; intellectual text processing; frequency analysis; stemming; syntactic analysis; neural networks

REFERENCES

1. Buk, S. (2011). Slavic experience of compiling a frequency dictionary of writer's language. *Problems of slavonic studies*, 60, 217-224. (in Ukrainian)
2. Voitenko, K. I. (2012). Funktsionalnyy styl khudozhnogo movlennya. *Naukovi zapiski Nacional'nogo universitetu «Ostroz'ka akademiâ». Seriâ Filologična*, 26, 53-56. (in Ukrainian)
3. Perebyynis, V. S. (2002). *Statystychni metody dlya linhvistiv: navchalnyy posibnyk*. Vinnytsya: Nova knyha. (in Ukrainian)
4. Addin, O., Sapuan, S. M., Mahdi, E., & Othman, M. (2007). A Naïve-Bayes classifier for damage detection in engineering materials. *Materials & Design*, 28(8), 2379-2386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.07.018> (in English)
5. Aggarwal, C. C. (2018). *Machine Learning for Text* (pp. 1-6). Springer International Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73531-3> (in English)
6. Alekseev, P. M. (2005). Frequency dictionaries (Häufigkeitwörterbücher). In *Quantitative Linguistik: ein internationales Handbuch=Quantitative linguistics: an international handbook* (pp. 312–324). Berlin; New York: Walter de Gruyter. (in English)
7. Alsalem, S. (2011). Automated Arabic Text Categorization Using SVM and NB. *International Arab Journal of e-Technology* 2(2), 124-128. (in English)
8. Barros, R. C., Basgalupp, M. P., de Carvalho, A. C. P. L. F., & Freitas, A. A. (2012). A Survey of Evolutionary Algorithms for Decision-Tree Induction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(3), 291-312. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsmcc.2011.2157494> (in English)
9. Bensefia, A., Nosary, A., Paquet, T., & Heutte, L. (2002). Writer identification by writer's invariants. *Proceedings Eighth International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*, 274-279. DOI: <https://doi.org/10.1109/iwthr.2002.1030922> (in English)
10. Brownlee, J. (2016). Support Vector Machines for Machine Learning. *Machine Learning Algorithms*. Retrived from <https://machinelearningmastery.com/support-vector-machines-for-machine-learning/> (in English)
11. Cavnar, W. B., & John M. T. (1994). *N-Gram-Based Text Categorization*. Michigan. (in English)
12. Damanik, I. S., Windarto, A. P., Wanto, A., Poningsih, Andani, S. R., & Saputra, W. (2019). Decision Tree timization in C4.5 Algorithm Using Genetic Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 1255(1), 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1255/1/012012> (in English)
13. Dey, A. (2016). Machine learning algorithms: a review. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 7(3), 1174-1179. (in English)
14. Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., & Smyth, P. (1996). From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. *AI Magazine*, 17(3), 1-37. (in English)
15. Fletcher, G. P., & Hinde, C. J. (1994). Interpretation of neural networks as Boolean transfer functions. *Knowledge-Based Systems*, 7(3), 207-214. DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-7051\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0950-7051(94)90007-8) (in English)
16. Gamon, M. (2004). Linguistic correlates of style: authorship classification with deep linguistic analysis features. *Proceedings of the 20th International Conference on Computational Linguistics*, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.3115/1220355.1220443> (in English)
17. Gavankar, S. S., & Sawarkar, S. D. (2017, April). Eager decision tree. In *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* (pp. 837-840). Mumbai, India. DOI: <https://doi.org/10.1109/I2CT.2017.8226246> (in English)
18. Gupta, G. (2014, May). A self-explanatory review of decision tree classifiers. *International conference on recent advances and innovations in engineering (ICRAIE-2014)* (pp. 1–7). DOI: <https://doi.org/10.1109/icraie.2014.6909245> (in English)
19. Gupta, V., & Lehal, G. S. (2009). A Survey of Text Mining Techniques and Applications. *Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence*, 1(1), 60-76. DOI: <https://doi.org/10.4304/jetwi.1.1.60-76> (in English)
20. Hearst, M. A. (1997). *Text data mining: Issues, techniques, and the relationship to information access*. Retrieved from <https://people.ischool.berkeley.edu/~hearst/talks/dm-talk/> (in English)
21. Hoover, D. L. (2002). Frequent Word Sequences and Statistical Stylistics. *Literary and Linguistic Computing*, 17(2), 157-180. DOI: <https://doi.org/10.1093/lc/17.2.157> (in English)
22. Juola, P. (2007). Authorship Attribution. *Foundations and Trends® in Information Retrieval*, 1(3), 233-334. DOI: <https://doi.org/10.1561/1500000005> (in English)

23. Jusoh, S., & Al-Fawareh, H. M. (2007). Natural language interface for online sales systems. In *2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems* (pp. 224-228). DOI: <https://doi.org/10.1109/icias.2007.4658379> (in English)
24. Kim, H., Howland, P., Park, H., & Christianini, N. (2005). Dimension reduction in text classification with support vector machines. *Journal of machine learning research*, 6(1), 37-53. (in English)
25. Kohan, Ya. O. (2016). On the possibilities of formalizing natural languages. *TAAPSD*, 3, 137-143. (in English)
26. Koppel, M., Schler, J., & Argamon, S. (2008). Computational methods in authorship attribution. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 60(1), 9-26. DOI: <https://doi.org/10.1002/asi.20961> (in English)
27. Köhler, R., & Altmann, G. (2005). Aims and Methods of Quantitative Linguistics. *Problems of Quantitative Linguistics*, 12-42. (in English)
28. Kruczek, J., Kruczek, P., & Kuta, M. (2020). Are N-gram Categories Helpful in Text Classification? *Computational Science-ICCS 2020*, 524-537. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50417-5_39 (in English)
29. Langseth, H., & Nielsen, T. D. (2006). Classification using Hierarchical Naïve Bayes models. *Machine Learning*, 63(2), 135-159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-006-6136-2> (in English)
30. Li, J., Liu, M., Qin, B., & Liu, T. (2022). A survey of discourse parsing. *Frontiers of Computer Science*, 16(5), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11704-021-0500-z> (in English)
31. Luo, X. (2021). Efficient English text classification using selected Machine Learning Techniques. *Alexandria Engineering Journal*, 60(3), 3401-3409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.02.009> (in English)
32. Mahesh, B. (2020). Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 9(1), 381-386. (in English)
33. Lytvyn, V., Pukach, P., Vysotska, V., Vovk, M., & Kholodna, N. (2023). Identification and Correction of Grammatical Errors in Ukrainian Texts Based on Machine Learning Technology. *Mathematics*, 11(4), 904-923. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11040904> (in English)
34. Markov, I., Baptista, J., & Pichardo-Lagunas, O. (2017). Authorship Attribution in Portuguese Using Character N-grams. *Acta Polytechnica Hungarica*, 14(3), 59-78. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.14.3.2017.3.4> (in English)
35. Mazzei, A., & Lombardo, V. (2004). Building a large grammar for Italian. *Proceedings of the Fourth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC'04)*, 51-54. (in English)
36. Mrva, J., Neupauer, S., Hudec, L., Sevcech, J., & Kapec, P. (2019). Decision Support in Medical Data Using 3D Decision Tree Visualisation. *2019 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)* (pp. 1-4). Iasi, Romania. DOI: <https://doi.org/10.1109/ehb47216.2019.8969926> (in English)
17. Platt, J. (1998). *Sequential minimal optimization: a fast algorithm for training support vector machines*. Retrieved from <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/sequential-minimal-optimization-a-fast-algorithm-for-training-support-vector-machines/> (in English)
38. Popescu, I., & Altmann, G. (2006). Some aspects of word frequencies. *Glottometrics*, 13, 23-46. (in English)
39. Popescu, I. (2009). *Word Frequency Studies*. Berlin, New York: De Gruyter Mouton. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110218534> (in English)
40. Priyanka, N. A., & Kumar, D. (2020). Decision tree classifier: a detailed survey. *International Journal of Information and Decision Sciences*, 12(3), 246-269. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijids.2020.108141> (in English)
21. Raheja, J. L., Mishra, A. & Chaudhary, A. (2016). Indian sign language recognition using SVM. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 26, 434-441. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661816020164> (in English)
42. Russell, S., & Norvig, P. (2003). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, London. (in English)
43. Sari, Y., Vlachos, A., Stevenson, M. Continuous N-gram Representations for Authorship Attribution. In *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics* (Vol. 2, pp. 267-273). DOI: <https://doi.org/10.18653/v1/e17-2043> (in English)
44. Segaran, T. (2007). *Programming Collective Intelligence*. O'Reilly Media Inc. (in English)
45. Shynkarenko, V., & Demidovich, I. (2023). Constructive-synthesizing modeling of natural language texts. *Computer Systems and Information Technologies*, 3, 81-91. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2023-3-10> (in English)
46. Shynkarenko, V. I., & Demidovich, I. M. (2022, May). Natural Language Texts Authorship Establishing Based on the Sentences Structure. In *COLINS-2022: 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems* (pp. 328-337). Gliwice, Poland. (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

47. Silberztein, M. (2017). A New Linguistic Engine for NooJ: Parsing Context-Sensitive Grammars with Finite-State Machines. *Communications in Computer and Information Science*, 240-250. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73420-0_20 (in English)
48. Srinivas, R. (2010). *Managing Large Data Sets Using Support Vector Machines*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/254701776_Managing_Large_Data_Sets_Using_Support_Vector_Machines (in English)
49. Sidorov, G. O. (2018). Automatic Authorship Attribution Using Syllables as Classification Features. *Rhema*, 1-19. (in English)
50. Tal, B. (2003). *Neural Network – Based System of Leading Indicators, CIBC World Markets*. (in English)
51. Towell, G. G., & Shavlik, J. W. (1993). Extracting refined rules from knowledge-based neural networks. *Machine Learning*, 13(1), 71-101. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00993103> (in English)
52. Tu, J. V. (1996). Advantages and disadvantages of using artificial neural networks versus logistic regression for predicting medical outcomes. *Journal of Clinical Epidemiology*, 49(11), 1225-1231. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0895-4356\(96\)00002-9](https://doi.org/10.1016/s0895-4356(96)00002-9) (in English)
53. Vapnik, V. (1982). *Estimation of Dependences Based on Empirical Data*. Springer Verlag. (in English)
54. Vapnik, V. (1998). *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer. (in English)
55. Vijayarani, S., & Muthulakshmi, M. (2013). Comparative Analysis of Bayes and Lazy Classification Algorithms. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2(8), 3118-3124. (in English)
56. Vijayarani, M. (2015). Preprocessing Techniques for Text Mining – An Overview. *International Journal of Computer Science & Communication Networks*, 5(1), 7-16. (in English)
57. Vysotska, V., Holoshchuk, S., & Holoshchuk, R. (2021). A Comparative Analysis for English and Ukrainian Texts Processing Based on Semantics and Syntax Approach. *COLINS*, 311-356. (in English)
58. Vysotska, V., Brodyak, O., Lytvyn, V., Kovalchuk, V., Kubinska, S., Dilai, M., Chyrun, L., Chyrun, S., ..., & Pohreliuk, L. (2019). Method of Similar Textual Content Selection Based on Thematic Information Retrieval. In *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (pp. 1-6). Lviv, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.1109/stc-csit.2019.8929752> (in English)
59. Vysotska, V., Markiv, O., Teslia, S., Romanova, Y., & Pihulechko, I. (2022). Correlation Analysis of Text Author Identification Results Based on N-Grams Frequency Distribution in Ukrainian Scientific and Technical Articles. *CEUR Workshop Proceedings*, 3171, 277-314. (in English)
60. Wang, L.-M., Li, X.-L., Cao, C.-H., & Yuan, S.-M. (2006). Combining decision tree and Naive Bayes for classification. *Knowledge-Based Systems*, 19(7), 511-515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2005.10.013> (in English)
61. Wimmer, G., Altmann, G., Hřebíček, L., Ondrejovič, S., & Wimmerová, S. (2003). *Úvod do analýzy textov*. Bratislava. (in Slovak)
62. Xhemali, D., Hinde, C. J., & Stone, R. (2009). Naive Bayes vs. Decision Trees vs. Neural Networks in the Classification of Training Web Pages. *International Journal of Computer Science*, 4(1), 16-23. (in English)
63. Yalcin, K., Cicekli, I., & Ercan, G. (2022). An external plagiarism detection system based on part-of-speech (POS) tag n-grams and word embedding. *Expert Systems with Applications*, 197, 116677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116677> (in English)
64. Yang, F. (2019, Dec.). An Extended Idea about Decision Trees. In *2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)* (pp. 349-354). Las Vegas, NV, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSCI49370.2019.00068> (in English)
65. Zeldes, A., & Schroeder, C. T. (2015). Computational Methods for Coptic: Developing and Using Part-of-Speech Tagging for Digital Scholarship in the Humanities. *Digital Scholarship in the Humanities*, 30(suppl_1), i164–i176. DOI: <https://doi.org/10.1093/llc/fqv043> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.05.2023

Прийнята до друку: 29.09.2023

УДК 004.94:519.87

В. В. СКАЛОЗУБ^{1*}, В. М. ГОРЯЧКІН^{2*}, І. В. КЛИМЕНКО^{3*}, О. В. МУРАШОВ^{4*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта v.v.skalozub@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта vgoqa@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

^{3*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта i.v.klymenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-5149-3974

^{4*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта al.dp.ua@gmail.com ORCID 0000-0003-1815-6508

Комплексні багатовимірні нечіткі моделі процесів моніторингу та реабілітації хворих із нерівномірним інтервалом спостережень

Мета. Робота присвячена розвитку математичних моделей і методів нечіткого моделювання багатовимірних часових рядів (МЧР) для процесів моніторингу та реабілітації хворих із нерівномірними інтервалами між спостереженнями. У МЧР враховано системні властивості та єдності компонентів досліджуваних процесів шляхом формування комбінованих/комплексних багатовимірних нечітких моделей (CFTS). **Методика.** Реалізація моделей CFTS враховує власні ознаки зазначених процесів. Особливість CFTS полягає в тому, що нерівномірні інтервали спостережень, як і інші параметри, відображають системну єдність саме контрольованого процесу, а не встановлену зовні форму спостережень, регламент. CFTS узагальнюють моделі багатовимірних нечітких часових рядів порядку n із m вхідними і одним результуючим параметром, тобто різні компоненти можуть мати неоднаковий порядок передісторії n , окремі параметри можуть вимірюватися різними типами даних та формами невизначеності. **Результати.** У статті представлена комплексна вдосконалена структура моделей CFTS порядку n з m вхідними і одним результуючим параметром, яка пристосована до властивостей процесів моніторингу та реабілітації з нерівномірними інтервалами спостережень. Для формування CFTS запропонована поетапна процедура, яка дозволяє формувати склад параметрів. Подано приклад моделювання процесу реабілітації хворих на діабет на основі CFTS, який демонструє її відмінності та ефективність. Наведено порівняльні властивості моделей CFTS та моделей FTS. **Наукова новизна.** Отримано розвиток моделей і методів МЧР процесів моніторингу та реабілітації за нерівномірних інтервалів, сформовано комплексні моделі CFTS. Відмінність CFTS полягає в тому, що компонента нерівномірних інтервалів представлена як інші мультипараметри m , що можуть мати різний порядок передісторії n , а також різні типи даних та форми невизначеності. Запропоновано процедуру поетапного формування складу параметрів моделей CFTS. **Практична значимість.** Моделі CFTS забезпечують реалізацію мультипараметричних процесів моніторингу та реабілітації за нерівномірних інтервалів спостережень, спрощують структуру та зменшують кількість реляційних відношень, дозволяють усувати конфлікт продукційних правил у разі забезпечення необхідної точності результатів. Приклад моделювання процесу реабілітації хворих на діабет із такими параметрами, як рівень цукру, інтервал між спостереженнями, показник тиску крові, підтвердив достовірність і практичну значимість моделей CFTS.

