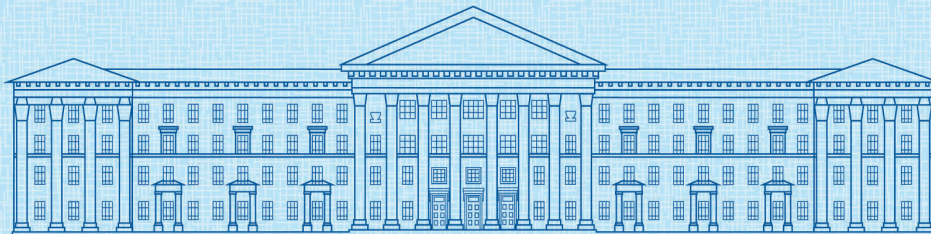




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№2(92)

• 2021 •

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 2 (92) 2021

Виходить 6 разів 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

2021

Засновник:
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пішінко О. М., доктор технічних наук
Пічуров С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Козаченко Д. М., доктор технічних наук
Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., ДНУЗТ (Україна); Богдьявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., ДНУЗТ (Україна); Бондаренко І. О., ДНУЗТ (Україна); Вакуленко І. О., ДНУЗТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., ДНУЗТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., ДНУЗТ (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); Мацюк В. І., Державний університет інфраструктури та технологій (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., ДНУЗТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., ДНУЗТ (Україна); Шинкаренко В. І., ДНУЗТ (Україна).

Журнал зареєстровано 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 26.04.2021 р., протокол № 10

Видавець Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (м. Дніпро) Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

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

Видання публікується з 1936 р.:

- 1936–1993 рр. – «Труды 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);
- з 2013 р. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Dnipro National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 2 (92) 2021

Bi-Monthly ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ 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

2021

Founder:

DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT
NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN

Chairman of the Editorial Board of the University
Editor-in-Chief
Deputy Chief Editor
Executive Secretary

Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
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., DNURT (Ukraine); Bodnar B. E., DNURT (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Bondarenko I. O., DNURT (Ukraine); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., DNURT (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., DNURT (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 Puluj National Technical University (Ukraine); Matsiuk V. I., State University of Infrastructure and Technology (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., DNURT (Ukraine); Shinkarenko V. I., DNURT (Ukraine); Ślaskowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., DNURT (Ukraine)

Journal was registered	by the 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 26.04.2021, Protocol no. 10
Publisher	Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: kolesnykova@diit.edu.ua, visnik@diit.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),
since 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

УДК 656.072:656.224

Є. В. НАГОРНИЙ^{1*}, І. Є. ІВАНОВ^{2*}

^{1*}Каф. «Транспортні технології», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 37 20, ел. пошта ktt@khadi.ua, ORCID 0000-0002-9813-2479

^{2*}Каф. «Транспортні технології», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 707 37 20, ел. пошта zpavtotrance@ukr.net, ORCID 0000-0002-0336-6513

Структура корисності обслуговування населення пасажирським транспортом

Мета. Дослідження спрямовано на розвиток науково-технологічних основ визначення корисності обслуговування населення пасажирським транспортом в умовах формування поетапного управління якістю. **Методика.** Структуру корисності обслуговування населення пасажирським транспортом визначено на основі розвитку системного представлення характеристичного впливу сприйняття результативності управлінських рішень із підвищення якості транспортного обслуговування на рухомість населення. Облік складних системних властивостей міського громадського пасажирського транспорту (МГПТ) реалізовано шляхом конструювання міжрівневих взаємозв'язків та встановлення методичних регламентів узгодження параметрів управління якістю транспортного обслуговування населення з показниками сприйняття його корисності. **Результати.** Представлена логічна послідовність формування рухомості населення ґрунтується на відтворенні загальних умов підвищення корисності транспортного обслуговування за рахунок поетапної реалізації керівних заходів, що дає можливість установа умов їх доцільності та параметризації. Для якісної оцінки технологічної корисності міського громадського пасажирського транспорту розроблено модель граничної корисності. Її подано у вигляді категорії, що відтворює зв'язок між отриманим результатом зміни показників якості транспортного обслуговування населення, споживчої корисності транспортного обслуговування та рівнем застосованих ресурсів. **Наукова новизна.** Формалізовано процедуру оцінки споживчої корисності міського громадського пасажирського транспорту, що на відміну від наявних ґрунтується на встановленні впливу технологічних параметрів роботи маршрутів на формування рухомості населення та забезпечує облік показників якості транспортного обслуговування населення в разі визначення граничної межі технологічної корисності управлінських заходів. **Практична значимість.** Застосування теорії корисності для вдосконалення роботи міського громадського пасажирського транспорту в цілому сприяє розвитку теорії управління пасажирськими перевезеннями та може значною мірою підвищити ефективність вибору раціональних керівних заходів, спрямованих на вдосконалювання технологічних процесів і поліпшення показників якості транспортного обслуговування населення. Установлено умови формування позитивного впливу споживчої корисності міського пасажирського транспорту на рухомість міського населення. На основі виділеного зв'язку в подальшому можна сформувати систему параметрів оцінювання якості транспортного обслуговування населення.

Ключові слова: міський громадський пасажирський транспорт (МГПТ); корисність транспортного обслуговування; якість транспортного обслуговування; рухомість населення; функція граничної технологічної корисності управління

Вступ

У сучасній теорії управління соціально-економічними системами набули поширення моделі оцінювання сприйняття послуг спожи-

вачами, що ґрунтуються на застосуванні поняття корисності. При цьому акцентовано увагу на вивченні закономірностей сприйняття умов задоволення споживчого попиту, аналізі наданої

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

пропозиції, дослідженні внутрішніх процесів і визначенні результативних показників на елементному рівні представлення системи [7]. Використання теорії корисності в системах транспортного обслуговування виходить із деяких передумов. Перш за все мають на увазі, що пасажир завжди поводить себе раціонально, тобто прагне отримати максимум користі, при цьому «корисність» є узагальненим суб'єктивним поняттям, яке застосовують для формування уявлення про доцільність реалізації пересування або ефективності впровадження керівних заходів [3]. Найважливіша характеристика корисності полягає в тому, що вона не має фізичного чи матеріального вираження, оскільки існує в свідомості споживача. Корисність послуги МГПТ полягає в його здатності задовольняти потреби населення в здійсненні транспортних переміщень із відповідним рівнем якості транспортного обслуговування населення (ЯТОН) [7].

Характерною особливістю сучасного розвитку МГПТ є необхідність вирішення завдань, пов'язаних із розглядом складних, важко описуваних процесів взаємодії об'єктів і явищ у межах багаторівневих функціональних підсистем [13]. Проблему підвищення ЯТОН МГПТ сьогодні потрібно вирішувати на основі комплексного розв'язання сукупності локальних технічних, технологічних, організаційних та соціальних завдань, що обумовлюється тісним взаємозв'язком різних аспектів функціонування міської транспортної системи як одного з показників забезпечення якості життя населення [10]. У зв'язку з цим важливим є розвиток системних досліджень у напрямі встановлення нових можливостей вирішення завдань управління ЯТОН на основі обліку складних системних властивостей МГПТ, у тому числі, шляхом конструювання міжрівневих взаємозв'язків та встановлення методичних регламентів узгодження параметрів управління з показниками сприйняття населенням корисності транспортного обслуговування.

Мета

Незважаючи на значну наукову та практичну значимість проблеми підвищення ЯТОН, ступінь опрацювання питань оцінки корисності транспортного обслуговування населення з по-

зиції обліку сприйняття управлінських заходів вивчено недостатньо. Тому метою роботи є розвиток науково-технологічних основ визначення корисності транспортного обслуговування населення пасажирським транспортом в умовах формування поетапного управління якістю.

Методика

Теорія корисності за своєю метою спрямована на формування уявлень про необхідність створення умов для повного та своєчасного задоволення потреб споживачів. Корисність можна розглядати як сукупність певних якісних або кількісних наслідків для індивідуума або суспільства [5]. Кожен із напрямів може бути у тій чи іншій мірі адаптований до конкретних завдань удосконалення транспортного обслуговування.

Теорії корисності у сфері пасажирських перевезень набула застосування за такими напрямками:

- формування раціональної маршрутно-мережі пасажирського транспорту [1];
- визначення пріоритету розвитку транспортної інфраструктури [11];
- упровадження інформаційної системи транспортного обслуговування населення [8];
- вибір рухомого складу [12];
- визначення параметрів транспортного обслуговування [2, 9, 14].

У системі міського пасажирського транспорту застосування теорії корисності може значною мірою підвищити результативність вибору раціональних керівних заходів та в цілому сприяти розвитку теорії управління пасажирськими перевезеннями і, відповідно, практичних рішень, направлених на вдосконалювання технологічних процесів і поліпшення показників ЯТОН [2, 14].

У роботі [2] як показник, що відтворює корисність, використано час пересування. У роботах [9, 14] на основі обліку корисності транспортного обслуговування встановлено значення фактичного обсягу пересувань населення. Основним недоліком цих підходів є їх статичність, що виявляється в неможливості оцінки поетапної програми вдосконалення МГПТ. Обмеженість наявних підходів до розгляду корисності унеможливорює облік впливу результати-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

вності сукупності заходів на підвищення ЯТОН та обумовлює необхідність формалізації корисності транспортного обслуговування. За такого підходу ЯТОН може бути досліджено із системної й комплексної позиції через відтворення корисності МГПТ з погляду групи індивідуумів (споживачів) та з позиції вибору раціональних параметрів управління. Групою індивідуумів виступає сукупність пасажирів, що користуються як окремими маршрутами мережі, так і всім МГПТ. У такому поданні сутності споживачів послуг загальну корисність МГПТ можна представити у вигляді сукупності сприйманих суспільством та індивідумом наслідків, обумовлених, звичайно, необхідністю або бажаністю поїздки.

Сама по собі корисність обслуговування МГПТ поки що не може бути формалізована

у вигляді строгої математичної функції з визначеною розмірністю й іншими ознаками однозначності її обчислення. Разом із тим якісне подання корисності МГПТ дозволяє в процесі реалізації досліджень описати значну частину взаємозв'язків між соціальними, економічними та технологічними параметрами процесів транспортного обслуговування населення міст з умов оцінки їх впливу на задоволення його рухливості та формування умов реалізації пересувань [4].

До структури корисності можна віднести дві основні категорії: споживчу та технологічну. На рис. 1 представлена структура формування елементів корисності транспортного обслуговування населення міським громадським пасажирським транспортом.

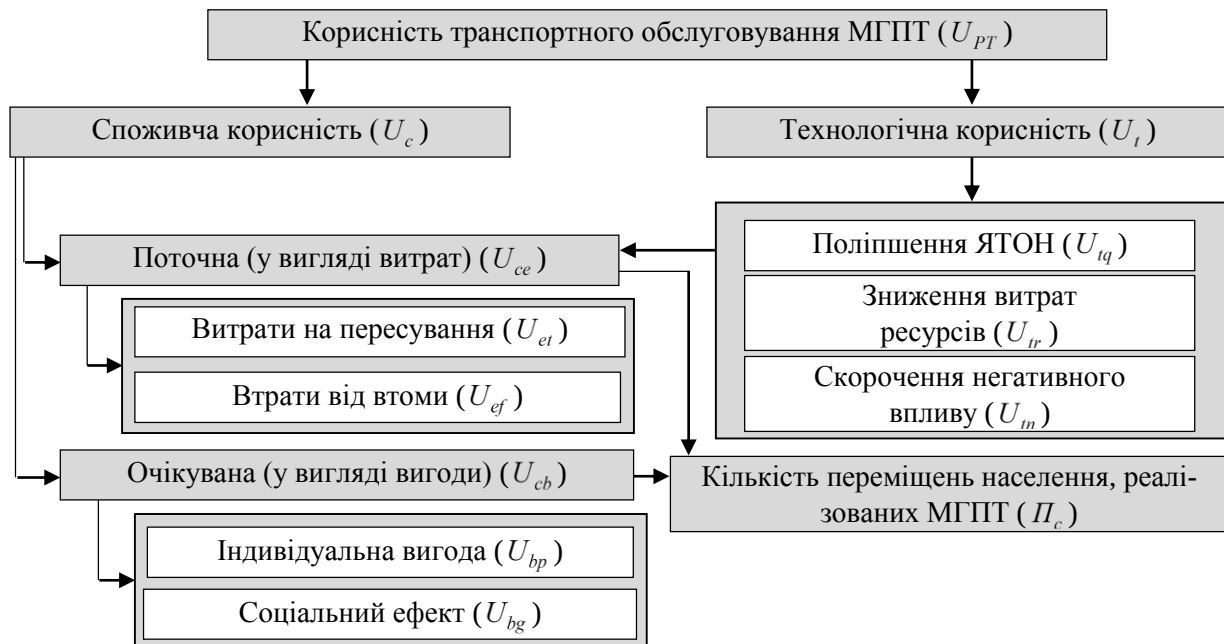


Рис. 1. Структурні складові корисності обслуговування міським громадським пасажирським транспортом

Fig. 1. Structural components of utility services of urban public passenger transport

Споживча корисність переміщень, реалізованих МГПТ (U_c), може бути подана у вигляді наслідків у реальному часі (U_{ce}) й довгостроковій перспективі (U_{cb}). Наприклад, для трудових пересувань, характерна ситуація, за якої пасажир у реальному часі понесе витрати та буде відчувати транспортне стомлення під час

поїздки, що негативно впливає на загальний рівень корисності переміщень. У той же час пасажир відчуває якусь користь, що очікує його після реалізації поїздки: пасажир прибуває до пункту призначення, де може отримати реальну матеріальну винагороду або задоволення своїх життєвих потреб. У випадку реалізації транспортного переміщення одержання майбутньої

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

матеріальної винагороди або задоволення потреби в більшості випадків призведе до відчуття корисності всього заходу. У результаті розгляду малих корпоративних або генеральних сукупностей інших видів пересувань можна сформулювати загальну модель визначення споживчої корисності обслуговування МГПТ, що представлена у вигляді спільного обліку двох основних складових:

$$U_c = -U_{ce} + U_{cb}. \quad (1)$$

При цьому, подібно до поняття «дисконтування», отримана згодом вигода може сприйматися за спадною залежністю. Тоді споживчу корисність транспортного процесу можна виразити залежністю:

$$U_c = \sum_{i=1}^{N_p^c} \left(-U_{ef}^i - U_{et}^i + \sum_{\Delta\tau=1}^{t_n^U} U_o^i \cdot k_{\Delta\tau}^U \right), \quad (2)$$

де U_{ef}^i – поточна корисність для i -го індивідуума у вигляді втрат від транспортної втоми; N_p^c – кількість користувань МГПТ (кількість пасажирів); $\Delta\tau$ – елементарний крок часу, у якому проявляється U_o^i , дн.; U_o^i – очікувана корисність для i -го пасажирів (індивідуума) в періоді t_n^U або одному якомусь $\Delta\tau$; $k_{\Delta\tau}^U$ – коефіцієнт зменшення за часом відчуття віддаленої корисності U_o ; U_{et}^i – витрати i -го пасажирів на пересування.

Наведена залежність не є математичною моделлю обчислення споживчої корисності обслуговування МГПТ. Представлена спроба формалізації корисності свідчить лише про зміст та складові, що за своїми ваговими коефіцієнтами (або функціями) суб'єктивно (індивідуально) або кількісно визначають корисність як базову категорію оцінювання МГПТ. Споживча корисність U_c є визначальним чинником у формуванні кількості переміщень населення, реалізованих МГПТ, – P_c . Залежність $P_c = f(U_c)$ у загальному вигляді має пропорційний зв'язок, що дозволяє зробити висновок про можливість впливу на рівень рухомості через зміну поточної та очікуваної корисності. Звідси випливає, що в якійсь кількості потенційно можливих пе-

реміщень P_c їхня реалізація може не відбутися через відсутність корисності. Доцільність поїз-

дки залежить від очікуваної вигоди $\sum_{\Delta\tau=1}^{t_n^U} U_o^i \cdot k_{\Delta\tau}^U$

та від зведених витрат U_{ce} , до складу яких належать:

- загальні витрати на організацію транспортного процесу, що в основному визначаються собівартістю перевезень;
- опосередковані витрати часу на пересування, що можуть бути суб'єктивно зведені до їх вартісної інтерпретації;
- негативний вплив на суспільну продуктивність, що опосередковано впливає на сприйняття переміщення населенням;
- зведені до індивідуального та суспільного негативні соціальні наслідки транспортного процесу.

Якщо взяти до уваги те, що кількість реалізованих потенційних переміщень P_c залежить від корисності транспортного процесу, то можна затверджувати, що корисність визначає:

- загальну рухливість населення, P_c ;
- їх транспортну рухливість, P_{tc} ;
- рухливість містян на пасажирському транспорті загального користування, P_{pt} .

Технологічна корисність МГПТ (U_t) являє собою внутрішню характеристику реалізації управлінських заходів. Саме по собі поняття технологічної корисності МГПТ не може бути в простому вигляді застосоване для оцінювання результативності внутрішніх процесів. Процедура встановлення рівня технологічної корисності МГПТ передбачає визначення характеристичного впливу на споживчу корисність транспортного обслуговування. Існує зв'язок між U_t та U_c , що виявляється у зміні U_{ce} через зміну умов реалізації поточних пересувань. Технологічна корисність МГПТ відтворює керівний вплив на процес з позиції ЯТОН (U_{tq}), витрат ресурсів на здійснення транспортних операцій (U_{tr}) та негативного впливу (U_{tn}).

Розв'язання задачі підвищення ЯТОН потрібно розглядати в складі комплексної системи управління. Основою для цього є узгодження цільових інтересів споживачів транспортних

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

послуг. Для виконання мети, поставленої перед МГПТ, необхідне вирішення цілого комплексу завдань, які перш за все пов'язані з підвищенням його технологічної корисності. У разі реалізації керівних дій очікується поліпшення сукупності параметрів, що визначають U_{tq} , U_{tr} , U_{tn} . При цьому відбудеться позитивний вплив на складові елементи поточної споживчої корисності U_{ce} . Це можливо за рахунок зниження витрат на пересування U_{et} та втрати від томи U_{ef} . За своїм змістом зв'язок впливу набуває послідовності:

$$U_{tq} = \{U_{tq}, U_{tr}, U_{tn}\} \rightarrow U_{ce} = \{U_{et}, U_{ef}\} \rightarrow U_c \rightarrow P_c. (3)$$

Представлена логічна послідовність зв'язку відтворює загальні умови підвищення корисності транспортного обслуговування за рахунок реалізації керуючих заходів, але не дає можливості встановлення умов їх доцільності та параметризації.

Для якісної оцінки технологічної корисності МГПТ можливо застосувати положення теорії граничної корисності. Гранична технологічна корисність МГПТ являє собою категорію, що

відтворює зв'язок між отриманим результатом транспортного обслуговування та обсягом застосованих ресурсів або параметрами керівних заходів. Принцип граничної технологічної корисності зводиться до такого: результативність діяльності МГПТ щодо зміни кількості реалізованих переміщень населення визначають корисністю граничного рівня, за якого можуть бути задоволені транспортні потреби з максимальним рівнем якості обслуговування. Він ґрунтується на використанні закону спадної корисності, що для МГПТ має такі ключові аспекти:

– зі зростанням рівня ЯТОН відбувається зниження витрат та втрат на реалізацію переміщення, що позитивно впливає на рівень споживчої корисності транспортного обслуговування МГПТ та забезпечує збільшення транспортної рухливості населення;

– зі зростанням рівня ЯТОН збільшується споживча корисність, але при цьому темп збільшення споживчої корисності МГПТ уповільнюється;

– перехід до кожного наступного ступеня ЯТОН знижує інтенсивність приросту споживчої корисності МГПТ.

На рис. 2 представлена графічна інтерпретація зміни параметрів загальної корисності транспортного обслуговування МГПТ.

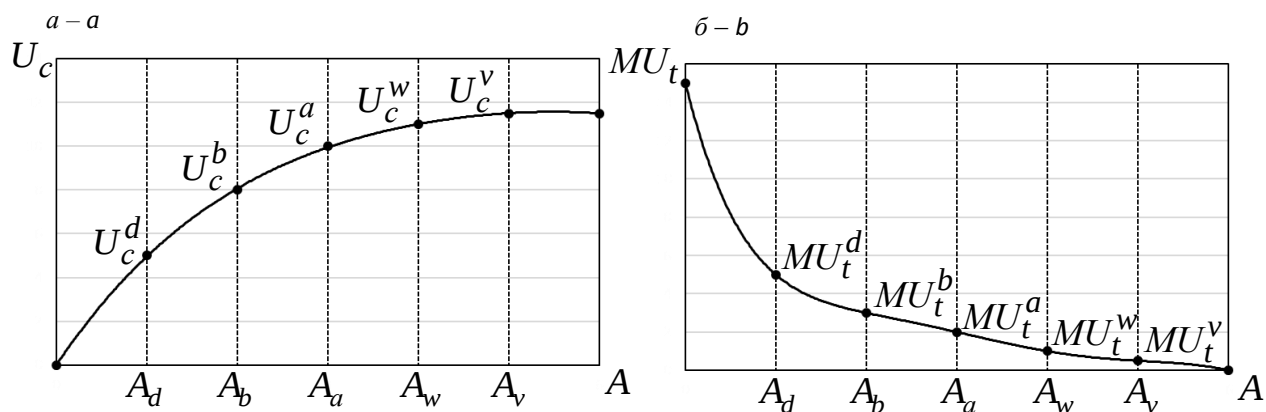


Рис. 2. Зміна корисності транспортного обслуговування:

a – загальна споживча корисність; b – гранична корисність

Fig. 2. Changing utility transport services:

a – general consumer utility; b – marginal utility

Аналіз представлених закономірностей зміни параметрів на рис. 2, a дає можливість виділити ряд характерних умов формування загаль-

ної споживчої (U_c) та граничної корисності (MU_t). Зі зростанням рівня ЯТОН у напрямі $A_t \rightarrow A_v$ збільшується загальна корисність тра-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

транспортного обслуговування МГПТ, що може бути представлено як поліпшення умов реалізації та підвищення кількості потенційних пересувань населення МГПТ (P_c). Зі зростанням A темп збільшення U_c уповільнюється. У разі міжступеневого переходу ЯТОН ($A_d \rightarrow A_b \rightarrow A_a \rightarrow A_w \rightarrow A_v$) відбувається зниження інтенсивності приросту ΔU_c^d , ΔU_c^b , ΔU_c^a , ΔU_c^w , ΔU_c^v . Виявлені тенденції дають змогу обґрунтувати можливість використання граничної технологічної корисності управління МГПТ MU_t в разі опису впливу керівних заходів на U_c . Як видно з рис. 2, б, якщо зростає ЯТОН у напрямі $A_t \rightarrow A_v$, відбувається зниження рівня приросту ΔU_c та MU_t , що свідчить про наявність змінного характеру та граничної межі ефективності керівних заходів. Представлена функція граничної технологічної корисності управління МГПТ MU_t , очевидно, задовольняє вимоги:

$$\frac{dU_c(A)}{dA} < 0, \quad (4)$$

де $dU_c(A)$ – приріст загальної споживчої корисності; dA – приріст ступеня ЯТОН.

Зазначена залежність показує, що функція монотонно спадає зі зростанням ЯТОН $A_t \rightarrow A_v$. Загальна накопичена споживча корисність являє собою площину фігури, що знаходиться під функцією корисності транспортного обслуговування:

$$TU_c(A_x) = \int_{A_{x-1}}^{A_x} U_c(A) dA, \quad (5)$$

де A_{x-1} – початкове значення ступеня ЯТОН; A_x – значення ступеня ЯТОН у точці x .

Граничну технологічну корисність управління МГПТ визначають похідною загальної накопиченої корисності:

$$MU_t(A) = \frac{dTU_c(A)}{dA}. \quad (6)$$

Здійснивши заміну у виразі (6) величини $dTU_c(A)$ через використання залежності (5) для граничної технологічної корисності, отримаємо:

$$MU_t(A) = \frac{d}{dA} \left(\int_{A_{x-1}}^{A_x} U_c(\xi) d\xi \right) = U_c(A). \quad (7)$$

Як бачимо, гранична технологічна корисність MU_t , із позиції її представлення впливу на загальну споживчу корисність транспортного обслуговування МГПТ U_c , тотожна чій:

$$MU_t(A) \equiv U_c(A). \quad (8)$$

Тотожне рівняння свідчить про те, що обидва показники MU_t і U_c еквівалентні в сенсі можливості їх застосування для оцінки результативності управлінських заходів із поліпшення ЯТОН. На практиці це реалізують таким чином: будь-який технологічний управлінський захід, що забезпечує поліпшення ЯТОН, можна розглядати як дію, спрямовану на підвищення корисності транспортного обслуговування. Розглянемо поетапну реалізацію на маршруті МГПТ трьох управлінських заходів $Z_m^r = \{z_{m1}^r, z_{m2}^r, z_{m3}^r\}$. Перший захід (z_{m1}^r) передбачає реалізацію конфігураційного управління перевізною здатністю рухомого складу на маршруті, другий (z_{m2}^r) – організацію взаємодії суб'єктів маршрутного потоку в межах зупинних пунктів, а третій (z_{m3}^r) – упровадження інформаційного супроводу транспортного обслуговування. У ході їх реалізації відбудеться досягнення зміни показників ЯТОН: у разі реалізації z_{m1}^r – із A_{x-1} до A_x , за реалізації z_{m2}^r – із A_x до A_{x+1} , за реалізації z_{m3}^r – із A_{x+1} до A_{x+2} . Для наочності представлення процесу припустимо, що приріст ЯТОН відбувається з однаковим інтервалом:

$$\Delta A_x = A_x - A_{x-1} = A_{x+1} - A_x = A_{x+2} - A_{x+1}. \quad (9)$$

Підвищення ЯТОН призведе до поетапного зростання споживчої корисності транспортного обслуговування МГПТ до $U_c(A_x)$, $U_c(A_{x+1})$, $U_c(A_{x+2})$, що в умовах неокласичної економіч-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

ної теорії може означати, що також відбувся приріст граничної технологічної корисності $MU_t(z_{mi}^r)$. Із врахуванням тотожності виразу (8) величину приросту $MU_t(z_{mi}^r)$ для кожного етапу реалізації управлінських рішень визначають різницею значень $U_c(A_{xi})$:

$$\Delta MU_t(z_{m1}^r) = U_c(A_x) - U_c(A_{x-1}); \quad (10)$$

$$\Delta MU_t(z_{m2}^r) = U_c(A_{x+1}) - U_c(A_x); \quad (11)$$

$$\Delta MU_t(z_{m3}^r) = U_c(A_{x+2}) - U_c(A_{x+1}). \quad (12)$$

Ураховуючи закономірність (4) та підставивши залежності (10)–(12) до виразу (6), отримаємо ранжування значень $MU_t(z_{mi}^r)$ для кожного управлінського рішення:

$$\Delta MU_t(z_{m1}^r) > \Delta MU_t(z_{m2}^r) > \Delta MU_t(z_{m3}^r). \quad (13)$$

Наведена ситуація передбачає, що кожне наступне управлінське рішення хоч і має менше значення $\Delta MU_t(z_{mi}^r)$, однак сприймається споживачами як підвищення корисності $U_c(A_x)$. Виходячи з цього, можемо обґрунтувати твердження, що збільшення кількості управлінських заходів дає приріст споживчої корисності. Однак таке твердження є правдивим лише за умов використання парадигми раціональності споживачів, що лежить в основі неокласичної економічної теорії. Вона передбачає, що кожен пасажир проводить ретроспективну оцінку зміни ЯТОН із позиції запам'ятовування первинного стану A_{x-1} та досягнутого кінцевого результату A_{x+1} . При цьому обидва поняття (споживча корисність МГПТ та гранична технологічна корисність управління ЯТОН) дають ідентичний функціональний опис. Це обґрунтовує можливість оцінки граничної корисності на основі зміни показників ЯТОН.