Ключові слова: мультипараметричні процеси; моніторинг; реабілітація; нерівномірний інтервал; комплексні нечіткі моделі; аналіз і прогнозування

Вступ

Завдання щодо проблематики досліджень і моделювання процесів, представлених часовими рядами (ЧР) спостережень із різними властивостями, а також за нерівномірних інтервалів спостережень, сьогодні є одним із найбільш актуальних [1, 4, 13, 14]. Вирішенню широкого кола фундаментальних та прикладних завдань цього напрямку присвячено багато досліджень, кількість яких постійно зростає [8, 10, 13, 14].

Відзначено значну різноманітність форм та моделей відображення властивостей нерівномірних інтервалів щодо типів застосовуваних величин (детерміновані, інтервальні, нечіткі різних типів, інші) [5, 9, 11, 17]. Притому в моделях також враховують усе більше компонентів, характеристик та властивостей, які притаманні досліджуваним процесам [8, 12, 15–17]. Через можливі особливості та відмінності окремих властивостей досліджуваних процесів, різнома-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

нітність типів даних виникає ще більше ускладнення математичних і відповідних комп'ютерних та інших моделей. Стрімке зростання потоків даних в інформаційних та інших системах, характерних для Індустрії І4.0 [7], технологій великих даних [2, 3] та інтернету речей (IoT) [3] підвищують актуальність і вимоги до завдань аналізу й моделювання процесів за нерівномірних інтервалів спостережень. Серед такого типу процесів важливе місце посідають процеси моніторингу та реабілітації, деякі з них представлені в [1, 4, 5]. Важливими прикладами завдань моніторингу процесів залізничного транспорту є завдання управління експлуатацією парків технічних систем на основі параметрів поточного стану (вагонні парки [1], парки електричних двигунів (ЕД) стрілочних переводів [1, 9], ін.). Під час визначення послідовностей обслуговування ЕД на основі прогнозованих станів вирішують завдання, характерні для процесів реабілітації [1], які за формальними ознаками подібні до лікування хворих [9].

У роботі показано, що завдання моделювання та аналізу процесів моніторингу й реабілітації за даними спостережень за нерівномірних інтервалів спостережень має власні ознаки й потребує розвитку та вдосконалення комбінованих багатовимірних нечітких моделей. Представлення такого нового класу моделей, методики їх формування та алгоритмів їх функціонування складають предмет нашого дослідження. Щоб змістовно окреслити сутність завдання щодо комбінованих багатовимірних нечітких моделей, наведемо приклад процесів реабілітації хворих на діабет [6], який показує відмінність окремих властивостей і необхідність використання кількох різних типів даних. У цілому зазначено, що такий процес реабілітації передбачає формування математичних моделей для кількох узгоджених нечітких послідовностей із різнотипними ознаками та нерівномірним інтервалом спостережень. У представленій статті наведено приклад моніторингу та моделювання процесів реабілітації хворих з трьома компонентами аналізу (комбіновані нечіткі мультимоделі) – рівень цукру ($u_1(s)$, дійсне число), інтервал між спостереженнями ($u_2(\tau)$, нечітка величина типів 1 або 2), показник тиску крові ($u_3(p)$, нечітка величина першого типу). Під час формування таких індивідуальних для кожного пацієнта моделей процесів реабілітації

необхідно забезпечити можливість визначення оцінки очікуваного інтервалу (τ) до наступного контрольованого спостереження (або кілька кроків процесу) та очікувані при цьому показники (s), (p). Зазначимо, що показник (p) є тут вторинним, факультативним, а призначення (p) розглянуто в подальшому.

Прогнозування ЧР є потужним інструментом планування та прийняття рішень порівняно з традиційними статистичними моделями. Наведемо важливі для нашого дослідження нові досягнення і проблеми щодо моделювання та прогнозування недетермінованих процесів із нерівномірним інтервалом спостережень на основі багатовимірних нечітких моделей, MFTS [12, 14]. Методи нечітких часових рядів (FTS) було введено на початку 1990-х років для обробки невизначеності даних та для перевірки статистичних припущень про лінійність. Багато досліджень повідомляють про їх хорошу точність, простоту, потенціал для інтерпретування результатів та зниження обчислювальної складності. Загальноприйнята форма моделювання на основі FTS наведена в багатьох роботах, але має різноманітні вдосконалення, які забезпечують ефективність алгоритмів і точність результатів аналізу та прогнозування [14, 16–18]. Представлена стаття відповідає саме цьому напрямку розвитку моделей FTS (Fuzzy Time Series).

Мета

Наше дослідження спрямоване на вирішення завдань щодо проблеми нечіткого моделювання багатовимірних часових рядів для процесів моніторингу та реабілітації з урахуванням нерівномірних інтервалів між спостереженнями. При цьому відзначено системну ознаку моделей, яка полягає в тому, що перемінні інтервали спостережень відображають саме контрольований процес, а не встановлену форму спостережень (зовнішні процедури чи ознаки) значень параметрів. Для розвитку моделей та процедур багатовимірних нечітких часових рядів необхідно враховувати наведені головні властивості названих процесів, що забезпечується шляхом формування комбінованих/комплексних багатовимірних нечітких моделей (CMFTS). Зазначимо, що CMFTS/CFTS застосовують у першу чергу до процесів моніторингу та реабілітації (у статті в разі захворювання на діабет).

Методика

Моделі, методи й засоби аналізу та прогнозування недетермінованих процесів у формі ЧР за нерівномірних інтервалів спостережень та неточно визначених даних являють собою сучасний та актуальний напрям досліджень.

Із метою підвищення точності результатів моделювання та ефективності інструментарію в літературі було запропоновано різні типи моделей FTS, огляд яких наведено в [10, 11, 13, 14]. Далі для скорочення обсягу матеріалу наведемо дотичні до предмета статті дослідження із [14] без посилання на окремі першоджерела, а лише на авторів. У моделях FTS важливим компонентом є процедури дефазифікації, зокрема з варіаціями правил відповідно до моделі Чена. У них як прогнозоване беруть середньозважене значення середніх точок нечітких множин у правій частині правила. Одним із методів уточнення результату прогнозування є використання вагових коефіцієнтів. У моделях зважених правил ці ваги визначають за допомогою різних методів, наприклад, нечіткі набори номерів індексів або кількість входжень переходу в даних. У методі скаляризації дефазифіковане значення отримують на основі евклідових відстаней, індексів FLR, замість точної відповідності FLR. Також прогнозоване значення обчислюють комбінацією глобальної інформації, пов'язаної з відповідною FLR, і локальної інформації про останні нечіткі коливання. Дуру і Булут запропонували модель, у якій останній фактор значення та попередні шаблони помилок використовують для прогнозування наступного значення за допомогою нечіткого інтегрованого логічного прогнозування (FILF) та розширеного алгоритму FILF (E-FILF). Тео зі співавторами представили комбінацію методу центру тяжіння та адаптивної моделі очікування для розрахунку прогнозованого вихідного значення.

Відзначимо, що виконані дослідження були зосереджені на різних стратегіях розрахунку вагових показників у процесах дефазифікації. Наприклад, зважене за трендом повторення FLR в FLRG, упорядковане зважене агрегування (OWA), обчислення ступенів належності, використання ваги кожного нечіткого логічного відношення, а також засновані на повторенні та хронологічному порядку або порядку тренду,

розрахунок оптимальних векторів зважування та ін.

У Sadaei et al прогнозований результат скориговано з урахуванням кількості активних правил та очікуваної середньої точки кожного правила (множення середньозваженого середнього значення їхніх правих результатів та вагових показників). Щоб подолати проблему однакової ваги елементів моделей, була запропонована модель FTS високого порядку (HOFTS) як оновлений метод зваженої суми, в якому кожен шаблон зважують за його активацією з урахуванням очікуваної середньої точки кожного правила та активації правила. Незмінний у часі, заснований на правилах метод високого порядку, відомий як зважений інтервальний FTS, визначає модель (W[I]FTS). Розроблена Сільвою модель W[I]FTS використовує новий метод дефазифікації, заснований на інтервалах. У цій моделі остаточний прогноз обчислюють з урахуванням суми інтервалів правил, зважених за значенням членства кожного правила. У ймовірнісному методі зважених нечітких часових рядів (PWFTS) виходом процесу навчання є ймовірнісно-зважений FTPG (PWFTPG), який додає вагові коефіцієнти до лівої та правої сторін для розрахунку їх нечітких емпіричних імовірностей. Згенеровану модель PWFTPG застосовують для отримання результатів у процесі прогнозування. Його виконують в чотири етапи з трьома типами стратегій дефазифікації, включаючи ймовірнісне, інтервальне та точкове прогнозування.

Хоча до цього часу вже було представлено досить багато методів поліпшення продуктивності FTS моделей, в огляді [14] наведені певні проблеми, які все ще потребують уваги. Основними проблемами, порушеними в багатьох дослідженнях, є такі: багатовимірні методи, прогнозування MIMO (Multiple Input Multiple Output), масштабованість для великих даних, багатовимірні часові ряди, нестационарні FTS, потокові дані та гібридні моделі. Відзначено, що нещодавні роботи вже просунулися у вирішенні цих завдань, а також пропонують нові підходи з ймовірним та інтервальним прогнозуванням у FTS. Запропоновано розділити дослідження на багатовимірні FTS, нестационарні FTS та імовірнісні, а також на Interval FTS.

Багатовимірні нечіткі часові ряди використовують декілька нечітких часових рядів для

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

вирішення проблеми. Як правило, багатовимірні FTS можуть бути згруповані в декілька. Розрізняються такі моделі: вхід з одним виходом (MISO) та множинний вхід із множинним виходом (MIMO).

Зазначено, що деякі багатовимірні моделі FTS широко використовували метод кластеризації для скорочення багатовимірних даних до одновимірних. Цей підхід ґрунтується на кластеризації FCM або використанні інших методів автоматичної кластеризації. Був запропонований алгоритм High-Order Multi-Variable FTS (HMOV-FTS), заснований на кластеризуванні FCM. Чен ввів групу нечітких варіацій для прогнозування TAIEX, у якій кожен FVG групує FLRG кожного мінливого їх збігом. Деякі моделі методів багатовимірного прогнозування FTS першого та високого порядку доступні в літературі, включаючи багатовимірну FTS першого порядку, а також деякі публікації щодо багатовимірних FTS високого порядку, посилення на них наведене у [9, 14, 16]. На відміну від звичайних запропоновано новий метод MISO багатовимірних моделей FTS, названий зваженим багатовимірним FTS (WMVFTS).

Модель WMVFTS. WMVFTS підтримує масштабованість для великих даних та автоматичну оптимізацію гіперпараметрів. Однією з основних проблем, пов'язаних із багатовимірною FTS, є складність правил, що зростає разом зі зростанням розмірності процесу. Використання гранул нечіткої інформації (FIG) для відображення багатовимірних часових рядів в одновимірні часові ряди вважають рішенням, заснованим на концепції інформаційної гранули, FIG є підмножиною більш широкої сфери досліджень. FIG мають нечіткі набори (або лінгвістичні терміни), які досить інтерпретовані для досягнення високого рівня когнітивної абстракції людини.

Метод нечітких часових рядів нечітких інформаційних гранул (FIG-FTS) як розширена версія одновимірної моделі PWFTS представляє певну адаптовану і гнучку модель для виконання багатовимірного прогнозування високого порядку на багато кроків уперед. FIG-FTS працює шляхом перетворення багатовимірного часового ряду на одновимірні дані FTS із застосуванням гранул нечіткої інформації (FIG). FIG-FTS – це метод MIMO з можливістю точкового, інтервального та ймовірнісного прогно-

зування. Більше того, запропоновано новий підхід до довгострокового прогнозування, а також до створення узагальненої гранули нечіткої інформації із зональною зміною в часі (GTZ-FIG). Формування інформаційних гранул виконують за допомогою методу покрокового лінійного поділу (SLD). Цей метод представляє собою процедуру поділу змінної довжини і містить як тренд, так і діапазон коливань часового ряду. У цьому дослідженні використано інтервальну нечітку нейронну мережу LSTM типу 2, яка є новою рекурентною нейронною мережею, що враховує механізм LSTM. Згідно з властивостями GZT-FIGs взято модель передбачення подвійної мережі, де моделі FIG з різними тенденціями навчатимуться і прогнозуватимуться у двох незалежних системах виведення відповідно. Цей метод було досліджено на прикладі вирішення проблеми тривалої залежності часових рядів за допомогою реалізації зонарного часового варіанта, коли була застосована нечітка інформаційна гранула.