В умовах обмеженої раціональності сприйняття ЯТОН достовірність тотожності (8) є проблематичною. Якщо припустити недосконалу пам'ять, що належить до особистого випадку обмеженої раціональності, функціональний опис споживчої корисності МГПТ та граничної технологічної корисності управління ЯТОН у загальному випадку відрізняється. За

будь-якого варіанта сприйняття процесу формування загальної оцінки являє собою накопичення корисності за всіма етапами реалізації управлінських рішень. Загальний абсолютний накопичений результат оцінюють як різницю базової корисності та корисності, отриманої на завершальному етапі. Для раціональної моделі сприйняття корисності вона має вигляд:

$$TU_c(z_{m3}^r) = U_c(A_{x-1}) + \sum_{i=1}^{z_m^r} U_c(A_{xi}), \quad (14)$$

де $U_c(A_{x-1})$ – корисність за базового рівня ЯТОН, ютилів; $U_c(A_{xi})$ – корисність, отримана від поліпшення ЯТОН через реалізацію управлінського заходу i , ютилів; z_m^r – кількість заходів управління.

Для нераціональної моделі сприйняття корисності:

$$TU_c(z_{m3}^r) = U_c(A_{x-1}) + \sum_{i=1}^{z_m^r} (U_c(A_{xi}) - \mu U_c^*(A_{xi})), \quad (15)$$

де $\mu U_c^*(A_{xi})$ – втрата в часі сприйняття корисності, отриманої від поліпшення ЯТОН через реалізацію управлінського заходу i , ютилів.

В умовах нераціональної моделі сприйняття чинник часу відіграє негативну роль. Тому можна запропонувати для оцінки результативності управлінських заходів застосувати функцію прирощення накопиченої корисності в часі у вигляді похідної виду:

$$\Delta TU_c(z_m^r) = \lim_{t_x^a \rightarrow 0} \frac{U_c(A_{x-1}) - U_c(A_{x+2})}{t_{x3}^a - t_{x0}^a}. \quad (16)$$

Якщо результат зміни ЯТОН A_x відбувається в момент часу t_{x1}^a , можна подати залежність (16) у вигляді:

$$\Delta TU_c(z_m^r) = \lim_{t_x^a \rightarrow 0} \frac{\Delta U_c(t_x^a)}{\Delta t_x^a}, \quad (17)$$

де $U_c(A_{x-1})$ – абсолютний приріст корисності в часі, ютилів; $U_c(A_{xi})$ – проміжок часу, протягом якого реалізують управлінські заходи.

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

У ході аналізу функції прирощення можна дійти висновку, що збільшення часу призводить до зниження споживчої корисності МГПТ. Розглянуті закономірності (15)–(17) можуть бути окремою моделлю поведінки споживачів. За своєю суттю її можна подати у вигляді песимістичного підходу до оцінювання результативності управлінських заходів.

Результати

За допомогою таблично-графічної моделі представимо опис ситуацій сприйняття управлінських заходів з підвищення ЯТОН із використанням різних типів споживчої пам'яті. У табл. 1 наведена модель сприйняття технологічної корисності транспортного обслуговування.

Таблиця 1

Таблична модель сприйняття технологічної корисності транспортного обслуговування

Table 1

Tabular model perception of technological utility of transport services

Етап зміни ЯТОН	Поточна оцінка корисності, ютилів	Ретроспективна оцінка корисності управлінських рішень, ютилів	
		Рациональне	Нераціональне
1	6	6	3
2	4	4	2
3	2	2	1
Разом	12	12	6

Застосування принципу короткотривалої споживчої пам'яті передбачає, що існує період, протягом якого на споживача транспортних послуг діє ефект насичення. Поетапна реалізація управлінських заходів полягає в їх утіленні в моменти часу t_{x1}^a , t_{x2}^a , t_{x3}^a з відповідними інтервалами. Зміну споживчої корисності МГПТ визначають у ці моменти часу. У подальшому періоді спостерігаються ефекти змивання пам'яті споживача, у ході якого відбувається свого роду обнулення $U_c(A_x)$. Наприклад, у ході реалізації управлінських заходів досяг-

нуто таких значень: $U_c(z_{m1}^r) = 6$ ютилів, $U_c(z_{m2}^r) = 4$ ютилів, $U_c(z_{m3}^r) = 2$ ютилів. Оцінку корисності $U_c(A_x)$ установлюють у ході сервісно-ресурсного моделювання параметрів роботи маршруту МГПТ через зміну показників, що визначають ЯТОН. Базовий стан МГПТ забезпечує $U_c(A_{x-1}) = 8$ ютилів. Різниця між раціональним та нераціональним сприйняттям управлінських рішень полягає в такому: пасажир із раціональним сприйняттям пам'ятає початковий стан ЯТОН та оцінює корисність усіх реалізованих заходів загалом щодо цього стану. Його сприйняття повністю відповідає об'єктивній оцінці, а саме: $U_c(z_{m1}^r) = 6$ ютилів, $U_c(z_{m2}^r) = 4$ ютилів, $U_c(z_{m3}^r) = 2$ ютилів. Загальна оцінка корисності транспортного обслуговування в цьому випадку буде складати 18 ютилів. На рис. 3 представлена графічна інтерпретація формування оцінки корисності для раціонального сприйняття етапів зміни ЯТОН.

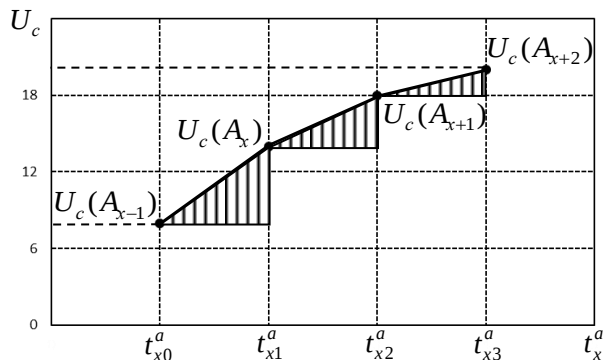


Рис. 3. Графічна інтерпретація формування оцінки корисності за раціонального сприйняття

Fig. 3. Graphic interpretation of evaluation's formation of the rational perceived utility

Графічна інтерпретація формування оцінки корисності транспортного обслуговування для нераціонального сприйняття етапів зміни ЯТОН подана на рис. 4.

Пасажир із нераціональною пам'яттю оцінює кожен етап окремо стосовно не початкового стану, а попереднього. Одержана оцінка корисності ґрунтується на порівнянні двох суміжних станів транспортного обслуговування. За таких умов кожна оцінка буде меншою ніж

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

об'єктивна оцінка результативності заходів, наприклад, $U_c(z_{m1}^r) = 3$ ютилі, $U_c(z_{m2}^r) = 2$ ютилі, $U_c(z_{m3}^r) = 1$ ютиль. При цьому фактична загальна оцінка корисності транспортного обслуговування складає 6 ютилів і є меншою тому, що кожен захід порівнюють з поточним станом.

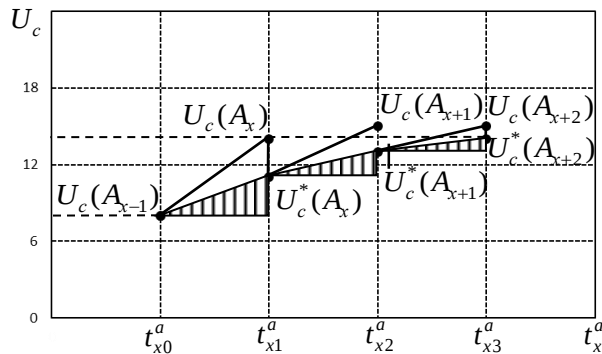


Рис. 4. Графічна інтерпретація формування оцінки корисності за нерационального сприйняття

Fig. 4. Graphic interpretation of evaluation's formation of the irrational perceived utility

Доцільність реалізації управлінських заходів визначають на основі граничної результативності керівних заходів ($MU_t(z_m^r)$). В умовах, коли сприйняття корисності від упровадження заходів поліпшення ЯТОН у кожного пасажера може набувати різної форми, доцільно представити оцінювання граничної результативності керівних заходів у вигляді мінімаксної функції. Значення абсолютного рівня $MU_t(z_m^r)$ визначають шляхом вибору найкращої функції $U_c(A_x)$ із параметричної множини $U_c(A_i)$ на множині $A_x^q = \{a_x\}, (x = \overline{1, n_q})$. Функцію розподілу величини зміни сприйняття корисності у часі $U_c(t_{xi}^a)$ знаходять із множини $U_c^t = \{u_x\}, (x = \overline{1, g_u})$, що визначає функції щільності зміни сприйняття пасажерами в часі. Основна суть використання мінімаксного методу ґрунтується на припущенні про використання найкращої функції опису зміни ЯТОН від параметрів її визначення та найгіршої моделі сприйняття її в часі:

$$MU_t = \sum_{y=1}^{q_p^r} \min_{a_i \in A_x^q} \max_{p(u_x) \in U_c^t} \int_{t_{x0}^a}^{t_{x3}^a} U_c(A_x) U_c(t_{xi}^a) dt_x^a, (18)$$

де q_p^r – кількість споживачів послуг.

Аналіз характеру та змісту моделі визначення граничної результативності дає можливість зробити ряд основоположних висновків щодо формування керівних заходів із підвищення ЯТОН:

- вплив на споживчу корисність МГПТ можливий шляхом реалізації сукупності заходів, спрямованих на підвищення ступеня ЯТОН, та виражається у вигляді збільшення рухомості міського населення;
- визначення рівня транспортної рухомості населення на МГПТ є первинним етапом установлення рівня його споживчої корисності та може бути використане як оцінка сервісних характеристик наявного попиту;
- реалізація управлінських заходів повинна бути комплексною, що дає можливість скоротити період формування накопиченого сприйняття корисності МГПТ та знизити ефект короткотривалої споживчої пам'яті.

Наукова новизна та практична значимість

Автори цієї роботи формалізували процедуру оцінки споживчої корисності МГПТ, що на відміну від наявних ґрунтується на встановленні впливу технологічних параметрів роботи маршрутів на формування рухомості населення та забезпечує облік показників ЯТОН у разі визначення граничної межі технологічної корисності управлінських заходів. Застосування теорії корисності для вдосконалення роботи міського громадського пасажирського транспорту в цілому сприяє розвитку теорії управління пасажирськими перевезеннями та може значною мірою підвищити ефективність вибору раціональних керівних заходів, спрямованих на вдосконалення технологічних процесів і поліпшення показників якості транспортного обслуговування населення.

Висновки

Для визначення результативності управлінських заходів із поліпшення ЯТОН доцільно застосувати принципи оцінки граничної технологічної корисності МГПТ, що являє собою категорію, яка відтворює зв'язок між отриманим результатом транспортного обслуговування та обсягом застосованих ресурсів або параметрами керівних заходів. Складовим елементом параметризації технологічної корисності МГПТ з позиції оцінювання рівня ЯТОН є рухомість населення, яку безпосередньо форму-

ють на основі обліку умов реалізації транспортних пересувань у реальному часі й довгостроковій перспективі.

Доцільність реалізації управлінських заходів визначають на основі граничної результативності керівних заходів. За різних умов сприйняття корисності від упровадження заходів поліпшення ЯТОН у пасажирів доцільно представити оцінювання граничної результативності керівних заходів у вигляді мінімаксної функції яка описує поетапність вибору управлінських рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андреев К. П. Совершенствование городской маршрутной сети. *Надежность и качество сложных систем*. 2017. № 3 (19). С. 102–106. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2017-3-15>
2. Донченко В. В., Филиппова Р. В. Анализ теоретических подходов к оценке издержек, связанных с ненадежностью транспортных корреспонденций городского пассажирского транспорта и временем транспортных передвижений городского населения. *Вестник университета*. 2018. № 5. С. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2018-5-95-103>
3. Іванов І. Є., Рогальський Р. Б. Визначення корисності системи міського пасажирського транспорту. *Science Rise*. 2015. № 6/2 (11). С. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.43327>
4. Штоцкая А. А., Михайлов А. Ю. Оценка транспортной подвижности населения на основе дезагрегированных моделей. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21, № 5 (124). С. 199–207. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-5-199-207>
5. Dyer J. S. Multiattribute utility theory (MAUT). *Multiple Criteria Decision Analysis*. Springer, 2016. P. 285–314. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_8
6. Hirsh J. B., Lu J. G., Galinsky A. D. Moral utility theory : Understanding the motivation to behave (un)ethically. *Research in Organizational Behavior*. 2018. Vol. 38. P. 43–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riob.2018.10.002>
7. Ivanov I. The structure of the model of transition of states of quality of transport service of passengers. The VIII International Science Conference «Problems and tasks of modernity and approaches to their solution», (Tokyo, 02–05 March, 2021). Tokyo, 2021. P. 245–248. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.I.VIII>
8. Keller C., Struwe S., Titov W., Schlegel T. Understanding the usefulness and acceptance of adaptivity in smart public transport. *HCI : International Conference on Human-Computer Interaction*. 2019. P. 307–326. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22666-4_23
9. Kłos-Adamkiewicz Z. Value of services for passenger in public transport – theoretical approach. *European Journal of Service Management*. 2018. Vol. 25. P. 125–131. DOI: <https://doi.org/10.18276/ejsm.2018.25-15>
10. Lee R. J., Sener I. N. Transportation planning and quality of life : Where do they intersect? *Transport policy*. 2016. Vol. 48. P. 146–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.03.004>
11. Papathanasiou N., Adey B. T. Usefulness of quantifying effects on transport service when comparing intervention strategies. *Infrastructure Asset Management*. 2020. Vol. 7 (3). P. 167–189. DOI: <https://doi.org/10.1680/jinam.19.00071>
12. Świdorski A., Jóźwiak A., Jachimowski R. Operational quality measures of vehicles applied for the transport services evaluation using artificial neural networks. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2018. Vol. 20 (2). P. 292–299. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2018.2.16>
13. Vdovychenko V. Fuzzy productive model of sustainable development of urban public passenger transport. *Автомобільний транспорт*. 2017. № 41. С. 91–95. DOI: <https://doi.org/10.30977/at.2219-8342.2017.41.0>
14. Zhuk M., Pivtorak H., Kovalyshyn V., Gits I. Development of a Multinomial Logitmodel to Choose a Transportation Mode for Intercity Travel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, № 3 (105). P. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205868>