Відзначено, що нещодавно був запропонований метод, присвячений проблемі багатовимірних часових рядів, у якому автори виконали проєктування вихідних багатовимірних даних у низькорозмірний простір. Для цього були застосовані процедури використання карт Кохонена. На наступних етапах моделювання був використаний зважений багатовимірний метод FTS (WMVFTS) для виявлення правил і прогнозування. Для обробки потокових даних запропоновано Evolving Multivariate FTS (e-MVFTS), що забезпечує адаптивний метод просторово-часового прогнозування для врахування змін у розподілі даних або дрейфу концепцій даних.

Важливе місце в дослідженнях посідає проблема розподілу на квантілі областей варіювання значень недетермінованих процесів. Незважаючи на відомі переваги схем секціонування рівної довжини, їхня продуктивність невелика, коли дані не розподілені рівномірно. Таким чином, у літературі було представлено різні типи методів розбиття на області нерівного розміру. Їх можна розділити на дві групи: математичні методи та методи м'яких обчислень. Існують різні типи математичних методів розбиття, такі як розбиття на основі розподілу та середнього, евристична інформація, заснована

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

на методі Чена, модель розбиття на основі частотної щільності, що виконується автоматично.

Представлені вище результати останніх досліджень свідчать про актуальність завдань щодо вирішення проблеми багатовимірних часових рядів, серед яких необхідно виділити моделювання процесів із нерівномірними інтервалами спостережень.

Відзначимо, що дослідження проблеми на основі застосування інтелектуального боту ChatGPT також підтвердили відсутність на кінець 2021 року закінчених рішень стосовно визначених у нашій статті завдань аналізу та моделювання процесів із нечітким та нерівномірним інтервалом спостережень.

Особливість і новизна сукупності запропонованих моделей, процедур їх формування та алгоритмів визначається наступним. В основі створюваних процедур моделювання, аналізу та прогнозування зазначених багатовимірних процесів лежить передумова (основне положення обґрунтування можливості такої побудови) про те, що нерівномірність інтервалів є власною властивістю процесу, вона визначається всією сукупністю його факторів. Тому може бути сформована об'єктивна модель зв'язку між нерівномірними інтервалами (їх довжинами) і рівнями різних характеристик процесу.

Особливість запропонованих алгоритмів полягає в тому, щоб відобразити безпосередньо в комплексних/комбінованих правилах FTS (CFTS) як характеристики процесу (значення рівнів показників), так і величини інтервалів між його подіями. У таких комбінованих правилах CFTS відображаються змістовні властивості процесу повніше і безпосередньо (тобто зазначені без певної обраної форми моделювання) за даними вимірів.

Далі, під час формування моделей процесів їх розмірність визначають поступово, шляхом аналізу структур правил зв'язку між послідовними рівнями показників процесу, які вже включені до моделі на певному етапі її формування. При цьому враховують форму та структуру отриманих правил моделей FTS [12, 14, 18]. Якщо в сукупності попередньо утворених правил за однакових посилань існує кілька компромісних варіантів висновків, тоді для усунення такої структури моделі можна додати ще одну нову змінну. Зазначимо, що в моделях FTS у таких випадках структури правил зазвичай

вводять додаткові попередні рівні (збільшують порядок моделей). Наведене формування порядку моделей виконують для всіх змінних, які попередньо були включені до моделі багатовимірного процесу.

Продемонструємо методику формування розмірності моделі на прикладі процесу реабілітації із змінними: рівень цукру $u_1(s)$, інтервал між спостереженнями $u_2(\tau)$, показник тиску крові $u_3(p)$. Нехай для показника рівень цукру $u_1(s)$ послідовність спостережень така, що не існують компромісні правила зв'язку рівнів у моделі типу FTS і результат за точністю оцінок відповідає вимогам. Тоді введення інших параметрів не потрібне. Як було раніше відзначено, послідовність $(u_1(k)(s))$ вже містить у своїх значеннях всі інші ознаки процесу. Коли неоднозначність (необхідність компромісу) висновків правил зв'язку рівнів значна, необхідно ввести до моделі ознаку інтервалу між спостереженнями $u_2(\tau)$, а далі в разі потреби таким же чином показник тиску крові $u_3(p)$. Реалізація цієї моделі наведена в статті далі.

Як найпростіша первинна (гранична) форма CFTS можуть бути запропоновані сепарабельні моделі (СПМ). У них безпосередньо не враховують (вважають невідомими, випадковими або латентними (прихованими)) можливі зв'язки між окремими метричними властивостями процесів. Останнє припущення СПМ виходить із цілісності процесу – одна властивість здатна відображати у своїх значеннях і всі інші, враховані в моделі. При цьому кожна метрична координата моделюється незалежно від інших як підпроцес із постійним кроком (значення номера вимірювань), у тому числі й координата часу – довжина інтервалу. Зв'язок між компонентами реалізується на основі номерів значень, за номерами позицій у послідовності спостережень процесу. В остаточному вигляді моделі всі окремі компоненти (часткові процеси) пов'язуються з однаковими часовими відліками, що задають номери спостережень.

Структура СПМ недетермінованого процесу $F(t)$ має вигляд:

$$SpM(t) = SpMt(k)U \{ SpMi(SpMt(k)) \},$$

$$i = 1, \dots, q, (1)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

де t – координата часу; i – індекси вектору характеристик процесу моніторингу; k – порядковий номер рівня вибірки даних $SpM(k)$. Таким чином, СПМ (1) утворюються шляхом поєднання моделей окремих характеристик $F(t)$, розрахованих для моментів, визначених на основі номера рівня нечіткої моделі часу процесу $SpM(k)$.

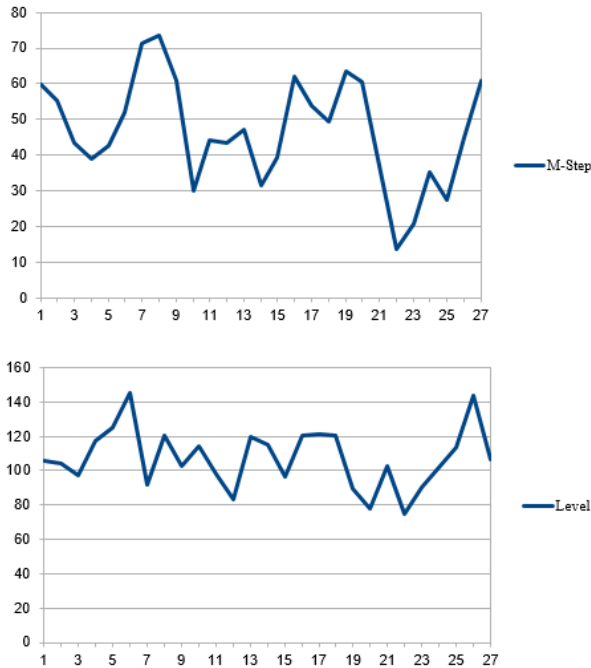


Рис. 1. Покрокове моделювання інтервалів (Step) та рівнів (Level) показника цукру процесу моніторингу реабілітації хворого

Fig. 1. Step-by-step modeling of intervals (Step) and levels (Level) of the sugar indicator in the process of monitoring the patient's rehabilitation

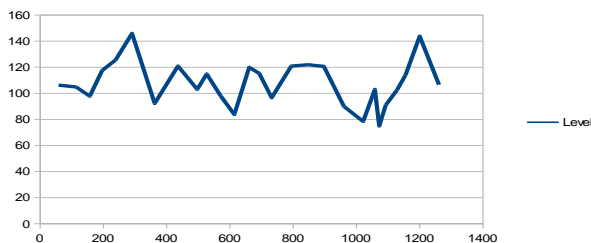


Рис. 2. Рівень цукру за сепарабельною моделлю СПМ (1) процесу клінічного моніторингу

Fig. 2. Glucose level according to the separable SPM model (1) of the clinical monitoring process

На рис. 1, 2 наведені результати моделювання засобами СПМ моніторингу процесу реабілітації хворого на діабет [6]. На рис. 1 зверху показане покрокове моделювання інтервалів (Step), а знизу – відповідні рівні (Level) показника цукру. Рівень цукру за СПМ процесу клінічного моніторингу демонструє рис. 2, коли рівні показників розміщені в часових позиціях номерів k . Модель рис. 2 відтворює процес клінічного моніторингу пацієнта за нерівномірних інтервалів контролю з похибкою до 5 %, що можна вважати достатнім для забезпечення встановлених вимог щодо оцінки стану хворого [4, 6].

У загальному випадку моделі CFTS формують подібно до FTS, але в кожному правилі містяться всі координати (метричні характеристики) досліджуваного процесу. Тут часова складова (значення інтервалів) також присутня нарівні з усіма іншими властивостями процесу. Моделі CFTS можна розглядати як певне узагальнення багатовимірних нечітких часових рядів [13], де передбачено використання m -факторів процесу з одним основним результатом вихідним параметром. У нашій моделі CFTS, спеціалізованій для процесів зі змінним інтервалом спостережень, враховано характерні для моніторингу процесів реабілітації властивості [5, 6].

Моделі CFTS структурно класифікують і розрізняють за порядком кількості рівнів рядів n , на основі яких будують правила, що відповідає моделям FTS, а також кількості метричних характеристик процесу m . З урахуванням зазначеного вище можлива така класифікація CFTS – $CmFTSn$. Тоді перший порядок $C1FTS1$ буде представлений як CFTS. Процеси з характеристиками $m=2$ і $n=1$ позначають як $C2FTS$, а разі $m=2$ і $n=2$ – як $C2FTS2$.

Результати

Для визначення моделей та скорочення тексту будемо використовувати стандартні форми подання та процедури моделювання FTS, вказуючи лише відмінності властивостей моделей $CmFTSn$. Пояснимо основні процедури формування, а також алгоритми аналізу комбінованих моделей, насамперед з прикладу CFTS, який відповідає одновимірному процесу $P_V(t)$ зі змінним інтервалом виконання вимірів.

Далі формують правила CFTS з урахуванням таких положень. Моделі CFTS складаються зі всіх відносин між компонентами процесу $P_V(t)$ у формі послідовностей $D_V(k)$, безпосередньо узагальнюючи структури стандартних правил моделювання FTS [8, 13, 17]. Е них для процесу $F(t)$ і моделей відносин першого порядку $R(t, t-1)$ щодо моделей першого порядку $F(t-1), F(t-2), \dots, F(t-n)$ має місце відношення n -го порядку:

$$F(t-1), F(t-2), \dots, F(t-n) \rightarrow F(t) \quad (2)$$

У разі моделювання багатовимірних процесів $P(t)$ з перемінним кроком виміру (для випадку $m=2, n=1$) модель CFTS будемо представляти в такому вигляді:

$$\begin{aligned} R(V, T) &= \{R_V(V, V); R_T(T, T); \\ R_{V_1}(V * V, V); R_{TV}(T * V, T); R_{VT}(T * V, V); \\ R_{V_2}(T * T, V * V, V); R_{T_2}(T * T, V * V, T)\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Компоненти (3) $R_V(V, V)$, $R_T(T, T)$ не мають зв'язків із попередніми етапами, мають «нульовий» порядок, порядок інших відношень (3) визначають числом попередніх етапів, врахованих моделлю, відповідно FTS (2).

У відносинах (3) зв'язок між рівнями встановлюють за допомогою індексів $\langle k \rangle$. За рахунок безпосереднього обліку за (3) окремих або часткових підпроцесів моделі $P(t)$ досягається можливість більш повного і точного подання результатів моделювання. Зазначимо, що у (3) моделі нечітких відношень $R_{TV}(T * V, T)$; $R_{VT}(T * V, V)$ мають на меті представлення зв'язків $(\Delta T_k, \Delta V_k \rightarrow \Delta T_{k+1}(I))$ також $(\Delta T_k, \Delta V_k \rightarrow \Delta V_{k+1}(II))$. Структуру відповідних реляційних таблиць дає табл. 1, де

$$Z_i = \begin{cases} \tilde{T}_q, \text{ моделі (I);} \\ \tilde{V}_r, \text{ моделі (II).} \end{cases}$$

Структури відношень, представлені в табл. 1, однакові, але значення Z_i побудовані за даними для ΔT , (модель I) або за даними для ΔV (модель II). У змішаних відношеннях $R_{TV}(T * V, T)$; $R_{VT}(T * V, V)$ значення прогнозованих показників визначають за рахунок пе-

ревірки всіх величин вихідних даних для $\{T, V\}$, що відповідають номерам рівня $\langle k \rangle$ як моделі наступного кроку для показників процесу [8, 10].

Таблиця 1

Структура змішаних відношень $R_{VT}(T * V, T)$; $R_{VT}(T * V, V)$ (час/показник)

Table 1

Structure of mixed relations $R_{VT}(T * V, T)$; $R_{VT}(T * V, V)$ (time/indicator)

ΔV	\tilde{V}_1	\tilde{V}_2	\tilde{V}_3	\tilde{V}_4	\tilde{V}_5
T_1	Z_1	Z_5	Z_2	Z_5	Z_3
T_2	Z_3		
T_3					
T_4			
T_5	Z_3	Z_4	Z_1	Z_5	Z_2

Реляційні відношення другого порядку визначають зв'язки процесу:

$$R_v : \tilde{T}_{i1}, \tilde{T}_{i2}, \tilde{V}_{j1}, \tilde{V}_{j2} \rightarrow V_{iq} (q \in \{1, 2, 3\});$$

$$R_v : \tilde{T}_{i1}, \tilde{T}_{i2}, \tilde{V}_{j1}, \tilde{V}_{j2} \rightarrow T_{ip} (p \in \{1, 2, 3\});$$

$$r_{i_1 i_2 j_1 j_2} = \begin{cases} \tilde{T}_i, \text{ для } R_t(x); \\ \tilde{V}_i, \text{ для } R_v(x). \end{cases} \quad (4)$$

Під час розрахунків оцінок контрольованих показників нечітких реляційних моделей, представлених нечіткими відношеннями (3)–(4), для дискретних таблиць використовують метод центра ваги (5) [13, 17]:

$$B(S_j)^* = \frac{\sum B_k * \mu_k}{\sum \mu_k}. \quad (5)$$

Одновимірні моделі FTS задають правила виду (2). У [13] для представлення багатопараметричних процесів, які мають $\langle k \rangle$ вхідних і один результуючий параметр, наведені наступні моделі (6) і (7). При цьому модель (7) представляє структуру m -факторної моделі k -ого порядку.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Якщо

$$\begin{aligned} (X_1 = x_1, Y_1 = y_1), (X_2 = x_2, Y_2 = y_2), \dots, \\ (X_k = x_k, Y_k = y_k) \rightarrow (X_{k+1} = x_{k+1}). \end{aligned} \quad (6)$$

Схожим чином можна визначити m -факторний ($i = 1, 2, \dots, m$) та нечіткий часовий ряд k -ого порядку ($j = 1, 2, \dots, k$) як:

$$\begin{aligned} \text{If } (X_{11} = x_{11}, X_{12} = x_{12}, \dots, X_{1k} = x_{1k}), \\ (X_{21} = x_{21}, X_{22} = x_{22}, \dots, X_{2k} = x_{2k}), \dots, \\ (X_{m1} = x_{m1}, X_{m2} = x_{m2}, \dots, X_{mk} = x_{mk}), \\ (X_{m+1,k+1} = x_{m+1,k+1}), \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (7)$$

Під час досліджень процесу FTS (6) для m -факторної моделі n -ого порядку була запропонована модель виду:

$$\begin{aligned} \text{If } (F_1(t-n), F_2(t-n), \dots, F_m(t-n)), \dots, \\ (F_1(t-2), F_2(t-2), \dots, F_m(t-2)), \\ (F_1(t-1), F_2(t-1), \dots, F_m(t-1)) \rightarrow F(t). \end{aligned} \quad (8)$$

У (8) $F_1(t)$ називають головним/первинним фактором, а $F_2(t), \dots, F_m(t)$ – другорядні фактори нечіткої часової послідовності. Далі для представлення процесів із багатьма змінними мультимоделями MFTS визначимо:

$$\begin{aligned} SF^n(t) = F(t-n), \dots, F(t-1); \\ SF_u^{(n)} \rightarrow F_u(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Мультимодель FTS, MFTS процесів n -го порядку з $\langle m \rangle$ компонентами має вигляд:

$$SF_1^n, SF_2^n, \dots, SF_m^n \rightarrow \bigcup_u F_u(t). \quad (10)$$

Загальна схема алгоритмів розрахунків відповідно до моделі (10) представлена в [15].

У статті розглянуто приклад моделювання та моніторингу процесів реабілітації хворих на цукровий діабет з $\langle m \rangle = 3$, коли компонентами $F_u(t)$ є: u_1 – рівень цукру (S), u_2 – інтервал між спостереженнями (T), u_3 – показник артеріального тиску (P). Сформульована модель процесів реабілітації також індивідуальна для кожного пацієнта та призначена для оцінки прогнозу інтервалу $\langle T \rangle$ до наступного контролю (можливо декілька змінних кроків) та очікуваних при цьому показників (S). Показник (P) є вторинним, факультативним.

Комплексні/комбіновані нечіткі мультимодели таких процесів мають вигляд:

$$\begin{aligned} \bigcup_u F_u(t) \leftarrow \{SF_s^{n_s}(t-n_s) \cup SF_T^{n_T}(t-n_T)\} \cup \\ SF_p^{n_p}(t-n_p) = \bigcup_u SF_u^{n_u}(t-n_u). \end{aligned} \quad (11)$$

В (11) $\langle t \rangle$ – порядковий номер виміру процесів. Визначивши $n_m = \max\{n_u\}$, отримуємо категорію моделей (11): $C_m(3)FTSMn_m$, де знак «М» вказує на можливість використання вимог марківських процесів [18].

Наведемо далі числовий приклад, який пояснює зазначені властивості CFTS у формі (11). Як початкові дані необхідно визначити трійки значень процесу реабілітації за кроками (табл. 2): рівень цукру $V - (u_1(s))$, інтервал між спостереженнями $T - (u_2(\tau))$, показник тиску крові $P - (u_3(p))$; процес $F = (V, T, P)$. Значення параметрів (табл. 2) V, T, P нормовані певним чином, безрозмірні.

Таблиця 2

Представлення процесу з нерівномірним кроком (T)

Table 2

Representation of the process with uneven pitch (T)

X/№	0	1	2	3	4	5	6	7	8
T	6	7	10	5	8	15	9	7	12
V	12	16	18	15	21	11	17	19	13
P	10	14	12	18	22	6	9	3	13

Моделювання за методом CFTS. Для моделювання процесу $F = (V, T, P)$ відповідно до методів FTS передбачені такі процедури: визначити області варіювання параметрів (табл. 1); обрати для кожної змінної число квантилів (відповідно до табл. 2, $T1 - T5$), на які розділяються діапазони варіювання; обрати вид та характеристики термів (табл. 2) – трикутні НВ; перейти до нечітких моделей вихідних даних (табл. 2), тобто виконати фазифікацію даних (табл. 1) з використанням термів (табл. 2), що представлено на рис. 3; сформулювати продукційні/реляційні моделі FTS процесу (табл. 1), які наведено далі; застосовувати ці моделі для аналізу та прогнозування $F = (V, T, P)$, $F = (*)$.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

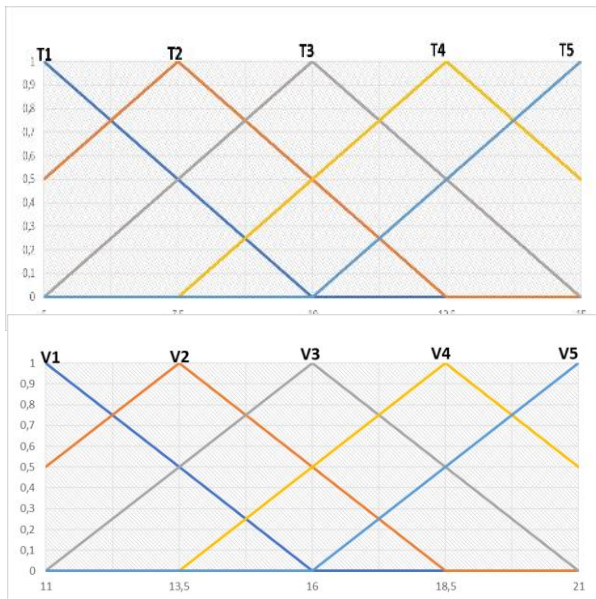


Рис. 3. Графіки моделей трикутних нечітких величин для показників T та V

Fig. 3. Diagrams of triangular fuzzy value models for T and V

Таблиця 3

Результати фазифікації елементів рядів процесу (табл. 2), ряди спостережень

Table 3

Results of phasing of process series elements (table 2), observation series

\tilde{T} :	$T1;$ 0,8	$T2;$ 0,9	$T3;1$	$T1;1$	$T2;$ 0,9	$T5;1$	$T3;$ 0,8	$T2;$ 0,9	$T4;$ 0,9
№	0	1	2	3	4	5	6	7	8
\tilde{V}	$V1;$ 0,8	$V3;1$	$V4;$ 0,9	$V3;$ 0,8	$V5;1$	$V1;1$	$V3;$ 0,8	$V4;$ 0,9	$V2;$ 0,9

Для всіх елементів процесу табл. 2 шляхом фазифікації визначені терми $T_k = (T_1, T_2, \dots)$, $V_j = (V_1, V_2, \dots)$ та відповідні їм коефіцієнти належності. Дані моделювання для (T, V) подано в табл. 3, де в порядку номерів спостережень указані терми процесу $F = (*)$ відповідно до табл. 2 і максимальний для $F = (*)$ ступінь належності до T_k та V_j ; дані параметра P оброблено й відображено так само.

Як елементи моделі (3) за побудованими рядами спостережень (рис. 4) можна визначити реляційні відношення $\{R_{TV}(T * V, T); R_{VT}(T * V, V)\}$, матриці переходів, табл. 4.

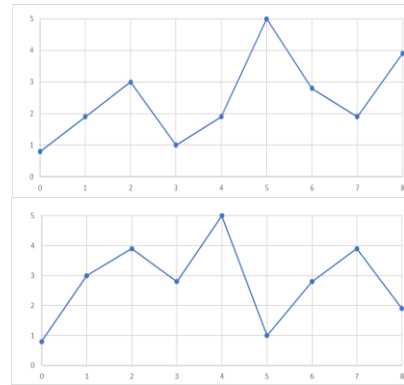


Рис. 4. Ряди спостережень параметрів T та V відповідно

Fig. 4. Series of observations of the parameters T and V , respectively

Для значень T матрицю переходів зображено в табл. 4 зверху, а матриця переходів для значень V зображена знизу.

Графіки рядів спостережень для відповідних значень T і V зображено на рис. 4.

Таблиця 4

Матриці переходів рядів для T (зверху) та V (знизу)

Table 4

Row transition matrices for T (top) and V (bottom)

$T_i \setminus V_i$	V1	V2	V3	V4	V5
T1	$T2(0,9)$	0	$T2(0,9)$	0	0
T2	0	0	$T3(1)$	$T4(0,9)$	$T5(1)$
T3	0	0	$T2(0,9)$	$T1(1)$	0
T4	0	0	0	0	0
T5	$T3(0,8)$	0	0	0	0
$V_i \setminus T_i$	T1	T2	T3	T4	T5
V1	$V3(1)$	0	0	0	$V3(0,8)$
V2	0	0	0	0	0
V3	$V5(1)$	$V4(0,8)$	$V4(0,9)$	0	0
V4	0	$V2(0,9)$	$V3(0,8)$	0	0
V5	0	$V1(1)$	0	0	0

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Порівняльні відмінності між FTS та CFTS (Combined/Complex Fuzzy Time Series) полягають у тому, що для першого методу будують окремі моделі для T і V , а розроблений метод комбінує ці процеси, тобто формує модель, де правила $F = (*)$ мають залежні між собою параметри. Наприклад, для рядів спостережень T і V (рис. 5) із використанням методів моделі FTS було б записано так (12) – (16):

$$\begin{aligned} T2 \rightarrow T4; T4 \rightarrow T4; T4 \rightarrow T1; T1 \rightarrow T2; \\ T2 \rightarrow T3; T3 \rightarrow T1; T1 \rightarrow T5; T2 \rightarrow T4 \quad (12) \\ \cup T3; T4 \rightarrow T4 \cup T1; T1 \rightarrow T2 \cup T5 \end{aligned}$$

Окрема одновимірна модель параметра V :

$$\begin{aligned} V3 \rightarrow V1; V1 \rightarrow V4; V4 \rightarrow V5; V5 \rightarrow V3; \\ V3 \rightarrow V3; V3 \rightarrow V2; V2 \rightarrow V4; V3 \rightarrow V1 \cup \quad (13) \\ V3 \cup V2; V1 \rightarrow V4; V4 \rightarrow V5; V5 \rightarrow V3; \\ V2 \rightarrow V4. \end{aligned}$$

У моделях праві частини правил для послідовностей $T1, T2, T4$ неоднозначні, як і для $V3$.

А для нового методу CFTS ці моделі, які містять дві змінні у відношенні, виглядають так:

$$\begin{aligned} (T2; \overline{V3}) \rightarrow \{T4; V1\}; (T4; V4) \rightarrow \{T1; V5\}; \\ (\overline{T2}; V3) \rightarrow \{T3; V3\}; (T1; V3) \rightarrow \{T5; V4\}; \quad (14) \\ (T4; V1) \rightarrow \{T4; V4\}; (T1; V5) \rightarrow \{T2; V3\}; \\ (T3; V3) \rightarrow \{T1; V2\}. \end{aligned}$$

Таким чином, конфліктів для термів $T2, T1, T4$ вже немає. Для відношення $(V3; T2)$ можна застосувати стандартні зв'язки термів: $(T2; V3) \rightarrow \{T4 \cup T3$ (комбінована модель для T); $V1 \cup V3$ (комбінована модель для V).

У разі потреби під час формування моделі процесу неоднозначність усувають за рахунок уведення ще одного параметра або за рахунок збільшення числа попередніх рівнів усіх моделей, як у FTS. Створення три вимірних нечітких моделей CFTS наведено в роботі далі.

Наведемо також одновимірну модель параметра P (рис. 6).