Y. V. NAHORNYI^{1*}, I. Y. IVANOV^{2*}^{1*}Dep. «Transport Technology», Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudroho St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 37 20, e-mail ktt@khadi.ua, ORCID 0000-0002-9813-2479^{2*} Dep. «Transport Technology», Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudroho St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 707 37 20, e-mail zpavtotrance@ukr.net, ORCID 0000-0002-0336-6513

Structure of Passenger Transport Service Utility for Population

Purpose. The research is aimed at the development of scientific and technological bases for determining the utility of passenger transport services for the population in the conditions of formation of phased quality management. **Methodology.** The structure of the utility of passenger transport services for the population is determined on the basis of developing a systematic representation of the characteristic impact of the perception of management decisions effectiveness for improving the quality of transport services on mobility. The account of complex system properties of city public passenger transport is realized by construction of interlevel interrelations and establishment of methodical regulations for coordinating the parameters of quality management of public transport service with the indicators of its utility perception. **Findings.** The presented logical sequence of population mobility formation is based on reproduction of the general conditions of increasing transport service utility due to step-by-step realization of control actions that makes it possible to establish conditions of their expediency and parameterization. A model of marginal utility has been developed to qualitatively assess the technological utility of urban public passenger transport. It is presented in the form of a category that reproduces the relationship between the result of changes in the quality of transport services, consumer utility of transport services and the level of resources used. **Originality.** The procedure for assessing the consumer utility of urban public passenger transport has been formalized, which, in contrast to the existing ones, is based on the established impact of technological parameters of routes on the formation of population mobility and ensures accounting of transport service quality indicators in determining the technological utility. **Practical value.** The application of the theory of utility in improving the operation of urban public passenger transport in general contributes to the development of the theory of passenger traffic management and can significantly increase the effectiveness of the choice of rational management measures to improve technological processes and the quality of transport services. The conditions for the formation of a positive impact of consumer utility of urban passenger transport on the mobility of the urban population are established. Based on the selected connection, it is possible to form a system of parameters for assessing the quality of public transport services.

Keywords: urban public passenger transport; transport service utility; transport service quality; population mobility; function of technological marginal utility management

REFERENCES

1. Andreev, K. P. (2017). Improvement of the city route network. *Reliability & Quality of Complex Systems*, 3(19), 102-106. DOI: <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2017-3-15> (in Russian)
2. Donchenko, V., & Filippova, R. (2018). Analysis of theoretical approaches to estimation of economic valuation of travel time variability and the value of travel time savings of urban passenger transport. *Vestnik universiteta*, 5, 95-103. DOI: <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2018-5-95-103> (in Russian)
3. Ivanov, I. E., & Rohalskyi, R. B. (2015). Definition of usefulness of public passenger transport system. *Science Rise*, 6/2(11), 30-33. DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.43327> (in Ukrainian)
4. Shtotskaya, A. A., & Mikhailov, A. Y. (2017). Disaggregated model-based assessment of population transport mobility. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 21(5(124)), 199-207. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-5-199-207> (in Russian)
5. Dyer, J. S. (2016). Multiattribute Utility Theory (MAUT). In *Multiple Criteria Decision Analysis* (pp. 285-314). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_8 (in English)
6. Hirsh, J. B., Lu, J. G., & Galinsky, A. D. (2018). Moral Utility Theory: Understanding the motivation to behave (un)ethically. *Research in Organizational Behavior*, 38, 43-59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riob.2018.10.002> (in English)

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

7. Ivanov, I. (2021). The structure of the model of transition of states of quality of transport service of passengers. In The VIII International Science Conference «*Problems and tasks of modernity and approaches to their solution*» (pp. 245-248). DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.I.VIII> (in English)
8. Keller, C., Struwe, S., Titov, W., & Schlegel, T. (2019). Understanding the usefulness and acceptance of adaptivity in smart public transport. In *HCII: International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 307-326). DOI: <https://doi.org/10.1680/jinam.19.00071> (in English)
9. Kłos-Adamkiewicz, Z. (2018). Value of services for passenger in public transport – theoretical approach. *European Journal of Service Management*, 25, 125–131. DOI: <https://doi.org/10.18276/ejsm.2018.25-15> (in English)
10. Lee, R. J., & Sener, I. N. (2016). Transportation planning and quality of life: Where do they intersect? *Transport Policy*, 48, 146-155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.03.004> (in English)
11. Papathanasiou, N., & Adey, B. T. (2020). Usefulness of quantifying effects on rail service when comparing intervention strategies. *Infrastructure Asset Management*, 7(3), 167-189. DOI: <https://doi.org/10.1680/jinam.19.00071> (in English)
12. Świdorski, A., Józwiak, A., & Jachimowski, R. (2018). Operational quality measures of vehicles applied for the transport services evaluation using artificial neural networks. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 20(2), 292-299. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2018.2.16> (in English)
13. Vdovychenko, V. (2017). Fuzzy productive model of sustainable development of urban public passenger transport. *Automobile Transport*, 41, 91-95. DOI: <https://doi.org/10.30977/at.2219-8342.2017.41.0> (in English)
14. Zhuk, M., Pivtorak, H., Kovalyshyn, V., & Gits, I. (2020). Development of a multinomial logit-model to choose a transportation mode for intercity travel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3(105)), 69-77. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205868> (in English)

Надійшла до редколегії: 09.11.2020

Прийнята до друку: 09.03.2021

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.35:338.47

В. О. ХАВРУК^{1*}, О. О. ПАРХОМЕНКО^{2*}

^{1*}Каф. «Технічна експлуатація автомобілів та автосервіс», Національний транспортний університет,
вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (095) 018 71 90, ел. пошта khavruk@gmail.com,
ORCID 0000-0002-4686-4109

^{2*}Каф. «Технічна експлуатація автомобілів та автосервіс», Національний транспортний університет,
вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (063) 438 03 52, ел. пошта olparkhom@gmail.com,
ORCID 0000-0002-4752-0148

Критерії оцінки й вибору рухомого складу АТП

Мета. За основну мету роботи поставлено провести аналіз та обґрунтування критеріїв оцінки й вибору рухомого складу – вантажних автомобілів автотранспортних підприємств – на підставі огляду наукових досліджень із цієї проблематики. **Методика.** Дослідження виконано з використанням таких загальних методів: абстрагування й конкретизація, аналіз, синтез, індукція, дедукція. **Результати.** Установлено, що основними ознаками класифікації критеріїв оцінки й вибору рухомого складу є: кількість факторів (розрізняють одиничні й комплексні критерії); рівень залежності (можливо виділити повністю залежні від зовнішніх умов експлуатації, частково залежні й незалежні критерії); характер (кількісні та якісні критерії); кількісне значення (абсолютні й відносні критерії). Обґрунтовано практичний підхід під час вибору парку рухомого складу для АТП за такими факторами: характер і структура вантажопотоку; об’ємна маса й партійність вантажу; дорожні умови; забезпечення максимальної швидкості й безпеки руху; забезпечення мінімальних витрат, пов’язаних із перевезенням вантажів. Представлено схему критеріїв вибору рухомого складу та з’ясовано п’ять етапів, які встановлюють послідовність оцінки й вибору автотранспортних засобів: 1) аналіз умов перевезень і характеристики вантажу; 2) вибір вантажопідйомності автомобіля; 3) аналіз пристосованості конструкції до дорожніх умов; 4) аналіз техніко-експлуатаційних властивостей автомобілів; 5) техніко-економічна оцінка автомобілів, відібраних на перших чотирьох етапах, яка може бути виконана за різними критеріями. Доцільність зведення різних критеріїв в один комплексний показник якості виконано в графічній інтерпретації. З’ясовано, що техніко-економічну оцінку автомобілів здійснюють на основі критеріїв: продуктивність автомобіля; трудомісткість використання автомобіля; енергоємність перевезень; металоємність перевезень. **Наукова новизна.** Виконаний аналіз критеріїв дав змогу сформулювати методику оцінки й вибору автотранспортних засобів, а використовувати при цьому критерії звести до структурованої схеми, яка враховує основну мету – отримання максимального прибутку від транспортної роботи й мінімізацію експлуатаційних витрат. **Практична значимість.** Результати виконаного дослідження можуть бути використані автотранспортними підприємствами під час вибору нових вантажних автомобілів на етапах закупівлі, відповідно до практичного досвіду перевезень різного роду вантажів.

Ключові слова: автотранспортне підприємство (АТП); автотранспортний засіб (АТЗ); вантаж; критерій; рухомий склад (РС)

Вступ

Послуги з перевезення різних вантажів є досить затребуваними. Між перевізниками існує висока конкуренція й «боротьба» за кожного потенційного клієнта. У свою чергу замовник

послуг із перевезення різного роду вантажів постає перед широким вибором серед суб’єктів підприємництва – автотранспортними підприємствами (АТП), які мають у своєму розпорядженні рухомий склад (РС) – вантажні автомобілі необхідної вантажопідйомності, що най-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

більш пристосовані для виконання певної транспортної роботи.

Автотранспортні підприємства в Україні через фінансові обмеження не можуть постійно оновлювати наявний рухомий склад, орієнтуючись виключно на процеси вдосконалення та появу нових моделей вантажних автомобілів. За таких умов для АТП досить актуальним питанням є вибір «оптимальних» моделей вантажних автомобілів для здійснення комерційної діяльності, а тому в доповнення до основних критеріїв вибору автомобіля – «ціна» та «вартість експлуатації», доцільно сформулювати й проаналізувати інші критерії, за якими можливо стверджувати про ефективність / неефективність РС.

Проблемам оцінки ефективності експлуатації РС АТП приділили велику увагу, такі науковці, як О. О. Бачурин, В. П. Бичков, М. М. Бочкарьова, О. В. Вельможин, В. О. Гудков, О. В. Куликов, В. А. Мигачов, Л. Б. Миротин, М. В. Пеньшин, Л. Г. Резник, А. Х. Фасієв.

У наукових роботах, дослідження проблеми підвищення ефективності експлуатації автомобілів здійснено у двох основних напрямках:

- 1) аналіз і розрахунок загальних показників виробничо-господарської діяльності АТП [1, 3];
- 2) кількісна оцінка якості транспортних послуг [10, 15] і тенденцій розвитку [17–20].

Комплексне дослідження проблеми ефективності експлуатації, критеріїв оцінки й вибору РС на прикладі вантажних автомобілів здійснив у дисертаційній роботі В. А. Мигачов [9].

Мета

За основну мету роботи поставлено виконати аналіз та обґрунтування критеріїв оцінки й вибору РС АТП на підставі огляду наукових досліджень із цієї проблематики.

Методика

Під час вибору й оцінки РС АТП використовують сукупність критеріїв, які можна класифікувати за різними ознаками залежно від вирішуваного завдання. Критерії можуть бути класифіковані таким чином [9]:

- за кількістю факторів, які враховують: одиничні (часткові) та комплексні (узагальнені);
- за рівнем залежності: повністю залежні від зовнішніх умов експлуатації, частково залежні й незалежні;
- за характером: кількісні та якісні;
- за кількісним значенням: абсолютні та відносні.

У роботі [5] під час оцінки й вибору парку рухомого складу рекомендують керуватися тим, щоб рухомий склад найбільшою мірою відповідав:

- характеру та структурі вантажопотоку;
- об'ємній масі й партійності вантажу;
- дорожнім умовам;
- забезпеченню максимальної швидкості й безпеки руху;
- забезпеченню мінімальних витрат, пов'язаних із перевезенням вантажів.

Схема вибору рухомого складу з урахуванням зазначених умов представлена на рис. 1.

Загальна послідовність оцінки й вибору автотранспортних засобів за цією методикою [5] складається з так основних етапів:

1) аналіз умов перевезень і характеристики вантажу. Оціночними критеріями на цьому етапі є тип кузова (бортова платформа, цистерна, фургон) і його місткість. Тип кузова визначають родом вантажу – його фізичними властивостями, щільністю, типом і формою тари й т. д.;

2) вибір вантажопідйомності автомобіля (основний критерій), яку визначають обсягом і партійністю перевезень. Загальне правило полягає в тому, що під час перевезення дрібнопартійних вантажів застосовують автомобілі малої вантажопідйомності, а в разі великого й постійного вантажопотоку – переважно спеціалізовані й великовантажні автомобілі;

3) аналіз пристосованості конструкції до дорожніх умов. Тут виділяють автомобілі загального призначення (дорожня група А), підвищеної прохідності (дорожня група Б), позашляхові автомобілі. На важкопрохідних дорогах важливим критерієм вибору є прохідність, на дорогах із твердим, але нерівним покриттям – плавність ходу, на гірських дорогах, що мають значні ухили, – динамічність і гальмівні властивості. На вдосконалених дорогах обмежують повну масу транспортного засобу й наванта-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ження на одну вісь за умовами вантажопідйомності штучних споруд і міцності дорожнього покриття, можуть бути обмеження за габаритами рухомого складу;

4) аналіз техніко-експлуатаційних властивостей автомобілів;

5) техніко-економічна оцінка автомобілів, відібраних на перших чотирьох етапах, яка може бути виконана за різними критеріями.