Для моделі FTS вона має вигляд:

– початкова форма:

$$\begin{aligned} P3 \rightarrow P3; P3 \rightarrow P4; P4 \rightarrow P5; P5 \rightarrow P2; \\ P2 \rightarrow P2; P2 \rightarrow P1; P2 \rightarrow P1; P1 \rightarrow P3; \quad (15) \end{aligned}$$

– заключна форма:

$$\begin{aligned} P2 \rightarrow P4 \cup P2; P3 \rightarrow P4 \cup P3; \\ P4 \rightarrow P5; P1 \rightarrow P3; P1 \rightarrow P3. \quad (16) \end{aligned}$$

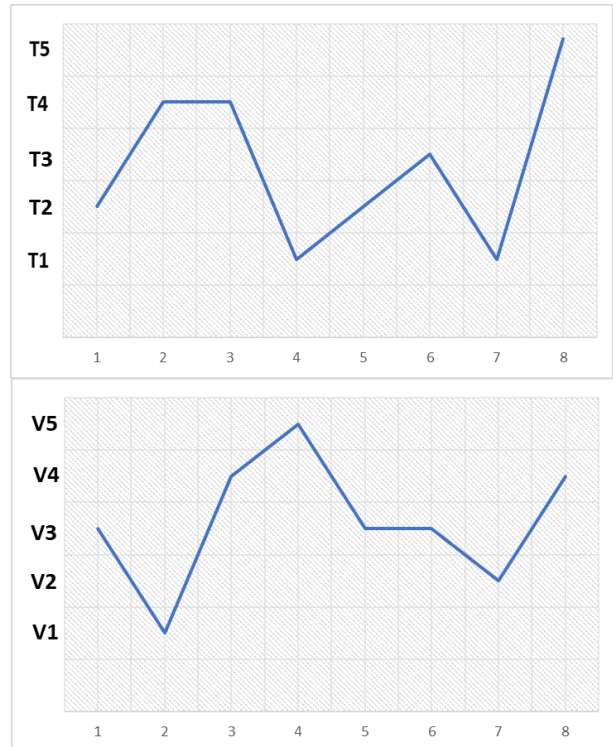


Рис. 5. Ряди спостережень двохвимірному процесу, число кватернів $m=5$. Окрема одновимірна модель параметра T

Fig. 5. Observation series of a two-dimensional process, number of quaternions $m=5$. A separate one-dimensional model of the parameter T

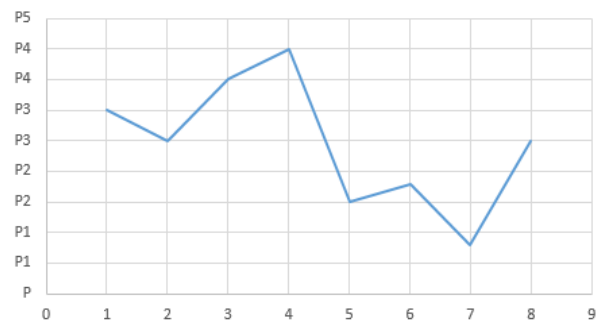


Рис. 6. Ряд спостережень показника тиску крові P

Fig. 6. A series of observations of blood pressure P

Наведемо тривимірну комбіновану нечітку модель CFTS для процесу $F = (*)$.

$$\begin{aligned}
& (T2, V3, P3) \rightarrow (T4, V1, P3); \\
& (T4, V1, P3) \rightarrow (T4, V4, P4); \\
& (T4, V4, P4) \rightarrow (T1, V5, P5) \rightarrow \\
& (T2, V3, P2); (T2, V3, P2) \rightarrow \\
& (T1, V5, P5); (T3, V3, P2); \\
& (T3, V3, P2) \rightarrow (T1, V2, P1); \\
& (T1, V2, P1) \rightarrow (T5, V4, P3). \quad (17)
\end{aligned}$$

Таким чином, для тривимірної моделі CFTS конфліктних продукційних правил немає, що забезпечено параметром P зі значеннями $P2$ та $P3$. Приклад показує, що індивідуальні процеси змінних, як моделі FTS, мають порядки $n=2$, а їх комбінована модель – порядок $n=1$. Із цього можна зробити висновок про достатність числа параметрів моделі процесу $F = (*)$, якщо також буде забезпечена необхідна точність результатів за контрольними розрахунками.

Наведемо також порівняльні структури реляційних (зокрема, табличних) моделей, які забезпечують реалізацію FTS та CFTS. У табл. 5 в разі наведено реляційні відношення в разі $m=2$, $n=2$.

При цьому верхня частина таблиці (символи виділені жирним шрифтом) відповідає новій структурі CFTS, коли одна змінна (A) відповідає $n=2$, а друга (B) має $n=1$. Навіть такий простий приклад реляційних моделей зв'язків за $m=2$, $n=2$ показує суттєве спрощення CFTS порівняно з моделями FTS.

У CFTS спрощуються моделі окремих відношень, зменшується їх кількість та потреби у формуванні результатів на основі компромісних конкуруючих параметрів. Наприклад, форми $V3 \rightarrow V1 \cup V3 \cup V2$, наведеної за текстом вище. Також спрощуються процедури скаляризації, дефазифікації, призначені для представлення результатів моделювання за CFTS дійсними числами. У табл. 5, позначено $C_{ke} = \{A_k; B_e\}$, де A_k, B_e – терми, трикутні НВ (рис. 5).

Щоб наочно показати безпосередні можливості поетапного нарощування структури (кількості параметрів) мультипараметричних моделей процесів як складової частини методу CFTS, на рис. 7 подано графік певного процесу реабілітації з перемінним кроком, який має порядок продукційних правил $n=1$ (для визначення наступного квантиля достатньо тільки поточного рівня даних).

Таблиця 5

Порівняльна структура реляційних відношень моделей FTS і CFTS

Table 5

Comparative structure of relational relations of the FTS and CFTS models

		A1			A2			A3		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
B₁	B₁					C_{pq}				
	B₂								C_{ji}	
	B₃			C_{rq}						
B₂	B₁									
	B₂									
	B₃				C_{ke}					
B₃	B₁								C_{ij}	
	B₂						C_{rs}			
	B₃		C_{iq}							

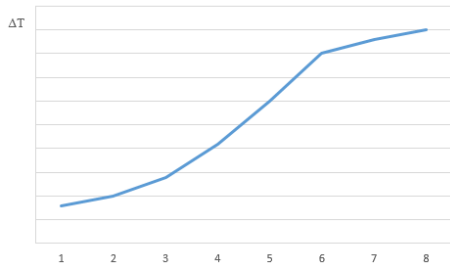


Рис. 7. Графік інтервалів між спостереженнями процесу реабілітації хворих на діабет

Fig. 7. Diagram of intervals between observations of the rehabilitation process of patients with diabetes

Разом із тим на рис. 5 наведені умовні процеси з $n > 1$.

Рис. 7 представляє властивість моделей CFTS щодо неоднорідності змінних за порядком передісторії правил, тобто «глибиною» їх передісторії. Додавання до моделі такого параметра не призведе до необхідності формування правил мульти-моделі зі значенням $n > 1$ за параметром рис. 7, навіть коли інші параметри будуть мати більше рівнів передісторії.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі вирішено наукове прикладне завдання щодо розвитку математичних моделей і методів нечіткого моделювання багатовимірних часових рядів для процесів моніторингу та реабілітації з урахуванням нерівномірних інтервалів між неплановими спостереженнями. Для розвитку моделей та процедур багатовимірних нечітких часових рядів враховано їх головні властивості системної єдності всіх компонентів. Відзначено основну системну ознаку моделей процесів, за якою в них нерівномірність інтервалів спостережень відображає контрольований процес, а не зовні встановлену форму процедур спостережень значень параметрів. У першу чергу такі моделі відповідають завданням аналізу і прогнозування процесів моніторингу та реабілітації, коли моменти подій задалегідь не фіксовані.

Розвиток математичних моделей забезпечується за рахунок формування комбінованих/комплексних багатовимірних нечітких моделей (CFTS).

Моделі CFTS формують подібно до FTS, разом із тим у кожному правилі містяться всі ко-

ординати, де часова характеристика (значення інтервалів) також присутня нарівні з усіма іншими властивостями процесу. Моделі CFTS представляють певне узагальнення багатовимірних нечітких часових рядів [13], які визначають m -факторів процесу з одним основним вихідним параметром. Запропоновані в роботі комплексі/комбіновані нечіткі мульти-моделі вигляду (11) мають такі формальні відмінності від раніше представлених у науковій літературі [10–14].

У моделях CFTS різні компоненти мульти-параметрів можуть мати неоднаковий порядок, кількість рівнів передісторії, окремі параметри моделей можуть вимірюватися різними типами даних та формами невизначеності (дійсні числа, нечіткі величини, коефіцієнти упевненості, ін.). Вони безпосередньо призначені для реалізації процесів із перемінними часовими інтервалами спостережень як властивістю процесів.

Наведено приклад застосування комплексних моделей CFTS для моделювання і моніторингу процесу прогнозування даних реабілітації хворих на діабет, який демонструє відмінності та ефективність цих моделей.

Практична значимість роботи визначається формуванням комплексних CFTS, які забезпечують значні можливості нечіткого моделювання багатовимірних ЧР для процесів моніторингу та реабілітації з нерівномірними інтервалами між спостереженнями. Відзначено суттєві власні ознаки процесів моніторингу та реабілітації за даними спостережень у разі нерівномірних інтервалів спостережень, що потребує подальшого розвитку моделей FTS, у тому числі шляхом створення комбінованих/комплексних CFTS.

Практичне значення моделей представлення недетермінованих процесів як CFTS також визначається можливостями їх подальшого застосування разом із відомими підходами для умов змінного кроку спостережень – різноманітні алгоритми можуть бути використані для дослідження та вдосконалення алгоритмів CFTS.

Висновки

У статті на основі результатів аналізу наукових публікацій встановлено, що сьогодні проблема досліджень із моделювання процесів,

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

представлених багатовимірними часовими рядами спостережень, є однією з найбільш актуальних. Також показано, що завдання моделювання та аналізу процесів моніторингу і реабілітації за даними спостережень у разі нерівномірних інтервалів спостережень має власні ознаки і потребує розвитку та вдосконалення комбінованих багатовимірних нечітких моделей. Особливість зазначених процесів полягає в тому, що нерівномірні інтервали спостережень, як інші параметри, відображають саме контрольований процес, а не зовні встановлену форму спостережень.

Під час розвитку моделей та процедур багатовимірних нечітких часових рядів було враховано головні властивості цих процесів та сформувано комплексні багатовимірні нечіткі моделі CFTS. У CFTS компоненти мультипараметрів можуть мати не однаковий порядок (передісторію), окремі параметри можуть бути даними різних типів і форм невизначеності. Запропоновано поетапну процедуру формування багатовимірних нечітких CFTS.

До моделей представлення процесів CFTS в подальшому можна застосовувати відомі під-

ходи (чисельні зі своїми наборами алгоритмів та засобів) для умов змінного кроку вимірювань (спостережень). Також для дослідження та вдосконалення CFTS можна використовувати різноманітні алгоритми.

Подано приклад моделювання за CFTS для процесу реабілітації хворих на діабет з параметрами рівень цукру, інтервал між спостереженнями, показник тиску крові. Для цього процесу показано, як формують CFTS, що не має конфліктних продукційних правил та забезпечує необхідну точність результатів (за контрольними розрахунками). При цьому також спрощують моделі відношень, зменшують їх кількість та потреби у формуванні результатів на основі компромісних конкуруючих параметрів.

Для подальшого розвитку моделей CFTS представляють значний теоретичний і прикладний інтерес питання щодо визначення алгоритмів та процедур моделювання і прогнозування, коли мультипараметри можуть мати неоднаковий порядок передісторії, вимірюються різними типами даних та мають різні форми представлення невизначеності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жуковицький І. В., Скалозуб В. В., Устенко А. Б. *Інтелектуальні засоби управління парками технічних систем залізничного транспорту*: монографія. Дніпро, Вид-во «Стандарт – Сервіс», 2018. 190 с.
2. Кислова О. М. Великі дані в контексті дослідження проблем сучасного суспільства. *Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія «Соціологічні дослідження сучасного суспільства: методологія, теорія, методи»*. 2019. Вип. 42. С. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.26565/2227-6521-2019-42-06>
3. Олещенко Л. М. Технології Big Data аналітики в розподілених системах обчислень. *Проблеми інформатизації та управління*. 2017. Т. 4, № 60. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.4.12821>
4. Скалозуб В. В., Білий Б. Б., Галабут О. О., Мурашов О. В. Методи інтелектуального моделювання процесів з перемінним інтервалом спостережень та конструктивного упорядкування «з вагою». *Системні технології*. 2020. Вип. 3 (128). С. 127–143. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-128-2020-12>
5. Скалозуб В. В., Горячкін В. М., Мурашов О. В. Комплексні моделі упорядкування мультипослідовностей з нечіткими параметрами. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. Вип. 2 (92). С. 135–150. DOI: [10.15802/stp2021/237291](https://doi.org/10.15802/stp2021/237291)
6. Скалозуб В. В., Мурашов О. В. Моделювання даних процесів моніторингу при нерівномірних і нечітких інтервалах спостережень. *«Системні технології»*. 2020. Вип. 4 (135). С. 135–148. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-14>
7. Шишак А. В., Пупена О. М. На шляху до Індустрії 4.0: інтеграція існуючих АСУТП з хмарними сервісами. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2018. Vol. 10. Iss. 1. С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i1.878>
8. Abo El Nasr M. M. S. Fuzzy Time Series Forecasting: Chen, Markov Chain and Cheng Models. *Journal of Alexandria University for Administrative Sciences*. 2023. Vol. 60, No. 2. P. 33–45. DOI: <https://doi.org/10.21608/acj.2023.294123>
9. Arnita A., Afnisah N., Marpaung F. A Comparison of the Fuzzy Time Series Methods of Chen, Cheng and Markov Chain in Predicting Rainfall in Medan. *Journal of Physics: Conference Serie*. 2020. Vol. 1462. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1462/1/012044>

10. Bitencourt H. V., Guimaraes F. G. High-dimensional Multivariate Time Series Forecasting in IoT Applications using Embedding Non-stationary Fuzzy Time Series. *2021 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)* (Temuco, 02-04 Nov. 2021). Temuco, 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/la-cci48322.2021.9769792>
11. Bose M., Mali K. Designing fuzzy time series forecasting models: A survey. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2019. Vol. 111. P. 78–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.05.002>
12. Bose M., Mali K. Forecasting with Multivariate Fuzzy Time Series: A Statistical Approach. *Machine Intelligence and Signal Processing. MISP 2019: Machine Intelligence and Signal Processing*. 2020. Vol. 1085. P. 247–257. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1366-4_20
13. Chou M.-T. Fuzzy Forecast Based on Fuzzy Time Series. *Time Series Analysis – Data, Methods, and Applications*. 2019. P. 1–13. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82843>
14. Lucas P. O., Orang O., Silva P. C. L., Mendes E. M. A. M., Guimarães F. G. A Tutorial on Fuzzy Time Series Forecasting Models: Recent Advances and Challenges. *Learning and Nonlinear Models*. 2022. Vol. 19. P. 29–50. DOI: <https://doi.org/10.21528/lnlm-vol19-no2-art3>
15. Pinto A. C. V., Fernandes T. E., Silva P. C. L., Guimarães F. G., Wagner C., Pestana de Aguiar, E. Interval type-2 fuzzy set based time series forecasting using a data-driven partitioning approach. *Evolving Systems*. 2022. Vol. 13. P. 703–721. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12530-022-09452-2>
16. Sarica B., Eğrioğlu E., Aşıkil B. A new hybrid method for time series forecasting: AR–ANFIS. *Neural Comput & Applic*. 2018. Vol. 29. P. 749–760. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2475-5>
17. Wu H., Long H., Wang Y., Wang Y. Stock index forecasting: A new fuzzy time series forecasting method. *Journal of forecasting*. 2021. Vol. 40. Iss. 4. P. 653–666. DOI: <https://doi.org/10.1002/for.2734>
18. Zaenurrohman, Hariyanto S., Udjiani T. Fuzzy time series Markov Chain and Fuzzy time series Chen & Hsu for forecasting. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1943 Iss. 1. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1943/1/012128>

V. V. SKALOZUB^{1*}, V. M. HORIACHKIN^{2*}, I. V. KLYMENKO^{3*}, O. V. MURASHOV^{4*}

^{1*}Dep. «Computer and Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail skalozub.v.v@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{2*}Dep. «Computer and Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

^{3*}Dep. «Computer and Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail i.v.klymenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-5149-3974

^{4*}Dep. «Computer and Information Technology», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail al.dp.ua@gmail.com, ORCID 0000-0003-1815-6508

Complex Multidimensional Fuzzy Models of Monitoring and Rehabilitation Processes for Patients with Uneven Observation Interval

Purpose. The work is devoted to the development of mathematical models and methods of fuzzy modeling of multidimensional time series (CDM) for the processes of monitoring and rehabilitation of patients with uneven intervals between observations. CDM takes into account the system properties and unity of the components of the studied processes by forming combined/complex multidimensional fuzzy models (CFTS). **Methodology.** The implementation of CFTS models takes into account the intrinsic features of these processes. The peculiarity of CFTS is that uneven intervals of observations, as well as other parameters, reflect the systemic unity of the controlled process, rather than the externally established form of observations, regulations. SFTS generalize models of multidimensional fuzzy time series of order n with m input parameters and one output parameter, i.e., different components may have different order of prehistory n , individual parameters may be measured by different types of data and forms of uncertainty. **Findings.** The article presents a comprehensive improved structure of CFTS models of order n with m input and one output parameter, which is adapted to the properties of monitoring and rehabilitation processes with uneven observation intervals. To form the SFTS, a step-by-step procedure is proposed that allows forming the composition of parameters. An example of modeling the process of rehabilitation of patients with diabetes based on the SFTS is presented, which demonstrates its differences and effectiveness. The comparative properties of SFTS and FTS models are presented. **Originality.** The development of CDM models and methods for monitoring and rehabilitation processes at uneven intervals is obtained, and complex SFTS models are formed. The difference be-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

tween the SFTS is that the component of uneven intervals is represented as other multiparameters m , which can have different order of prehistory n , as well as different types of data and forms of uncertainty. A procedure for the step-by-step formation of the composition of the parameters of SFTS models is proposed. **Practical value.** SFTS models ensure the implementation of multiparameter monitoring and rehabilitation processes with uneven observation intervals, simplify the structure and reduce the number of relational relations, and eliminate the conflict of product rules in case of ensuring the required accuracy of results. The example of modeling the rehabilitation process for diabetics with such parameters as sugar level, interval between observations, and blood pressure has confirmed the reliability and practical significance of CFTS models.

Keywords: multiparametric processes; monitoring; rehabilitation; uneven interval; complex fuzzy models; analysis and forecasting

REFERENCES

1. Zhukovytskyi, I. V., Skalozub, V. V., & Ustenko, A. B. (2018). *Intelektualni zasoby upravlinnya parkamy texnichnyx system zaliznychnogo transportu: monografiya*. Dnipro, Vyd-vo «Standart-Servis». (in Ukrainian)
2. Kyslova, O. (2019). Big Data in the Context of Studying Problems of Modern Society. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. *Series "Sociological Studies of Contemporary Society: Methodology, Theory, methods"*, 42, 59-68. DOI: <https://doi.org/10.26565/2227-6521-2019-42-06> (in Ukrainian)
3. Oleshchenko, L. M. (2017). Technologies of Big Data Analytics in Distributed Computing Systems. *Problems of Informatization and Management*, 4(60), 57-63. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.4.12821> (in Ukrainian)
4. Skalozub, V., Biliy, B., Galabut, A., & Murashov, O. (2020). Models and procedures of intellectual technology for formation multi-group trains and streamline the heterogeneous sequences of orders. *System technologies*, 3(128), 127-143. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-128-2020-12> (in Ukrainian)
5. Skalozub, V. V., Horiachkin, V. M., & Murachov, O. V. (2021). Complex Models of Ordering Multi-Sequences with Fuzzy Parameters. *Science and Transport Progress*, 2(92), 50-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/237291> (in Ukrainian)
6. Skalozub, V., & Murashov, O. (2021). Modeling of monitoring processes with uneven and fuzzy observation intervals. *System Technologies*, 4(135), 135-148. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-14> (in Ukrainian)
7. Shyshak, A. V., & Pupena, O. M. (2018). Na shliakhu do Industrii 4.0: intehratsiia isnuichykh ASUTP z khmarnymy servisamy // *Automation of Technological and Business Processes*, 10(1). P. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i1.878> (in Ukrainian)
8. Abo El Nasr M. M. S. Fuzzy Time Series Forecasting: Chen, Markov Chain and Cheng Models. *Journal of Alexandria University for Administrative Sciences*, 60(2), 33-45. DOI: <https://doi.org/10.21608/acj.2023.294123> (in English)
9. Arnita A., Afnisah, N., & Marpaung, F. (2020). A Comparison of The Fuzzy Time Series Methods of Chen, Cheng and Markov Chain in Predicting Rainfall in Medan. *Journal of Physics: Conference Series*, 1462(1), 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1462/1/012044> (in English)
10. Bitencourt, H. V., & Guimaraes, F. G. (2021, Nov.). High-dimensional Multivariate Time Series Forecasting in IoT Applications using Embedding Non-stationary Fuzzy Time Series. *2021 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)* (pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1109/la-cci48322.2021.9769792> (in English)
11. Bose, M., & Mali, K. (2019). Designing fuzzy time series forecasting models: A survey. *International Journal of Approximate Reasoning*, 111, 78-99. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.05.002> (in English)
12. Bose, M., & Mali, K. (2019). Forecasting with Multivariate Fuzzy Time Series: A Statistical Approach. *MISP 2019: Machine Intelligence and Signal Processing*, 1085, 247-257. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1366-4_20 (in English)
13. Chou, M.-T. (2019). Fuzzy Forecast Based on Fuzzy Time Series. *Time Series Analysis – Data, Methods, and Applications*, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.82843> (in English)
14. Lucas, P. O., Orang, O., Silva, P. C. L., Mendes, E. M. A. M., & Guimarães, F. G. (2022). A Tutorial on Fuzzy Time Series Forecasting Models: Recent Advances and Challenges. *Learning and Nonlinear Models*, 19(2), 29-50. DOI: <https://doi.org/10.21528/lnlm-vol19-no2-art3> (in English)
15. Pinto, A. C. V., Fernandes, T. E., Silva, P. C. L., Guimarães, F. G., Wagner, C., & Pestana de Aguiar, E. (2022). Interval type-2 fuzzy set based time series forecasting using a data-driven partitioning approach. *Evolving Systems*, 13(5), 703-721. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12530-022-09452-2> (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

16. Sarica, B., Eğrioğlu, E., & Aşıkil, B. (2018). A new hybrid method for time series forecasting: AR–ANFIS. *Neural Comput & Applic*, 29, 749-760. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2475-5> (in English)
17. Wu, H., Long, H., Wang, Y., & Wang, Y. (2020). Stock index forecasting: A new fuzzy time series forecasting method. *Journal of Forecasting*, 40(4), 653-666. DOI: <https://doi.org/10.1002/for.2734> (in English)
18. Zaenurrohman, Hariyanto, S., & Udjiani, T. (2021). Fuzzy time series Markov Chain and Fuzzy time series Chen & Hsu for forecasting. *Journal of Physics: Conference Series*, 1943(1), 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1943/1/012128> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.05.2023

Прийнята до друку: 29.09.2023

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.867.52

В. М. БОГОМАЗ^{1*}, П. Г. АНОФРІЄВ²

^{1*}Каф. військової підготовки спеціалістів Держспецтрансслужби, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 472 14 04, ел. пошта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

²Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (068) 411 07 23, ел. пошта anofrievp@ukr.net, ORCID 0000-0001-7997-3523

Дослідження впливу проєктних параметрів вібраційного конвеєра на його технічні характеристики

Мета. Дослідження спрямовано на: визначення характеру впливу проєктних даних на технічні характеристики двотрубного вібраційного конвеєра з ексцентриковим приводом, зокрема діаметр труби та потужність приводу; побудову аналітичних залежностей зазначених величин від проєктних характеристик: типу та властивостей вантажу, довжини транспортування, продуктивності; проведення графічного аналізу впливу.

Методика. Для досягнення мети використано алгоритми розрахунків, представлені в сучасній технічній літературі, та проведено аналіз факторів і величин, які впливають на значення потужності приводу та діаметра труби. Установлено, що для визначення потужності приводу вібраційних конвеєрів необхідно провести детальний розрахунок, який включає: кутову швидкість конвеєра, частоту обертання ексцентрикового вала, швидкість транспортування матеріалу, внутрішній діаметр труби, загальну масу коливальної системи, жорсткість пружної системи та параметри ресор, зусиль у шатуні у випадку зарезонансного режиму роботи та в період пуску. **Результати.** Для двотрубного вібраційного конвеєра, призначеного для транспортування свинцевого конгломерату, проведено графічний аналіз впливу довжини транспортування, продуктивності на величину потужності приводу та габаритні розміри труби. Установлено, що функція зміни діаметра труби від продуктивності є нелінійною зростаючою (у разі фіксованих інших параметрів), а величини потужності приводу від продуктивності – лінійною зростаючою. **Наукова новизна.** Автори вперше виконали дослідження залежності потужності приводу та діаметра труби двотрубного вібраційного конвеєра з ексцентриковим приводом на нижній трубі, побудували аналітичні залежності технічних характеристик (потужності та діаметра) від проєктних параметрів: продуктивності, довжини транспортування, типу та фізико-механічних властивостей транспортованого вантажу. Для конвеєра, який транспортує свинцевий агломерат, побудовано графічні залежності діаметра труби та потужності приводу від величини продуктивності та довжини конвеєра. **Практична значимість.** Використання побудованих залежностей дає можливість визначити загальний характер зміни вищезазначених технічних характеристик у разі варіювання проєктних параметрів, таких як продуктивність та довжина конвеєра. Запропоновані залежності можуть бути використані для швидкого визначення раціональної потужності приводу конвеєра за конкретних проєктних даних.

Ключові слова: вібраційний конвеєр; продуктивність; потужність; привід

Вступ

Хитні конвеєри належать до групи конвеєрів без тягового органу. Їх застосовують для транспортування насипних, рідше штучних вантажів, у горизонтальному та полого-похилому напрямках за порівняно невеликих відстаней

переміщення та продуктивності. Найбільш оптимальним застосуванням хитних конвеєрів є герметичне транспортування пилюватих, гарячих, отруйних, хімічно агресивних насипних вантажів в умовах повної ізоляції від навколишнього середовища.

МАШИНОБУДУВАННЯ

Основними публікаціями, які описують будову, конструктивні особливості, експлуатаційні та розрахункові параметри сучасних машин безперервного транспорту, є [1, 4–12, 14]. Аналіз публікацій показує, що для визначення потужності приводу вібраційних конвеєрів необхідно провести детальний розрахунок, який включає: кутову швидкість конвеєра, частоту обертання ексцентрикового вала, швидкість транспортування матеріалу, внутрішній діаметр труби, загальну масу коливальної системи, жорсткість пружної системи та параметри ресор, зусилля в шатуні в разі зарезонансного режиму роботи та в період пуску. Порядок проведення таких розрахунків детально описано в літературі, зокрема в роботах [4–6]. Але існують роботи, у яких наведено скорочені алгоритми розрахунку величини потужності приводу машин безперервного транспорту. У роботі [13] автори побудували аналітичні залежності потужності приводу пневмотранспортних установок. У роботі [2] запропоновано алгоритм прискореного розрахунку величини потужності стрічкового елеватора за заданих проектних характеристик. Робота [3] присвячена побудові залежності потужності стрічкових конвеєрів від його проектних величин.

Мета

Основною метою роботи є дослідження впливу проектних даних на технічні характеристики двотрубного вібраційного конвеєра, зокрема діаметр труби та потужність приводу, побудова аналітичних та графічних залежностей зазначених величин від проектних характеристик: типу та властивостей вантажу, довжини транспортування, продуктивності.

Методика

Вихідними даними для розрахунку вібраційного конвеєра є: продуктивність Π , т/год; довжина транспортування L , м; транспортований вантаж та його щільність ρ , т/м³; максимальна крупність кусків вантажу a_{\max} , мм.

Візьмемо для подальших досліджень двотрубний зрівноважений вібраційний конвеєр (рис. 1) з ексцентриковим приводом на нижній трубі. Такі конвеєри з ексцентриковим приво-

дом зазвичай працюють у резонансному режимі, коли частоти вимушених і власних коливань збігаються.