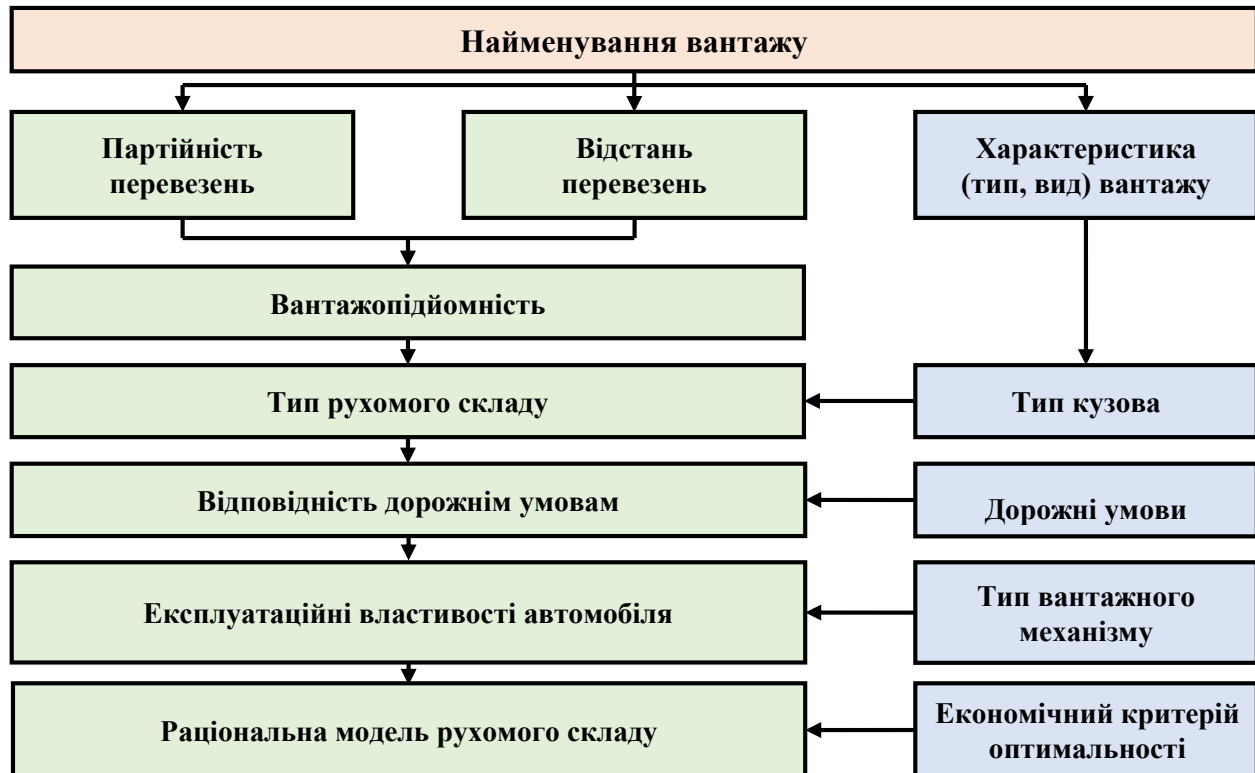


Рис. 1. Схема й критерії вибору рухомого складу [7]

Fig. 1. Scheme and criteria for selecting rolling stock [7]

Наприклад, найбільш поширена методика вибору універсальної моделі автотранспорту для перевезення масових вантажів за критеріями продуктивності й собівартості. Для перевезення вантажів із використанням спеціалізованого рухомого складу керуються критерієм собівартості перевезень [5, 6]. Під час вибору автосамоскида для розробки порід у кар'єрах використовують критерій собівартості експлуатації й транспортування. У разі оцінки та вибору спеціалізованого й універсального рухомого складу визначають рівноважний стан перевезення, спираючись на критерій продуктивності й собівартості перевезення [12]. На транспортно-експедиційних підприємствах першочерговими критеріями оцінки й вибору автотранспортних засобів (АТЗ) є деякі техніко-експлуатаційні параметри транспортного про-

цесу [4, 7, 8]. Для РС такими критеріями є: технічна і експлуатаційна швидкість; габаритні розміри вантажних місткостей і самих транспортних засобів; повна маса, навантаження на осі; потужність двигуна (силових установок); вантажопідйомність і габаритні розміри причепів, напівпричепів і т. под.

Схожістю усіх цих методик оцінки й вибору АТЗ є оцінка рухомого складу за окремими показниками його роботи залежно від конкретних техніко-експлуатаційних властивостей. Крім того, у них не враховуються якісні характеристики перевезень [2, 5, 13]: мінімальний час доставки; мінімум ризику несвоєчасної доставки (надійність перевезення); максимум перевізної здатності транспорту (можливість перевезти необхідні об'єми вантажу); готовність до перевезення у будь-який час і можливість забезпе-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

чення перевезень у різних умовах (доступність транспортних послуг, їх незалежність від погодних, кліматичних, часових і просторових характеристик); мінімум втрат вантажу під час перевезення (збереження товару, його захищеність від втрат, псування, ушкоджень і розкращань у ході транспортування й перевантажувальних операцій).

Ці вимоги до автомобілів [5], які використовують для перевезення вантажів, можна оцінити узагальненим критерієм – коефіцієнтом ефективності перевізного процесу, що становить відношення витрат, пов'язаних із задоволенням потреб клієнтів автотранспортних підприємств у перевезенні вантажів до фактичних витрат:

$$K_{\text{еп}} = \frac{[(S_{\text{пв}} + S_{\text{нр}} + S + S_x) \cdot W_Q - R_3]}{[(S_{\text{пв}} + S_{\text{нр}} + S + S_x) \cdot W_Q + R_1 + R_2 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10}]}, \quad (1)$$

де $S_{\text{пв}}$ – собівартість підготовки вантажу до перевезення, грн/т; $S_{\text{нр}}$ – собівартість навантажувально-розвантажувальних робіт, грн/т; S – собівартість транспортування, грн/т; S_x – собівартість складування вантажу, грн/т; W_Q – обсяг транспортної роботи, ткм; R_1 – витрати, пов'язані зі збільшенням відстані транспортування, грн; R_2 – витрати через невідповідність автомобіля роду й характеру вантажу, який перевозять, грн; R_3 – витрати, пов'язані з пошкодженням і втратою вантажу, грн; R_4 – витрати, пов'язані з виконанням додаткових навантажувально-розвантажувальних робіт, грн; R_5 – витрати, пов'язані з додатковим зберіганням вантажу, грн; R_6 – витрати, пов'язані з інерційністю перевізного процесу, грн; R_7 – витрати, пов'язані зі збільшенням собівартості перевізного процесу, грн; R_8 – витрати, пов'язані зі збільшенням собівартості навантажувально-розвантажувальних робіт, грн; R_9 – витрати, пов'язані зі збільшенням собівартості підготовки вантажу до перевезення, грн; R_{10} – витрати, пов'язані зі збільшенням собівартості складування, грн.

Але запропонований критерій не враховує споживчих властивостей автомобілів. Він оцінює перевізний процес у цілому й не дозволяє робити вибір конкретної моделі автомобіля.

Орієнтуючись на його значення, важко зробити висновки про кількісне задоволення потреби клієнтів у перевезенні вантажів. Також він є безрозмірним, що не дає можливості оцінювати ефективність автомобілів у грошовому еквіваленті.

Оцінку споживчих властивостей автомобілів враховують у методиці, запропонований авторами в роботі [11]. За цією методикою спочатку виділяють десять комплексних критеріїв оцінки: ідентифікація АТЗ (тип кузова й вантажопідйомність), наявність нормативно-технічної документації, технічні дані автомобіля, суб'єктивна оцінка АТЗ, суб'єктивна оцінка АТЗ у процесі експлуатації, оцінка АТЗ у процесі експлуатаційних випробувань (паливна економічність, надійність, екологічність), експлуатаційні й виробничо-економічні показники роботи автомобілів, оцінка рівня сервісного обслуговування АТЗ, оцінка можливості й умов придбання АТЗ, оцінка участі у виставках, рейтингах, салонах, презентаціях. Оскільки техніко-експлуатаційні властивості (ТЕВ), що належать до перелічених комплексних критеріїв, мають різний фізичний сенс і розмірність, автори [11] розробили моделі, які дозволяють зводити критерії до одного диференціального (2) або інтегрального (3) показника якості:

$$Y_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n [V_{ij}]^{W_{ij}}}; \quad (2)$$

$$E = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m [Y_{ij}]^{W_{ij}}}; \quad (3)$$

де Π – ваговий коефіцієнт показника ефективності автомобіля; V_{ij} – i -й показник ефективності j -го рівня; W_{ij} – величина степеня i -го показника ефективності j -го рівня; m – кількість вагових коефіцієнтів; n – кількість диференціальних показників якості.

Запропонований критерій охоплює великий комплекс часткових показників, що характеризують автомобіль як транспортний засіб, вирішує завдання оцінки споживчих властивостей у сукупності з техніко-експлуатаційними властивостями автомобілів. Але моделі зведення комплексних критеріїв до порівнянного виду вимагають використання складного математичного апарату, розробки специфічних класифікацій

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

техніко-експлуатаційних властивостей, що впливають на кінцевий показник якості, залучення експертів для суб'єктивної оцінки споживчих властивостей.

Зведення різних критеріїв в один комплексний або інтегральний показник якості посідає особливе місце в методиках оцінки автотранспортних засобів під час їх вибору, чому велику увагу приділено в роботах [14, 16]. Тут варто виділити «метод радара» й «метод профілів», у яких кількісні та якісні критерії інтегруються в безрозмірний показник – коефіцієнт якості $K_{я}$, що дорівнює відношенню площі радара або профілю, побудованого всередині оцінного поля. При цьому можна використовувати технічні, економічні, нормативно-правові та інші критерії оцінки. Приклад радара якості представлений на рис. 2.

Коефіцієнт якості $K_{я}$ розраховують як [9]:

$$K_{я} = \frac{S_p}{S} = \left[(x_1 y_1 + (x_1 - x_2)(y_1 - y_2) + \dots + (x_{n-2} - x_{n-1})(y_{n-2} - y_{n-1}) + x_{n-1} y_{n-1}) \right] / 2\pi \cdot r_1^2, \quad (4)$$

де S_p – площа радара, мм²; S – загальна площа оцінного кола, мм²; x_i, y_i – координати вершин радара, мм; n – число техніко-економічних показників автомобіля, узятих для оцінки якості; r_1 – радіус оцінного кола, мм.

Радари автомобілів-конкурентів будують на аналогічному колі. Для підвищення змістовності показники рекомендовано групувати за схожими ознаками, а радіальні шкали градуювати так, щоб найкращі показники серед порівнюваних моделей були розміщені по колу. За великої кількості показників побудова й розрахунок площі радара є трудомістким процесом, тоді використовують простіший метод – профілів. Профілем називається графічне зображення вибраних критеріїв оцінки автотранспортних засобів на прямокутному полі (рис. 3).

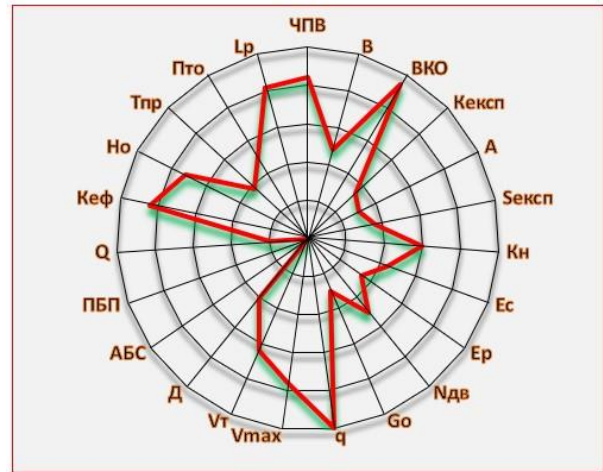


Рис. 2. Радар якості вантажного автомобіля загальноназначеного призначення МАЗ 5550:

ЧПВ – чиста поточна вартість, тис. грн;
В – вартість автомобіля, тис. грн;
ВКО – внутрішній коефіцієнт окупності, %; Кексп – сукупні капіталовкладення в експлуатації, тис. грн;
А – частка експорту в обсязі випуску, %;
Сексп – експлуатаційні витрати, грн/ткм;
Кн – міра відповідності нормативно-правовим документам, %; Ес – естетичність, бали;
Ер – ергономічність, бали; Ндв – потужність двигуна, к.с.;
Go – маса спорядженого автомобіля, кг;
q – вантажопідйомність, т; Vmax – максимальна швидкість, км/год; Vt – середня технічна швидкість, км/год;
Д – динамічний фактор; АБС, ПБП – наявність відповідно антиблокувальної системи й протитупірувального пристрою; Q – витрата палива, л/100 км; Кеф – коефіцієнт ефективності;
Ho – напрацювання на ремонт, км; Тпр – питома трудомісткість РР, люд.-год/1000 км; Пто – періодичність ТО–2, тис. км; Lp – ресурс автомобіля тис. км

Fig. 2. Quality radar of general purpose truck MAZ 5550:

ЧПВ – net present value, thous. UAH; В – cost of the car, thous. UAH; ВКО – internal return ratio, %; Кексп – related investments in operation, thous. UAH; А – exports share in output, %; Сексп – operating costs, UAH/tkm; Кн – measure of compliance with regulatory documents, %; Ес – aesthetics, points; Ер – ergonomics, points; Ндв – engine power, hp; Go – weight of the equipped car, kg; q – load capacity, t; Vmax – maximum speed, km/h; Vt – average technical speed, km/h; Д – ability rating; АБС, ПБП – ABS, ASR respectively; Q – fuel consumption, l/100 km; Кеф – efficiency factor; Ho – operating time till repairs, km; Тпр – specific labor intensity of current repair, man-hours/1000 km; Пто – interval between maintenance 2, thous. km; Lp – car service life thous. km.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

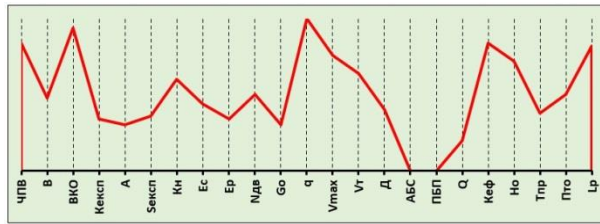


Рис. 3. Радар якості (розгорнутий вид)
вантажного автомобіля загальнотранспортного
призначення МАЗ 5550

Fig. 3. Quality radar (expanded view)
of general purpose truck MAZ 5550

Коефіцієнт якості автомобіля методом профілів визначають як відношення площі отриманого профілю й оцінного прямокутного поля за формулою [9]:

$$K_{\text{я}} = \frac{S_{\text{пр}}}{S} = \frac{\frac{x_1}{2} + x_2 + x_3 + \dots + x_{n-1} + \frac{x_n}{2}}{n-1}. \quad (5)$$

Але ці комплексні критерії мають ті ж недоліки, що й коефіцієнт ефективності перевезень, зокрема не дозволяють зробити висновки про кількісне задоволення потреби клієнтів у перевезенні вантажів, не дають можливості оцінювати ефективність експлуатації автомобілів у грошовому еквіваленті.