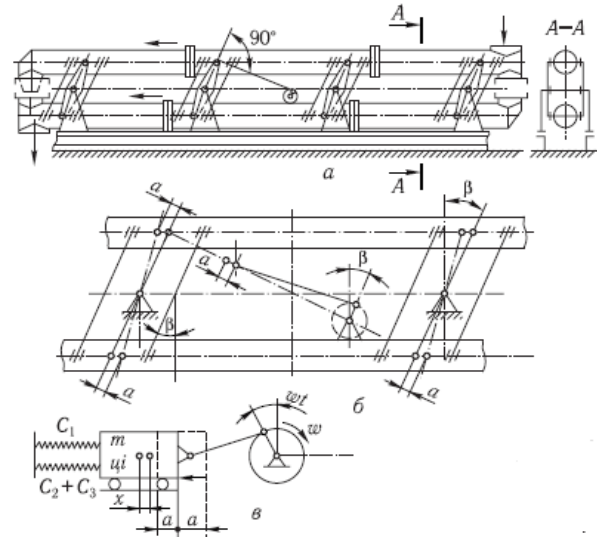


Рис. 1. Двотрубний вібраційний конвеєр:

a – схема конвеєра; *b* – схема приводу;

в – розрахункова схема

Fig. 1. Two-pipe vibrating conveyor:

a – conveyor scheme; *b* – drive scheme; *c* – design scheme

Коефіцієнт режиму роботи конвеєра беремо $\Gamma = 2$ (табл. 9.3 [4]), який у загальному вигляді можна записати так:

$$\Gamma = \frac{A\omega^2 \sin \beta_1}{g \cdot \cos \beta}, \quad (1)$$

де A – амплітуда коливань труби, м; ω – кутова швидкість ексцентрикового вала, рад/с; $\beta = 0$ – кут нахилу конвеєра; β_1 – кут напрямку коливань (кут між коромислом і перпендикуляром до труби): $\beta_1 = 20...25^\circ$ за $n \geq 1000$ об/хв; $\beta_1 = 30...35^\circ$ за $n < 1000$ об/хв; у середньому $\beta_1 = 30^\circ$.

Згідно з рекомендаціями (табл. 9.4 [4]) і досвідом експлуатації беремо амплітуду коливань труби A та радіус ексцентрика r .

Із формули (1) визначаємо кутову швидкість конвеєра:

$$\omega = \sqrt{\frac{g \cdot \Gamma \cdot \cos \beta}{A \sin \beta_1}}. \quad (2)$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

Частота обертання ексцентрикового вала:

$$n = \frac{30\omega}{\pi}. \quad (3)$$

Підставляючи (2) в (3), маємо:

$$n = \frac{30 \sqrt{\frac{g \cdot \Gamma \cdot \cos \beta}{A \sin \beta_1}}}{\pi} = 9,55 \sqrt{\frac{g \cdot \Gamma \cdot \cos \beta}{A \sin \beta_1}}. \quad (4)$$

Швидкість транспортування матеріалу визначаємо за формулою:

$$v = (k_1 \mp k_2 \sin \beta) A \omega \cos \beta_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\Gamma^2}}, \quad (5)$$

де k_1 та k_2 – дослідні коефіцієнти, які враховують фізико-механічні властивості транспортованих вантажів (табл. 9.5 [4]). Знаки «мінус» і «плюс» – відповідно для конвеєрів, що працюють на підйманні та опусканні.

Для горизонтального конвеєра а за формулою (5) маємо:

$$v = k_1 A \omega \cos \beta_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\Gamma^2}}. \quad (6)$$

Продуктивність двотрубного вібраційного конвеєра:

$$П = 2 \cdot 3600 A_T v \rho \psi, \quad (7)$$

де A_T – площа перерізу однієї труби, м²; $\psi = 0,5 \dots 0,6$ – коефіцієнт заповнення труби.

Із формули (7) внутрішній діаметр труби:

$$d = 2 \sqrt{\frac{П}{7200 \pi v \rho \psi}}. \quad (8)$$

За отриманим значенням обираємо d , товщина стінки δ .

Загальна вага коливальної частини (однієї труби) конвеєра:

$$m = m_T + \lambda m_B, \quad (9)$$

де m_T – вага однієї труби з закріпленими на ній вузлами; λ – дослідний коефіцієнт, який враховує вплив маси транспортованого вантажу на власну частоту коливань конвеєра, залежить від режиму його роботи і визначається за експери-

ментальним графіком (рис. 2) [4]; m_B – вага вантажу в одній трубі.

Вагу вантажу в одній трубі знаходимо за формулою:

$$m_B = m_q L = \frac{П L}{2 \cdot 3,6 v}. \quad (10)$$

Підставляючи (10) у (9), маємо:

$$m = m_T + \lambda m_B = m_T + \lambda \frac{П L}{7,2 v}. \quad (11)$$

Кутова власна частота коливань завантаженого конвеєра:

$$\omega = \sqrt{\frac{C}{m}}. \quad (12)$$

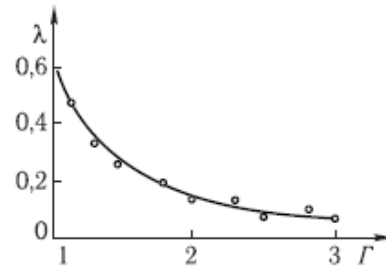


Рис. 2. Експериментальний графік $\lambda(\Gamma)$

Fig. 2. Experimental schedule $\lambda(\Gamma)$

Резонансний режим роботи конвеєра забезпечується за $\omega = \omega_0$.

Жорсткість пружної системи вібраційного конвеєра:

$$C = m \omega^2. \quad (13)$$

Підставляючи (11) у (13), маємо:

$$C = \left(m_T + \lambda \frac{П L}{7,2 v} \right) \omega^2. \quad (14)$$

Жорсткість пружної системи вібраційного конвеєра також знаходимо за залежністю:

$$C = C_1 + C_2 + C_3, \quad (15)$$

де C_1 – жорсткість ресор, Н/м; C_2 , C_3 – зведені жорсткості великих і малих гумометалевих шарнірів, Н/м, які визначаємо так:

$$C_2 = C_2' n, \quad (16)$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

де C'_2 – зведена жорсткість одного великого гумометалевого шарніра (за результатами експериментів $C'_2 = 4 \cdot 10^4$ Н/м [4]); n – кількість великих гумометалевих шарнірів (беремо $n = 32$);

$$C_3 = C'_3 n_1, \quad (17)$$

де C'_3 – зведена жорсткість одного малого гумометалевого шарніра (за результатами експериментів $C'_3 = 10^4$ Н/м [4]); n_1 – кількість великих гумометалевих шарнірів (беремо $n_1 = 64$).

Із формули (13) маємо:

$$C_1 = C - C_2 - C_3 = m\omega^2 - C'_2 n - C'_3 n_1. \quad (18)$$

Необхідна жорсткість однієї ресори:

$$C'_1 = \frac{C_1}{z_p}, \quad (19)$$

де $z_p = 256$ – кількість ресор.

Отже, із формули (19) маємо:

$$C'_1 = \frac{\left(m_T + \lambda \frac{III}{7,2v}\right)\omega^2 - C'_2 n - C'_3 n_1}{z_p}. \quad (20)$$

Жорсткість ресори:

$$C'_1 = \frac{Eb\delta^3}{(a_1 l)^3}, \quad (21)$$

де E – модуль пружності сталі, Па; $b = 0,1$ м – ширина ресори; δ – товщина ресори; $l = 0,39$ м – довжина робочої (вільної) частини ресори; a_1 – коефіцієнт збільшення робочої довжини ресори (за результатом дослідів $a_1 = 1,05$).

Товщина ресори:

$$\delta = a_1 l^3 \sqrt{\frac{\left(m_T + \lambda \frac{III}{7,2v}\right)\omega^2 - C'_2 n - C'_3 n_1}{Eb z_p}}. \quad (22)$$

Нормальні напруження від згину в ресорі в місці закріплення:

$$\sigma = \frac{6E\delta A k_3}{l^2}, \quad (23)$$

де $2A$ – розмах коливань, м; k_3 – коефіцієнт, який враховує жорсткість зарубки (за результатами дослідів $k_3 = 0,96$ для закріплення ресор із металевими прокладками між ними; $k_3 = 0,68$ – із гумовими прокладками між ресорами); $[\sigma_{-1}] = 98 \dots 118$ МПа – допустиме напруження за знакозмінного циклічного навантаження для ресор зі сталей 55С2 і 60С2Н2А.

Підставляючи (22) в (23), маємо:

$$\sigma = \frac{6EAk_3 a_1^3}{l} \sqrt{\frac{\left(m_T + \lambda \frac{III}{7,2v}\right)\omega^2 - C'_2 n - C'_3 n_1}{Eb z_p}}. \quad (24)$$

Власна частота коливань конвеєра:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\left(m_T + \lambda \frac{III}{7,2v}\right)\omega^2}{m_T}}, \quad (25)$$

де m_T – маса коливальної частини конвеєра без маси вантажу.

Зусилля в шатуні за резонансного режиму роботи конвеєра:

$$F_{ш} = rC \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) + \mu_0^2}, \quad (26)$$

де μ_0 – загальний коефіцієнт опору, який враховує внутрішнє тертя в пружних елементах, тертя в підшипниках приводу та опір переміщенню вантажу: $\mu_0 = 0,1$ – для сталевих пружних зв'язків.

Отже, залучаючи (26), маємо:

$$F_{ш} = r \left(m_T + \lambda \frac{III}{7,2v}\right)\omega^2.$$

$$\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\sqrt{\frac{\left(m_T + \lambda \frac{III}{7,2v}\right)\omega^2}{m_T}}}\right) + \mu_0^2}. \quad (27)$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

Зусилля в шатуні в період пуску за залежністю (26):

$$F_{\text{ш}} = r \left(m_{\text{T}} + \lambda \frac{\Pi L}{7,2v} \right) \omega^2 \sqrt{1 + \mu_0^2}. \quad (28)$$

Потужність електродвигуна (типу 4AP) з підвищеним пусковим моментом визначаємо за формулою:

– для конвеєрів $L \leq 10$ м:

$$P = \frac{c_{\text{T}} \Pi}{1000 \eta} \left(k_3 L + \frac{H}{0,367} \right); \quad (29)$$

– для конвеєрів $L > 10$ м:

$$P = \frac{c_{\text{T}} \Pi}{1000 \eta} \left(10k_3 + (L-10)k_4 + \frac{H}{0,367} \right), \quad (30)$$

де c_{T} – коефіцієнт транспортабельності: $c_{\text{T}} = 1$ – для зернистих і кускових вантажів (наприклад, піску, вугілля, шлаку, збіжжя); 1,5...2,0 – для порошко- і пилоподібних насипних вантажів (цементу, апатиту, недогарків); $\eta = 0,85...0,97$ – ККД привідного механізму; $k_3 = 4,5$ та $k_4 = 3,5$ – коефіцієнти питомої витрати потужності на транспортування 1 т вантажу на відстань 1 м (табл. 9.5 [4]); H – висота підняття вантажу, м.

Одномасові вібраційні конвеєри розраховують, як і двомасові; під час розрахунку враховуємо коливальну масу однієї труби (жолоба), маси прикріплених вузлів, транспортованого вантажу і вібратора.

Щоб одномасовий конвеєр із відцентровим приводом працював у зарезонансному режимі, потрібно, щоб загальна маса дебалансів була:

$$m_{\text{д}} \approx \frac{Am}{r_{\text{д}}}, \quad (31)$$

де m – коливальна маса, кг; $r_{\text{д}}$ – відстань між центром ваги дебалансів і віссю обертання, м.

Результати

Вихідними даними для розрахунку вібраційного конвеєра є: продуктивність $\Pi = 20...100$ т/год; довжина транспортування $L = 10...30$ м; транспортований вантаж – свинцевий агломерат (щільність $\rho = 2$ т/м³); макси-

мальна крупність кусків вантажу $a_{\text{max}} = 100$ мм.

Коефіцієнт режиму роботи конвеєра беремо $\Gamma = 2$ (табл. 3 [4]), який задовольняє як конвеєрам легкого й середнього типу, так і важкого типу.

Згідно з рекомендаціями табл.9.4 [4] і досвідом експлуатації, беремо амплітуду коливань труби $A = 4,0$ мм та радіус ексцентрика $r = 4,0$ мм.

Підставляючи (6) у (8), маємо внутрішній діаметр труби:

$$d = \sqrt{\frac{\Pi}{7200\pi k_1 A \sqrt{\frac{g \cdot \Gamma \cdot \cos \beta}{A \sin \beta_1}} \cos \beta_1 \sqrt{1 - \frac{1}{\Gamma^2} \rho \psi}}}. \quad (32)$$

За табл. 9.5 [4] $k_1 = 0,9$ для кускових вантажів.

Графічну залежність діаметра труби від величини продуктивності конвеєра $\Pi = 20...100$ т/год подано на рис. 3.

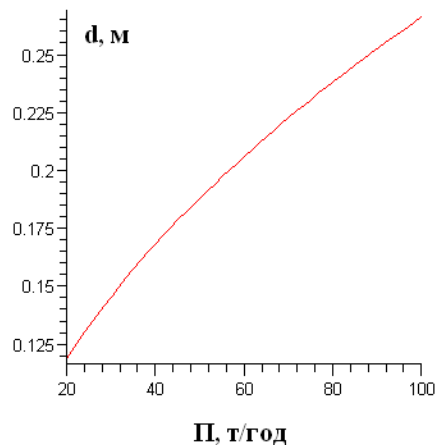


Рис. 3. Графічна залежність діаметра труби від величини продуктивності конвеєра $\Pi = 20...100$ т/год

Fig. 3. Graphical dependence of the pipe diameter on the conveyor capacity $\Pi = 20...100$ t/h

Графічну залежність потужності приводу двотрубного вібраційного конвеєра від продуктивності за $L > 10$ м зображено на рис. 4.

Графічну залежність потужності приводу двотрубного вібраційного конвеєра від продуктивності та довжини транспортування зображено на рис. 5.