Ці недоліки вирішують у методиках техніко-економічної оцінки автотранспортних засобів [13; 14]. Наприклад, запропоновано використати під час оцінки й вибору автотранспортних засобів такий критерій, як величина економічного ефекту, яку визначають як різницю порівнянних зведених річних витрат:

$$E = (C_1 + E_H \cdot K_1) - (C_2 + E_H \cdot K_2), \quad (6)$$

де C_1 , C_2 – поточні річні виробничі витрати варіантами 1 і 2; K_1 , K_2 – капітальні вкладення за варіантами, грн; E_H – коефіцієнт зведення капітальних вкладень за варіантами до поточних річних виробничих витрат.

На основі наведеної залежності (6) виділено ще ряд критеріїв, якими можна оперувати під час оцінки й вибору автотранспортних засобів: коефіцієнт порівняльної економічної ефективності додаткових капітальних вкладень E_p , термін окупності додаткових капітальних вкладень економією за рахунок зниження собівартості продукції (роботи) T_p , коефіцієнт госпрозраху-

нкової ефективності E_x , народногосподарський економічний ефект і зведений госпрозрахунковий ефект, ряд інших показників.

Важливою особливістю критеріїв є те, що тут акцент зроблено на комплексну оцінку економічних, соціальних та екологічних чинників і врахування їх специфіки під час вибору найбільш ефективного рішення з альтернативних варіантів. Це необхідні умови підвищення соціально-економічної ефективності роботи автомобільного транспорту. У цілому пропонується методика оцінки автотранспортних засобів під час їх вибору складається з таких етапів [9, с. 44]:

1) вибір бази порівняння – показники порівняльної економічної ефективності визначають як відносні величини, тому їх абсолютне значення залежить від того, з якими іншими варіантами техніки виконують порівняння;

2) вибір та обґрунтування критеріїв, за якими буде визначено порівняльну економічну ефективність. Наприклад, показник E_p характеризує порівняльну народногосподарську економічну ефективність додаткових капітальних вкладень;

3) зведення використовуваних критеріїв оцінки до порівняльного виду. Це пояснюється тим, що якісно різномірні показники (єдиначасові і постійно повторювані поточні витрати) не можна сумувати або віднімати один від одного без попереднього зведення до однакової якості;

4) виявлення техніко-економічних і соціальних показників, на які вплине вибір певної моделі автотранспортного засобу;

5) урахування фактора часу, продиктованого необхідністю відображення в розрахунках нерівноцінності для суспільства витрат і результатів виробництва, здійснюваних у різні моменти часу;

6) виконання умови економічної порівняльності варіантів, можливої за дотримання тотожності корисних результатів;

7) вибір найбільш вигідного рішення, за якого величина зведених витрат найменша або народногосподарський економічний ефект найбільший.

Важливою особливістю пропонуєваних критеріїв і методики оцінки автотранспортних засобів є їх універсальність, тобто застосовність

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

як на всьому життєвому циклі автомобіля, так і на окремих його етапах, залежно від витрат, які враховують у розрахунках. Але ця методика оперує тільки економічними показниками ефективності автомобілів і не враховує їхні конкретні конструктивні й експлуатаційні показники.

Під час розробки й експлуатації автомобілів велику увагу необхідно приділяти техніко-економічній оцінці. Її здійснюють на основі таких критеріїв: продуктивність автомобіля; трудомісткість використання автомобіля; енергоємність перевезень; металоемність перевезень. В основу методу була покладена всебічна оцінка досконалості конструкції автомобіля шляхом теоретичного й експериментального встановлення кількісних значень вимірників його експлуатаційних якостей і на цій основі визначення кількісного значення кінцевого техніко-економічного критерію його ефективності – зведених питомих витрат на перевезення (B_{Π}):

$$B_{\Pi} = \frac{C_E + 0,1 \cdot [K + 0,1 \cdot (B_a + B_{\Pi})] \cdot 100}{W_p}, \quad (7)$$

де C_E – собівартість експлуатації, грн; K – капітальні витрати, грн; B_a – ліквідна вартість автомобіля, грн; B_{Π} – ліквідна вартість причепа, грн; W_p – річна продуктивність автомобіля (автопоїзда), ткм.

Особливістю цієї методики оцінки й вибору автотранспортних засобів є системний зв'язок між елементами конструкції автомобіля, експлуатаційними якостями та ефективністю його використання. Але ця методика була розроблена для планової економіки. Використовувані методи розрахунку статей собівартості експлуатації автомобілів ґрунтувались на жорстких нормативах витрати грошових і матеріальних ресурсів транспортних підприємств. Нині багато з них застаріли або відсутні взагалі для сучасних автомобілів, особливо іноземного виробництва.

Питання техніко-економічної оцінки вантажних автомобілів у ринкових умовах детально висвітлені в роботах [13, 14]. Наведено методи оцінки економічної ефективності вантажних автомобілів як товарного продукту і для виробника, і для споживача, причому як у статично-

му вираженні, так і в динаміці грошових потоків під час виробництва й експлуатації автомобілів. Автори стверджують, що на практиці не виключені варіанти, коли автомобіль приносить прибуток виробникові і збитки споживачеві й навпаки, при цьому сумарний річний народногосподарський економічний ефект (6) може бути позитивним. У той же час кожен господарюючий суб'єкт передусім дбає про свої корпоративні інтереси, тому критерій оцінки під час вибору автомобілів «народногосподарський економічний ефект» не застосовний у ринкових умовах.

Пропонуємо як один з оцінних критеріїв ефективності автомобіля для виробника використати цільову функцію, яка являє собою прибуток і ринкову вартість автомобіля та враховує попит на нього й експлуатаційні витрати:

$$\Pi_{pi} = \left[B_i - S_i - E_H \cdot \frac{K_{pi}}{N_{pi}} \right] \cdot N_{pi} \Rightarrow \max, \text{ грн}, \quad (8)$$

де B_i – ринкова вартість, за якою може бути реалізований автомобіль i -го варіанта, грн/шт.; S_i – собівартість i -го варіанта автомобіля (з урахуванням витрат на реалізацію), грн/шт.; E_H – коефіцієнт економічної ефективності фірми, еквівалентний таким величинам, як вартість капіталу, ставка дисконтування й т. под., який розраховують індивідуально для конкретного проекту; N_{pi} – річний обсяг реалізації i -го варіанта автомобіля, який визначають на основі маркетингових досліджень.

Основний критерій під час оцінки автомобіля в експлуатації в ринкових умовах [13, 14] – річні питомі експлуатаційні витрати:

$$S_{num_i} = \frac{[S_{експ_i} + E_H \cdot (B_i + K_{експ_i})]}{W_i} \Rightarrow \min, \text{ грн}, \quad (9)$$

де $S_{експ_i}$ – річні експлуатаційні витрати i -го варіанта автомобіля без урахування амортизації, грн/рік; $K_{експ_i}$ – капітальні вкладення на експлуатацію автомобіля i -го варіанта, грн; W_i – річна продуктивність i -го варіанта автомобіля, ткм; E_H – нормативна ефективність капітальних вкладень підприємства, що дорівнює цьому випадку зворотній величині терміну служби автомобіля.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Оцінка й вибір автомобілів за наведеними критеріями (6) – (9) передбачають поглиблене вивчення показників собівартості перевезень і продуктивності автомобілів.

Результати

Таким чином, наведений аналіз методик оцінки й вибору автотранспортних засобів і використовуваних при цьому критеріїв дозволив систематизувати знання, накопичені в цьому напрямі експлуатації автомобілів, і передбачити шляхи для подальшого його розвитку (рис. 4).

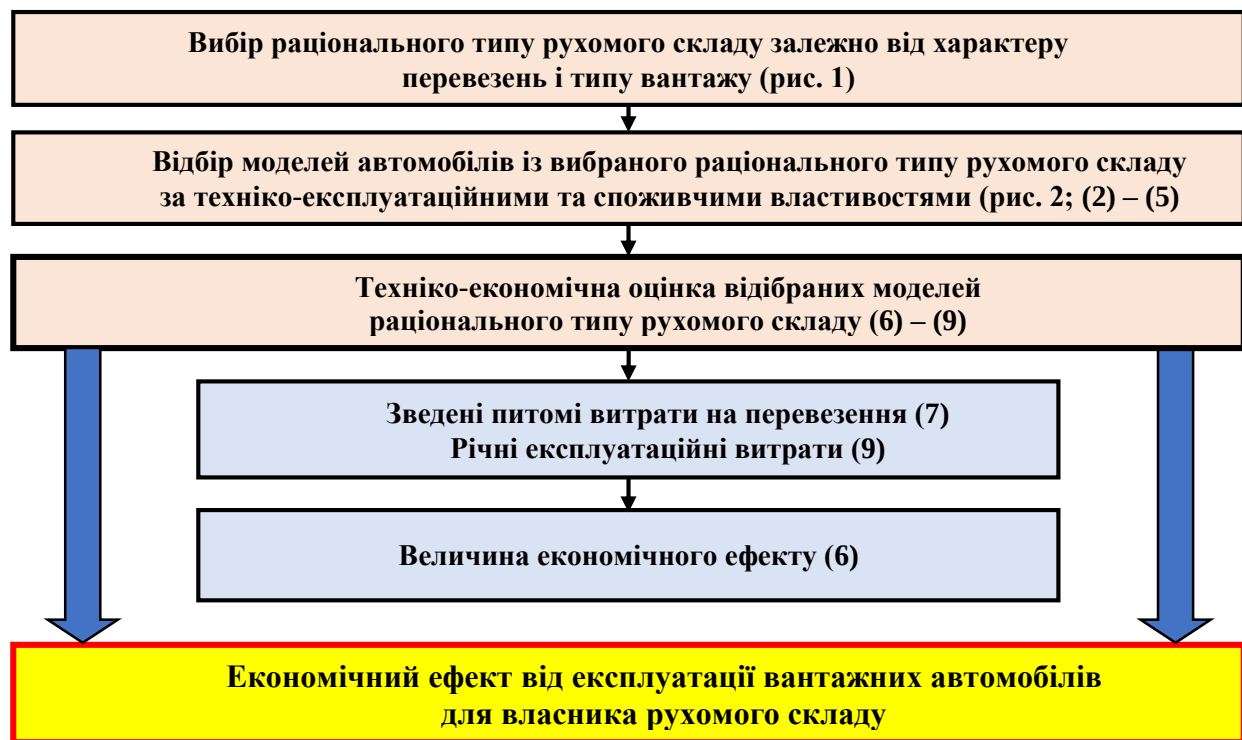


Рис. 4. Методика оцінки й вибору автотранспортних засобів і використовувані при цьому критерії

Fig. 4. Methods of selection and evaluation of vehicles and the criteria used

Із рис. 4 видно, що на стадії оцінки парку рухомого складу за техніко-експлуатаційними й споживчими властивостями наявні методики та критерії дозволяють здійснювати вибір типу автомобілів. На стадії техніко-економічної оцінки моделей автомобілів із вибраного типу рухомого складу ці критерії не повною мірою відповідають вимогам сучасного стану функціонування автотранспортної галузі, оскільки:

1) критерій «зведені питомі витрати на перевезення» не враховує задоволення потреби в перевезеннях для клієнтів АТП, не дає можливості оцінювати ефективність експлуатації автомобілів для конкретного перевізника, не

враховує особливостей сучасного стану автотранспортної галузі;

2) критерій «народногосподарський економічний ефект» не враховує інтересів конкретного перевізника, оскільки за додатного значення цього критерію його доходи можуть бути від’ємними;

3) критерій «прибуток для виробника автомобілів» тільки опосередковано відображає ефективність експлуатації, оскільки прибуток виробника можливий і за наявності збитків у транспортних організаціях;

4) критерій «річні експлуатаційні витрати» не дає можливості оцінити, чи окупиться експлуатація автомобілів.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

плуатація автомобілів і який прибуток при цьому матиме АТП.

Таким чином, не розглянуто критерій оцінки, на який може орієнтуватися власник рухомого складу для остаточного вибору автомобілів. Оскільки РС оновлюють різномарочними транспортними засобами, гостро постає питання про їх вибір під час оновлення парку АТП. У цій ситуації кінцевим критерієм оцінки під час вибору моделі автомобіля може бути «прибуток власника рухомого складу», який у сукупності з відомими критеріями дозволить раціонально вибирати автомобілі, що повною мірою відповідають сучасному стану автотранспортної галузі, тому що:

1) із підвищенням прибутку власника рухомого складу підвищується рентабельність транспортних підприємств, і додаткові кошти можуть бути спрямовані на їх розвиток;

2) це, у свою чергу, призводить до підвищення ефективності перевезень.

Наукова новизна та практична значимість

У напрямі підвищення ефективності експлуатації автомобільного транспорту визначено головний резерв – оновлення парку рухомого складу моделями автомобілів, що приносять максимальний прибуток їх власникам. У зв'язку з цим постає завдання оцінки величини можливого прибутку або мінімізації експлуатаційних витрат певної моделі автомобіля під час оновлення парку. Його вирішення дозволить власникам вибирати найбільш раціональні вантажні автомобілі на етапі комплексної техніко-економічної оцінки, що в цілому може підвищити ефективність експлуатації автомобілів.

Висновки

Отже, аналіз питання ефективності експлуатації РС, зокрема в частині розгляду критеріїв оцінки й вибору рухомого складу АТП, дає змогу сформулювати такі висновки:

1) класифікацію критеріїв здійснюють за чотирма ознаками: за кількістю факторів, за рівнем залежності, за характером, за кількісним значенням;

2) під час вибору рухомого складу – вантажних автомобілів – основними для виконання транспортної роботи є такі показники, як партійність перевезень, відстань перевезень, характеристика вантажу;

3) під час перевезення «специфічних» вантажів найголовнішим критерієм є собівартість перевезень;

4) для перевезення насипних вантажів або на кар'єрних розробках використовують критерій собівартості експлуатації й транспортування;

5) для транспортно-експедиційних підприємств основними критеріями оцінки й вибору АТЗ є такі техніко-експлуатаційні параметри, як технічна й експлуатаційна швидкість, габаритні розміри вантажних місткостей і самих транспортних засобів, повна маса, навантаження на осі, потужність двигуна, вантажопідйомність і габаритні розміри причепів, напівпричепів;

6) у більшості методик оцінки й вибору АТЗ не враховано такі якісні показники транспортної роботи, як мінімальний час доставки, мінімум ризику несвоєчасної доставки, максимум перевізної здатності транспорту, готовність до перевезення у будь-який час і можливість забезпечення перевезень у різних умовах, які можна оцінити узагальненим критерієм – коефіцієнтом ефективності перевізного процесу (1);

7) споживчі властивості автомобілів характеризуються десятьма комплексними критеріями оцінки, серед яких ідентифікація, суб'єктивна оцінка в процесі експлуатації, оцінка рівня сервісного обслуговування;

8) коефіцієнт якості дає можливість поєднати кількісні та якісні критерії у графічній інтерпретації – радарі якості;

9) техніко-економічна оцінка містить такі критерії, як продуктивність автомобіля, трудомісткість використання автомобіля, енергоємність перевезень, металоемність перевезень;

10) під час вибору моделей вантажних автомобілів для АТП основною метою є отримання максимального прибутку від транспортної роботи й мінімізація експлуатаційних витрат.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бачурин А. А. *Анализ производственно-хозяйственной деятельности автотранспортных организаций* : учеб. пособие для вузов. 4-е изд., испр. и доп. Москва : Изд-во Юрайт, 2021. 296 с.
2. Будрина Е. В. *Проблемы формирования и управления развитием регионального рынка транспортных услуг*. Санкт-Петербург, 2002. 276 с.
3. Бычков В. П. *Экономика автотранспортного предприятия* : учебник. Москва : Инфра-М, 2014. 384 с.
4. Вахламов В. К. *Техника автомобильного транспорта : Подвижной состав и эксплуатационные свойства* : учеб. пособие. Москва : Академия, 2004. 522 с.
5. Вельможин А. В., Гудков В. А., Миротин Л. Б., Куликов А. В. *Грузовые автомобильные перевозки*. Москва : Горячая линия – Телеком, 2006. 560 с.
6. Горев А. Э. *Грузовые автомобильные перевозки* : учеб. пособие. Москва : Изд. центр «Академия», 2013. 288 с.
7. Горев А. Э. *Теория транспортных процессов и систем* : учебник. 3-е изд., испр. и доп. Москва : Изд-ство Юрайт, 2021. 193 с.
8. Лукинский В. С., Лукинский В. В., Плетнева Н. Г. *Логистика и управление цепями поставок* : учебник. Москва : Изд-во Юрайт, 2021. 359 с.
9. Мигачев В. А. *Повышение эффективности использования грузовых автомобилей на основе выбора наиболее рационального парка подвижного состава* : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, Ульяновск, 2012. 137 с.
10. Пеньшин Н. В. *Эффективность и качество как фактор конкурентоспособности услуг на автомобильном транспорте* : монография. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. 224 с.
11. Ременцов А. Н., Зенченко В. А., Чернышов А. Е. К вопросу оценки качества и конкурентоспособности грузовых автотранспортных средств. *Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта* : Материалы 65-ой науч.-метод. и науч.-исслед. конф. МАДИ (ГТУ). Москва : МАДИ (ГТУ), 2007. С. 66–83.
12. Савин В. И., Щур Д. Л. *Перевозки грузов автомобильным транспортом* : справочное пособие. Москва : Изд-во «Дело и Сервис», 2014. 304 с.
13. Фасхиев Х. А., Крахмалева А. В., Сафарова М. А. *Конкурентоспособность автомобилей и их агрегатов*. Набережные Челны, 2005. 152 с.
14. Фасхиев Х. А., Нуретдинов Д. И. *Экономическая эффективность, качество и конкурентоспособность транспортных средств* : учеб. пособие. Набережные Челны, 2009. 152 с.
15. Хмельницкий А. Д. *Экономика и управление на грузовом автомобильном транспорте* : учеб. пособие. Москва : Изд-во Юрайт, 2021. 270 с.
16. Цыбульский А. И. Методика выбора подвижного состава автомобильного транспорта. *Сборник научных трудов СевКавГТУ. Серия «Экономика»*. 2008. № 7. С. 17–20.
17. Glaeser K.-P., Ritzinger M. A. Comparison of the Performance of Heavy Vehicles Results of the OECD Study : «Moving Freight with Better Trucks». *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 48. P. 106–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.992>
18. Liimatainen H., van Vliet O., Aplin D. The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis. *Applied Energy*. 2019. Vol. 236. P. 804–814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.017>
19. *The Future of Trucks Implications for Energy and the Environment*. OECD/IEA, 2017. 167 p.
20. Xu C., Guo K., Yang F. A Comparative study of Different Hybrid Electric Powertrain Architectures for Heavy-Duty Truck. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51. Iss 31. P. 746–753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.136>

V. O. KHAVRUK^{1*}, O. O. PARKHOMENKO^{2*}^{1*}Dep. «Motor Vehicle Maintenance and Service», National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (095) 018 71 90, e-mail khavruk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4686-4109^{2*}Dep. «Motor Vehicle Maintenance and Service», National Transport University, Mykhaila Omelianovycha-Pavlenka St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (063) 438 03 52, e-mail olparkhom@gmail.com, ORCID 0000-0002-4752-0148

Criteria for Selection and Evaluation of Rolling Stock of Motor Transport Enterprises

Purpose. The basic aim of the work is to analyze and substantiate the criteria for selection and evaluation of rolling stock – trucks of motor transport enterprises, based on scientific research on this issue. **Methodology.** The research was performed using general methods: abstraction and concretization, analysis, synthesis, induction, deduction. **Findings.** It is established that the main features of the classification of criteria for selection and evaluation of rolling stock are the number of factors (there are single and complex criteria); level of dependence (it is possible to single out completely dependent on external operating conditions, partially dependent and independent criteria); nature (quantitative and qualitative criteria); quantitative value (absolute and relative criteria). The practical approach at a choice of rolling stock fleet for the motor transport enterprise, proceeding from such factors, as character and structure of cargo flow; volumetric weight and batch of cargo; road conditions; ensuring maximum speed and traffic safety; ensuring the minimum costs associated with goods transportation. The scheme of criteria for the selection of rolling stock is presented and five stages are clarified, which establish the sequence of evaluation and selection of vehicles: 1) analysis of transportation conditions and cargo characteristics; 2) the choice of car capacity; 3) structure suitability analysis to the road conditions; 4) analysis of technical and operational properties of cars; 5) technical and economic evaluation of cars selected in the first four stages, which can be performed according to different criteria. The expediency of bringing different criteria into one complex quality indicator is performed in a graphical interpretation. It was found that the technical and economic evaluation of cars is based on the following criteria: car performance; the complexity of using the car; energy consumption of transportation; metal consumption of transportations. **Originality.** The analysis of the criteria for selection and evaluation of rolling stock allowed to form a method of selection and evaluation of vehicles and the criteria used in the form of a structured scheme that takes into account the main goal – to maximize profits from transport work and minimize operating costs. **Practical value.** The results of the study can be used by motor transport enterprises in the selection of rolling stock at the stages of purchase of new trucks, based on the practical experience of transportation of various types of goods.

Keywords: motor transport enterprise; motor vehicle; cargo; criterion; rolling stock

REFERENCES

1. Bachurin, A. A. (2021). *Analiz proizvodstvenno-khozyaystvennoy deyatel'nosti avtotransportnykh organizatsiy: uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt. (in Russian)
2. Budrina, Ye. V. (2002). *Problemy formirovaniya i upravleniya razvitiem regional'nogo rynka transportnykh uslug*. Saint Petersburg. (in Russian)
3. Bychkov, V. P. (2014). *Ekonomika avtotransportnogo predpriyatiya: uchebnyk*. Moscow: Infra-M. (in Russian)
4. Vakhlanov, V. K. (2004). *Tekhnika avtomobil'nogo transporta: Podvizhnoy sostav i ekspluatatsionnye svoystva: uchebnoe posobie*. Moscow: Akademiya. (in Russian)
5. Gorev, A. E. (2013). *Gruzovye avtomobilnye perevozki: uchebnoe posobie*. Moscow: Izdatelskiy tsentr «Akademiya». (in Russian)
6. Gorev, A. E. (2021). *Teoriya transportnykh protsessov i sistem*. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt. (in Russian)
7. Velmozhin, A. V., Gudkov, V. A., Mirotn, L. B., & Kulikov, A. V. (2019). *Gruzovye avtomobilnye perevozki*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom. (in Russian)
8. Lukinskiy, V. S., Lukinskiy, V. V., & Pletneva, N. G. (2021). *Logistika i upravlenie tsepyami postavok*. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt. (in Russian)
9. Migachev, V. A. (2012). *Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya gruzovykh avtomobiley na osnove vybora naibolee ratsional'nogo parka podvizhnogo sostava*. (PhD dissertation). Penza, Ulyanovsk, Russia. (in Russian)
10. Penshin, N. V. (2008). *Effektivnost i kachestvo kak faktor konkurentosposobnosti uslug na avtomobilnom transporte: monografiya*. Tambov: Izdatel'stvo Tambov State Technical University. (in Russian)
11. Rementsov, A. N., Zenchenko, V. A., & Chernyshov, A. Ye. (2007). K voprosu otsenki kachestva i konkurentosposobnosti gruzovykh avtotransportnykh sredstv. In *Problemy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta* (pp. 66-83). Moscow: MADI (GTU) Pbl. (in Russian)
12. Savin, V. I., & Shchur, D. L. (2014). *Perevozki gruzov avtomobilnym transportom*. Moscow: Izdatel'stvo Delo i Servis. (in Russian)
13. Faskhiev, Kh. A., Krakhmaleva, A. V., & Safarova, M. A. (2005). *Konkurentosposobnost avtomobiley i ikh agregatov. Naberezhnye Chelny*. (in Russian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

14. Faskhiev, Kh. A., & Nuretdinov, D. I. (2009). *Ekonomicheskaya effektivnost, kachestvo i konkurentosposobnost transportnykh sredstv*. Naberezhnye Chelny. (in Russian)
15. Khmelniyskiy, A. D. (2021). *Ekonomika i upravlenie na gruzovom avtomobilnom transporte*. Moscow: Yurayt, Publ (in Russian).
16. Tsybul'skiy, A. I. (2008). Metodika vybora podvizhnogo sostava avtomobilnogo transporta. *Sbornik nauchnykh trudov Syevyero-Kavkazskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo universiteta. Syeriya: Ekonomika*, 7, 17-20. (in Russian)
17. Glaeser, K.-P., & Ritzinger, M. A. (2012). Comparison of the Performance of Heavy Vehicles Results of the OECD Study: «Moving Freight with Better Trucks». *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 48, 106-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.992> (in English)
18. Liimatainen, H., van Vliet, O., & Aplyn, D. (2019). The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis. *Applied Energy*, 236, 804-814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.017> (in English)
19. *The Future of Trucks Implications for Energy and the Environment*. (2017). OECD/IEA. (in English)
20. Xu, C., Guo, K., & Yang, F. (2018). A Comparative study of Different Hybrid Electric Powertrain Architectures for Heavy-Duty Truck. *IFAC-PapersOnLine*, 51(31), 746-753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.136> (in English)

Надійшла до редколегії: 11.11.2020

Прийнята до друку: 12.03.2021

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

UDC 621.333:[629.423:004.942]

М. О. КОСТИН^{1*}, А. М. МУКХА^{2*}, О. Н. ШЕΙΚІНА^{3*}, О. Я. КУРЬЛЕНКО^{4*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryn, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37, e-mail nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

^{2*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryn, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37, e-mail andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryn, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37, e-mail sheikina.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-5367-2674

^{4*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryn, Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37, e-mail kyrilenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

Determination of Energy and Electric Capacity of On-Board Supercapacitor Regenerative Energy Storage

Purpose. Development of a method for determining the main functional parameters of on-board supercapacitor recuperative energy storage based on the asymptotic theory of extreme statistics by Gumbel, taking into account stochastic nature of changes in recuperated voltage and current. **Methodology.** To achieve this purpose, methods, devices and computer systems for temporary registration of recuperated voltages and currents on operating electric locomotives, methods of the theory of random processes and methods of probabilistic and statistical processing of registograms of voltages and currents were used. **Findings.** A computational and experimental method for estimating recuperative energy has been proposed and practically applied. A probabilistic method has been developed for determining the energy and electric capacity of on-board supercapacitor recuperative energy storage units. Numerical probabilistic and statistical calculations of the energy and electric capacity of on-board storage for the VL8 and VL11M6 electric locomotives during their operation in the sections of Prydniprovsk railway have been carried out. It was found that the energy and electric capacity of on-board storage devices are distributed according to an exponential law with a clear prevalence of their minimum values and in compliance with direct proportionality between them. **Originality.** For the first time, an autonomous phase of recuperative braking mode of an electric rolling stock has been developed, which makes it possible to significantly reduce the mass and dimension of a supercapacitor storage. The asymptotic theory of extreme statistics by Gumbel was adapted to the method for calculating energy and electric capacity of an on-board storage device, which made it possible to take into account the influence of stochastic nature of changes in the recuperated voltage and current. The probabilistic influence regularities of the change nature in the recuperation energy on the capacity of on-board storage in the phase of recuperative braking have been established. Further development was obtained by a computational-experimental method for assessing the recuperative energy, based on monitoring and using the time dependences of voltage and current obtained in real modes of recuperative braking. For the first time in electric traction systems, it was proposed to carry out the transition from the recuperative braking mode to the recuperative regeneration mode. **Practical value.** The developed method and technique based on it make it possible to evaluate functional parameters of on-board storage device of all types of electric rolling stock, considering stochastic nature of recuperated voltages and currents. Numerical-graphic dependences of the energy intensity and capacity of the on-board storage are recommended for predicting and evaluating these parameters for

various modes of recuperative braking. Since the task of designing an on-board storage unit (in terms of mass and dimensions) is ambiguous, therefore, in each specific case of the type of electric locomotive and recuperation modes, it must be solved individually, taking into account the probability of the corresponding capacitance values.