МАШИНОБУДУВАННЯ

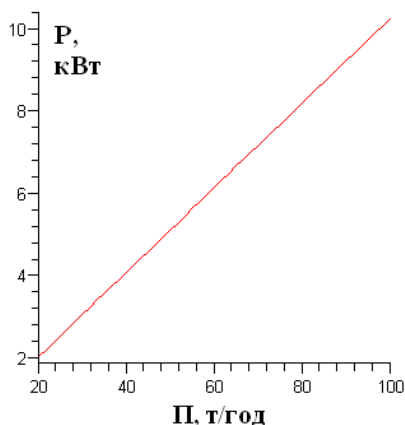


Рис. 4. Графічна залежність потужності приводу двотрубного вібраційного конвеєра від продуктивності за $L = 25$ м

Fig. 4. Graphical dependence of the drive power of a two-pipe vibrating conveyor on productivity at $L = 25$ m

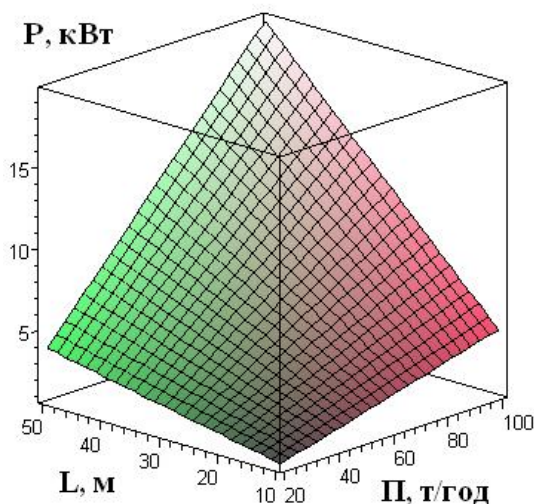


Рис. 5. Графічна залежність потужності приводу двотрубного вібраційного конвеєра від продуктивності та довжини транспортування

Fig. 5. Graphical dependence of the drive power of a two-pipe vibrating conveyor on the capacity and length of transportation

Наукова новизна та практична значимість

Виконано дослідження залежності потужності приводу та діаметра труби двотрубного вібраційного конвеєра з ексцентриковим приводом

на нижній трубі. Побудовано аналітичні залежності технічних характеристик (потужності та діаметра) від проектних параметрів: продуктивності, довжини транспортування, типу та фізико-механічних властивостей транспортованого вантажу. Для конкретного вантажу та типу конвеєра побудовано графічні залежності діаметра труби та потужності приводу від величини продуктивності та довжини конвеєра.

Використання побудованих залежностей дає можливість визначити загальний характер зміни вищезазначених технічних характеристик у разі варіювання проектних параметрів, таких як продуктивність і довжина конвеєра. Запропоновані залежності можуть бути використані для швидкого визначення раціональної потужності приводу конвеєра за конкретних проектних даних.

Висновки

Для двотрубного вібраційного конвеєра виконано:

- аналіз конструкції та сучасної методики розрахунку необхідної потужності приводу;
- аналіз факторів та величин, які впливають на значення потужності приводу та діаметру труби;
- побудовано аналітичну залежність для визначення діаметра труби за заданих проектних параметрів;
- побудовано аналітичну залежність для визначення потужності приводу вібраційних конвеєрів від типу вантажу, довжини транспортування, продуктивності у випадку фіксованих інших параметрів;
- графічний аналіз впливу довжини транспортування, продуктивності на величину потужності приводу та габаритні розміри труби.

Установлено, що функція зміни діаметра труби від продуктивності є нелінійною зростаючою (у разі фіксованих інших параметрів), а величини потужності приводу від продуктивності – лінійною зростаючою.

Для продовження дослідження доцільно побудувати алгоритм прискореного розрахунку потужності приводу за вихідними даними для проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Білостоцький В. О., Мазоренко Д. І., Тіщенко Л. М., Міняйло А. В., Бредихін В. В., Знайдюк В. Г., ... Харченко С. О. Атлас конструкцій підйомно-транспортних машин. Ч. 2. *Транспортуючі машини*. Харків : ХНТУСГ, 2009. 98 с.
2. Богомаз В. М. Аналіз впливу проектних характеристик елеватору на параметри його приводу. *В. Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 3 (57). С. 162–175. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46076>
3. Богомаз В. М. Дослідження залежності потужності приводу стрічкового конвеєра від його проектних параметрів. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 131–146. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61024>
4. Бондарєв В. С., Колісник Н. П., Дубинець О. І., Горбатенко Ю. П., Бондарєв С. В., Барабанов В. Я. *Підйомно-транспортні машини: розрахунки підймальних і транспортувальних машин* : підручник. Київ : Вища школа, 2009. 734 с.
5. Дереза О. О. *Машини безперервного транспорту* : методичний посібник. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет, 2016. 108 с.
6. Іванченко Ф. К. *Підйомно-транспортні машини*: підручник. Київ : Вища школа, 1993. 413 с.
7. *Транспортні системи електромеханічних комплексів*: конспект лекцій : навч. посіб. / уклад. С. В. Зайченко, В. А. Побігайло, В. Г. Дубовик. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 136 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48000/1/Transportni.pdf>
8. Шоловій Ю. П., Боровець В. М., Шенбор В. С. *Вивчення конструкції, основ розрахунку та дослідження вібраційного трубчастого конвеєра з електромагнітним приводом* : метод. вказівки. Львів : Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2005. 20 с.
9. Bortnowski P., Gładysiewicz L., Król R., Ozdoba M. Models of Transverse Vibration in Conveyor Belt Investigation and Analysis. *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 14. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144153>
10. Kozhushko, G. G., Lukashuk, M. D., Lukashuk, O. A. Conveyor Belt Vibrations. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. P. 837–844. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_97
11. Pihnastyi O., Khodusov V., Kozhevnikov G., Bondarenko T. Analysis of Dynamic Mechanic Belt Stresses of the Magistral Conveyor. *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 186–195. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_19
12. Pukach P., Sokhan P., Stolyarchuk R. Investigation of mathematical models for vibrations of one dimensional environments with considering nonlinear resistance forces. *Econtechmod. An International Quarterly Journal*. 2016. Vol. 5, No 1. P. 97–102.
13. Raksha S., Bohomaz V., Shcheka ., Stefanov V., Nesterenko A. Research of the dependence of pneumatic conveyor compressors power on project parameters of transport machines. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823001009>
14. Shenbor V., Koruniak P., Korendiy V., Brusentsov V., Brusentsova M. Analysis and Improvement of Two-Mass Vibrating Tubular Conveyers with Two-Cycle Electromagnetic Drive. *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*. 2016. Vol. 2, No. 1. P. 55–64.

V. M. BOHOMAZ^{1*}, P. G. ANOFRIEV²

^{1*}Dep. Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport, Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 472 14 04, e-mail wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

²Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (068) 411 07 23, e-mail anofrievp@ukr.net, ORCID 0000-0001-7997-3523

Research of the Influence of Design Parameters of a Vibrating Conveyor on Its Technical Characteristics

Purpose. The study is aimed at: determining the nature of the influence of design data on the technical characteristics of a two-pipe vibratory conveyor with an eccentric drive, in particular, the pipe diameter and drive power; building analytical dependencies of these values on the design characteristics: type and properties of the cargo,

МАШИНОБУДУВАННЯ

length of transportation, productivity; conducting a graphical analysis of the influence. **Methodology.** To achieve this goal, we used the calculation algorithms presented in the modern technical literature and analyzed the factors and values that affect the values of drive power and pipe diameter. It has been established that to determine the drive power of vibratory conveyors, it is necessary to carry out a detailed calculation, which includes: the angular velocity of the conveyor, the rotational speed of the eccentric shaft, the material transportation speed, the internal diameter of the pipe, the total mass of the oscillating system, the stiffness of the elastic system and the parameters of the springs, the forces in the connecting rod in the case of the resonant mode of operation and during the start-up period. **Findings.** For a two-pipe vibrating conveyor designed to transport a lead conglomerate, a graphical analysis of the influence of the length of transportation, productivity on the drive power and overall dimensions of the pipe was carried out. It was found that the function of the pipe diameter change with capacity is nonlinearly increasing (when other parameters are fixed), and the drive power with capacity is linearly increasing. **Originality.** The authors first studied the dependence of drive power and pipe diameter of a two-pipe vibrating conveyor with an eccentric drive on the lower pipe, and built analytical dependencies of technical characteristics (power and diameter) on design parameters: productivity, transportation length, type and physical and mechanical properties of the transported cargo. For a conveyor that transports lead sinter, graphical dependencies of the pipe diameter and drive power on the capacity and length of the conveyor were constructed. **Practical value.** The use of the constructed dependencies makes it possible to determine the general nature of the change in the above technical characteristics in the case of varying design parameters such as conveyor capacity and length. The proposed dependencies can be used to quickly determine the rational power of the conveyor drive for specific design data.

Keywords: vibrating conveyor; performance; power; drive

REFERENCES

1. Bilostotskyi, V. O., Mazorenko, D. I., Tishchenko, L. M., Miniailo, A. V., Bredykhin, V. V., Znaidiuk, V. H., ... & Kharchenko, S. O. (2009). Atlas konstruktivno-transportnykh mashyn. In *Transportuiuchi mashyny* (Vol. 2). Kharkiv: KHNTUA. (in Ukrainian)
2. Bohomaz, V. M. (2015). Influence analyses of designed characteristics of the elevator to the parameters of its drive. *Science and Transport Progress*, 3(57), 162-175. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/46076> (in Ukrainian)
3. Bohomaz, V. M. (2016). Research of dependence of belt conveyor drive power on its design parameters. *Science and Transport Progress*, 1(61), 131-146. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61024> (in Ukrainian)
4. Bondariev, V. S., Kolisnyk, N. P., Dubynets, O. I., Horbatenko, Yu. P., Bondariev, S. V., & Barabanov, V. Ya. (2009). *Pidiomno-transportni mashyny: rozrakhunky pidiimalnykh i transportovalnykh mashyn: pidruchnyk*. Kyiv: Vyshcha shkola. (in Ukrainian)
5. Dereza, O. O. (2016). *Mashyny bezperervnoho transportu: metodychnyi posibnyk*. Melitopol: Dmytro motorny tavra state agrotechnological university. (in Ukrainian)
6. Ivanchenko, F. K. (1993). *Pidiomno-transportni mashyny: pidruchnyk*. Kyiv: Vyshcha shkola.
7. Zaichenko, S. V., Pobihailo, V. A., & Dubovyk, V. H. (2022). *Transportni systemy elektromekhanichnykh kompleksiv: konspekt lektsii: navch. posib*. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Retrieved from <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48000/1/Transportni.pdf> (in Ukrainian)
8. Sholovii, Yu. P., Borovets, V. M., & Shenbor, V. S. (2005). *Vyvchennia konstruktivno, osnov rozrakhunku ta dosli-dzhennia vibratsiinoho trubchastoho konveiera z elektromahnitnym pryvodom: metod*. Vkazivky. Lviv: Vyd-vo Lviv Polytechnic National University. (in Ukrainian)
9. Bortnowski, P., Gładysiewicz, L., Król, R., & Ozdoba, M. (2021). Models of Transverse Vibration in Conveyor Belt-Investigation and Analysis. *Energies*, 14(14), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144153> (in English)
10. Kozhushko, G. G., Lukashuk, M. D., Lukashuk, O. A. (2021). Conveyor Belt Vibrations. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 837-844. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_97 (in English)
11. Pihnastyi, O., Khodusov, V., Kozhevnikov, G., & Bondarenko, T. (2021). Analysis of Dynamic Mechanic Belt Stresses of the Magistral Conveyor. *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 186-195. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_19 (in English)

МАШИНОБУДУВАННЯ

12. Pukach, P., Sokhan, P., & Stolyarchuk, R. (2016). Investigation of mathematical models for vibrations of one dimensional environments with considering nonlinear resistance forces. *Econtechmod. An International Quarterly Journal*, 5(1), 97-102. (in English)
13. Raksha, S., Bohomaz, V., Shcheka, I., Stefanov, V., & Nesterenko, A. (2018). Research of the dependence of pneumatic conveyor compressors power on project parameters of transport machines. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 230, pp. 1-8). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001009> (in English)
14. Shenbor, V., Koruniak, P., Korendiy, V., Brusentsov, V., & Brusentsova, M. (2016). Analysis and Improvement of Two-Mass Vibrating Tubular Conveyers with Two-Cycle Electromagnetic Drive. *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*, 2(1), 55-64. (in English)

Надійшла до редколегії: 08.05.2023

Прийнята до друку: 06.09.2023

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

К. Л. КОСТЕНКО, Т. М. СЕРДЮК, В. В. СКАЛЬКО
Роботизація діагностики систем залізничної автоматики та зв'язку 5

Т. М. СЕРДЮК, М. С. СЕРЧЕНКО
Аналіз параметрів якості електричної енергії та пристроїв для їх вимірювання..... 13

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

О. С. ШАПОВАЛОВ
Система взаємного навантаження допоміжних електричних машин з покриттям втрат від джерел механічної потужності..... 24

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

І. М. ДЕМИДОВИЧ
Методи інтелектуального аналізу тексту 31

**В. В. СКАЛОЗУБ, В. М. ГОРЯЧКІН,
І. В. КЛИМЕНКО, О. В. МУРАШОВ**
Комплексні багатовимірні нечіткі моделі процесів моніторингу та реабілітації хворих із нерівномірним інтервалом спостережень. 44

МАШИНОБУДУВАННЯ

В. М. БОГОМАЗ, П. Г. АНОФРІЄВ
Дослідження впливу проєктних параметрів вібраційного конвеєра на його технічні характеристики. 60

CONTENTS

AUTOMATED AND TELEMATIC SYSTEMS ON TRANSPORT

K. L. KOSTENKO, T. M. SERDIUK, V. V. SKALKO
Robotization of Diagnostics of Railway Automation and
Communication Systems 5

T. M. SERDYUK, M. S. SERCHENKO
Analysis Of Power Quality Parameters and Devices for Their
Measurement 13

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

O. S. SHAPOVALOV
System of Mutual Loading of Auxiliary Electric Machines
with Coverage of Losses from Mechanical Power Sources... 24

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

I. M. DEMIDOVICH
Methods of Intellectual Text Analysis..... 31

**V. V. SKALOZUB, V. M. HORIACHKIN,
I. V. KLYMENKO, O. V. MURASHOV**
Complex Multidimensional Fuzzy Models of Monitoring and
Rehabilitation Processes for Patients with Uneven Observation
Interval 44

MECHANICAL ENGINEERING

V. M. BOHOMAZ, P. G. ANOFRIEV
Research of the Influence of Design Parameters of a Vibrating
Conveyor on Its Technical Characteristics 60

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтю та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Наукова бібліотека (ауд. 166),
Український державний університет науки і технологій,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.

№ 3 (103) 2023

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 8,37. Тираж 100 пр. Зам. №02/03

Український державний університет науки і технологій

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 3 (103) 2023

(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 8,37. Circulation 100. Order no. 02/03

Ukrainian State University of Science and Technologies

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: stp.journal@ust.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