Keywords: on-board storage; energy capacity; supercapacitor; recuperative energy; random process; voltage; current; extreme statistics

Introduction

The main disadvantages of the existing system of regenerative braking of electric rolling stock (ERS) of direct current, preventing its efficient implementation, are caused by the necessary connection, that is, non-autonomy of recuperating ERS with the traction power supply system [5, 14]. Therefore, currently, the issue of increasing the reliability, stability and electric power efficiency of recuperative braking (RB) is particularly acute. In our opinion, this problem can be solved by transition from the systems and modes of RB to the regenerative braking systems [5].

The term «regeneration» itself (Latin *regeneratio* – regeneration) denotes the restoration of the initial qualities of the waste product, i.e. the renewal of electric energy of electrodynamic braking. In the definitions of the concept of regeneration, there is no condition for the return of regenerated electricity to the supply network. This necessitates the need for a regeneration energy storage at the ERS itself – an onboard storage unit operating in a buffer mode. The on-board buffer energy storage unit (SU) means device, whose primary function is the operational use of electrical braking energy by accumulation, short-term storage and its subsequent implementation in the traction mode.

Currently available domestic and foreign publications show that the most energy-efficient and, therefore the most prospect, are the on-board (on the ERS) SU systems based on supercapacitors generally called «electrical double layer capacitors» (EDLC) [5]. However, at the same time, SU must have a number of certain parameters.

The basic parameters determining the functional capabilities of the use of energy storage units in energy systems are as follows: maximum active power $P_{\max}$; maximum energy capacity $E_{\max}$; operation time t_{op} ; energy reversal time t_{rev} . The energy storage unit is located stationary in the electric power system itself. Such parameters are also inherent in stationary SU, used in the electric transport systems

provided that these parameters are designed to receive all the energy recovered for a trip in an electric rolling stock [8]. In this case, the mass and dimension will be insignificant. An on-board storage device, including a supercapacitor, should perform a completely different function. To reduce the storage unit capacity C , it should operate in the so-called phase regeneration mode: receive the electric energy, recovered in the specific phase of recuperative braking and then, in the next movement phase, promptly give it to a specific consumer of the ERS. Consequently, all the SU parameters must be designed for the one phase RB energy. This mode is advisable to reduce the capacity C , and, consequently, the mass and dimensions of the SU, as well as the energy reversal time. Thus, one of the main functional parameters of the on-board SU should be taken as follows: maximal power and maximal energy capacity, as well as the minimum ones: capacity, weight and dimensions, and recuperation energy reversal time.

The SU power should be equal to the ERS recuperation power in one phase of the RB, and its energy capacity – to the recuperation energy W_p also for one phase of the RB. The value of W_p is basic for determining the main SU parameter – its capacity, as well as for assessing the functional capability of using this W_p .

The energy that is accumulated in the electric field of the capacitor in the RB phase is determined by the expression:

$$W_p = \frac{CU_p^2}{2}, \quad (1)$$

where U_r – voltage at which the recuperation energy was obtained in the RB phase. According to (1) the required storage capacity is:

$$C = \frac{2W_p}{U_p^2}. \quad (2)$$

In (1) and (2), the values W_p and U_p are random. Therefore, in practical calculations of C , it is necessary to solve the problem, which values of W_p and U_p (maximum, minimum or average) should be used. From the point of view of the sufficiency of the value C to receive the entire W_p , it is necessary to take the maximum values of W_p , but in this case, an excessive volume of storage is not excluded. In this regard, for some optimization of this approach, we will apply the Gumbel asymptotic theory of extreme statistics, i.e., the distribution laws and their probabilistic characteristics of the extreme (maximum and minimum) values of the sample of the random variable X under study.

For the first time, a relatively detailed methodology for calculating condenser on-board recuperation energy storage units was described in work [6].

The work [16] presents the method of mathematical modeling of assessing the optimal capacity and location places of supercondensers in rolling stock of the urban transport system. Duplicate power supply scheme with a constant voltage equal to the traction substation of ERS was considered.

Also, in [11], a comparative analysis of on-board tram systems for accumulating recuperable electric energy based on supercapacitors and lithium batteries was carried out by modeling. It has been established that the payback period of the systems is 3 years, but the supercapacitor system is somewhat more expensive in terms of the initial financial investment.

The ionistor capacity required to start an autonomous electric train when powered by its electric drive is described in [1].

Similar studies, but for a supercapacitor storage in the urban transport system, were carried out in [10].

In [13], the electric train motion profile with an on-board supercapacitor storage was optimized by the method of discrete dynamic programming. The objective function in the model is based on the motion equation.

The analysis of three types of recuperation energy storage devices (supercapacitors, flywheels and batteries) in railway transport systems was car-

ried out in [12]. It has been established that it is advisable to use supercapacitor storage as on-board storage units in urban transport systems.

The work [17] performs studies for optimal traction power supply (when the peak power is needed) using the on-board system of recuperation energy storage.

The method for assessing optimal power and capacity of supercapacitors of regenerative energy storage systems was proposed in [14]. It is demonstrated that train power supply from a storage unit, not from a contact network, significantly reduces the energy losses in the traction power supply system and operating costs.

The work [9] describes the stationary system of energy storage based on the ionistors in the underground. The required storage unit capacity is assessed. It was established that energy savings reach 20%.

The methodology for determining the rational parameters of supercapacitor recuperation energy storage unit in the underground system is presented in [3]. The author proposes only mass and cost of on-board storage as the criteria for assessing the rational parameters.

As follows from the above-mentioned and a number of other sources, they mainly discuss two issues: the first is possible storage location options; the second – its cost indicators. Secondly, the issues of on-board supercapacitor storage units are considered only for urban transport systems (trams, trolleybuses, underground motor coaches), which is caused by the possibility of calculating the energy intensity and capacity of the storage unit for the entire trip. For mainline transport systems (in particular, for electric locomotives), this is impractical based on the large mass and dimensions of the storage, which explains the lack of publications on these systems. To solve this problem, another approach is needed. And, finally, thirdly, all authors assess the required energy and electrical capacities of supercapacitor storage units for deterministic (non-random) recuperable voltages and currents, while they are stochastic, often change abruptly (Fig. 1). This is what determines the assessment of the rational parameters of the capacitive storage with a large error.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

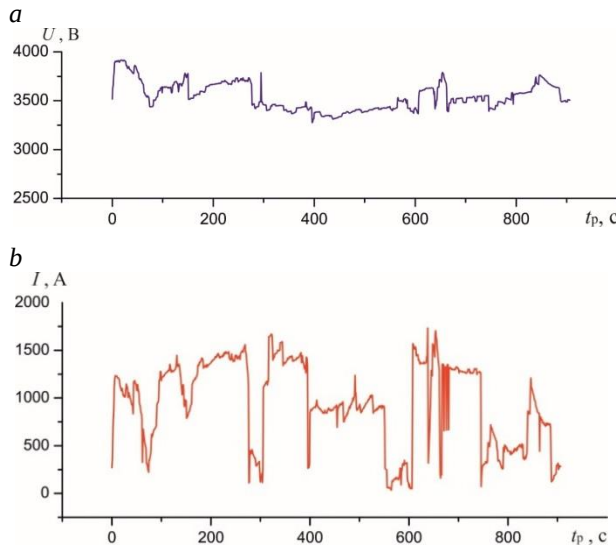


Fig. 1. Registrograms of recuperated voltages (a) and currents (b)

Purpose

The article provides for the development of a method for determining the main functional parameters of on-board supercapacitor recuperative energy storage in its phase regeneration mode of operation and taking into account the stochastic (random) nature of changes in the processes of recovered voltage and current based on the asymptotic theory of extreme statistics by Gumbel.

Methodology

Probabilistic and statistical calculations of the energy intensity and capacity of on-board storage units were carried out based on the registrograms (time dependences) of voltage on the current collector $U(t)$ and the recovered current $I(t)$, were obtained in real operating conditions of the VL8 and VL11M6 electric locomotives in the Prydniprovsk railway. 30 synchronously recorded voltage and current realizations were obtained and processed according to the method in [15]. Receiving registrograms was performed by connecting a personal computer to the control and measuring systems of electric vehicles, containing voltage and current sensors included in the power traction circuits of locomotives. At the same time, the voltage and the total, i.e. traction-recuperative, current were recorded. In this case, the voltage and the total, i.e., traction-regenerative, current were recorded. The

registrogram sections, where the current had negative values, were considered to be recuperation current.

The recuperation energy W_p was determined by the experimental-calculation method [5], based on the time dependences of the recuperable voltages and currents. This method was positively different from the existing ones in the fact that the calculations were performed based on modern concepts and formulas of powers and energy in electrical circuits with non-sinusoidal electrical values, while the existing measuring instruments and systems were based on the concepts and techniques adopted back in the 40s of the twentieth century.

Based on this method, according to [5], the recuperation energy is determined as follows (Fig. 2):

$$W_p = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n i_n \Delta t, \quad (3)$$

where u_n, i_n – instantaneous voltage and current values; N – total number of quantization points during 0-T time.

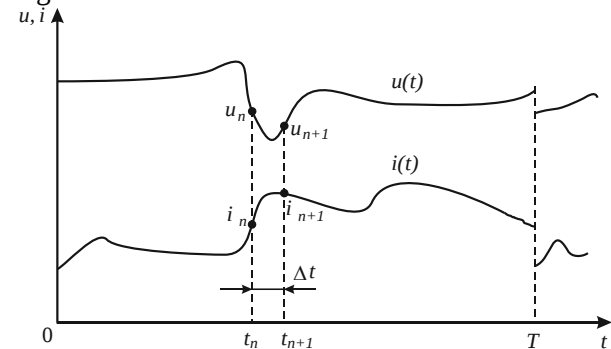


Fig. 2. Discretization of realizations of voltage and current

Theoretical aspects of the determining storage capacity. Obtaining the distribution laws of extreme values is possible in two ways. The first involves performing experimental and statistical tests of the value of X_v in strictly identical conditions for all experiments, which is practically unfeasible for the recuperation phases.

The second way is analytical, based on the use of the distribution function $F(x)$ of the investigated random variable X , constructed earlier for the entire sample size, that is, for all n values (the entire population) of X .

Let us assume that n measurements are carried out for a random variable X having a distribution function $F(x)$ and a probability density $f(x)$. The

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

measurement results give a sequence of numbers $x_{n1} \leq x_{n2} \leq \dots \leq x_{nn}$. One should find the distribution function $F_{nn}(x)$ and the probability density $f_{nn}(x)$:

$$f_{nn}(x) = \frac{dF_{nn}(x)}{dx}, \quad (4)$$

for the maximum values of the random variable x_{nn} in a set of n measurements. The distribution function $F_{nn}(x)$ is nothing but the probability of finding the inequality $X < x$ in each of n measurement. If we take the scheme of independent tests, then the problem is extremely simple to solve. The probability of finding the inequality $X < x$ as a result of one measurement is, obviously, $F(x)$. Hence, according to the probability multiplication theorem:

$$F_{nn}(x) = P_n(X < x) = F^n(x).$$

Application of formula (4) gives:

$$f_{nn}(x) = nF^{n-1}(x)p(x). \quad (5)$$

A similar problem can be set for the distribution of the minimum values of x_{n1} . The corresponding characteristics will be denoted by $F_{n1}(x)$ and $p_{n1}(x)$. According to the definition, the function $1 - F_{n1}(x)$ is equal to the probability of finding the inequality $X > x$ as a result of each of n measurements. Noting that according to the probability multiplication theorem

$$P_n(X > x) = [P_n(X > x)]^n = [1 - F(x)]^n,$$

we will find

$$F_{n1}(x) = 1 - [1 - F(x)]^n.$$

Differentiating the distribution function, we will obtain:

$$f_{n1}(x) = n[1 - F(x)]^{n-1} p(x). \quad (6)$$

The distribution laws $F_{nn}(x)$, $f_{nn}(x)$, $F_{n1}(x)$, $f_{n1}(x)$ and their parameters of extreme values are determined by the nature of the investigated random variable, size of n sample and the initial function $F(x)$ of its distribution. In this case, with an increase in n , the most probable values of the maximums of the random variable X shift to the right, and the minimum ones – to the left.

If n is large, then using expressions is hampered. Therefore, in the works [2, 3], the asymptotic properties of extreme values distributions with $n \rightarrow \infty$ were investigated and three so-called limit distributions Gumbel were obtained – the first, the second, and the third. Each of them is applicable under certain restrictive conditions with respect to the investigated X . In particular, if the quantity X is limited both from below and from above in the interval of its existence $[a, b]$ (which is typical for the values W_p and U_p), then it obeys the third limiting distribution by Gumbel [3]:

– for maximal values:

$$F_{nn}(x) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(b-x)^\beta}{v}\right] & \text{при } x < b, \\ 1 & \text{при } x \geq b; \end{cases} \quad (7)$$

– for minimal values:

$$F_{n1}(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\frac{(x-a)^\beta}{v}\right] & \text{при } x > a, \\ 0 & \text{при } x \leq a, \end{cases} \quad (8)$$

where β and v – some positive numbers.

For not too large n (which is typical for W_p and U_p) and the initial Gaussian distribution, the distribution density of the maximum values of the investigated random variable X can be determined by the formula:

$$f_{nn}(x) = n \left[0,5 + \Phi\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) \right]^{n-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right]; \quad (9)$$

for the minimal values:

$$f_{n1}(x) = n \left[0,5 - \Phi\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) \right]^{n-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \times \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (10)$$

where $F\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)$ – is known Laplace function;
 a , σ – respectively, the mathematical expectation
 and the mean-square deviation of the total sample,
 that is, the function $F(x)$.

In this case, the mathematical expectations and
 mean-square deviations of the extreme values of the
 investigated random variable X are determined by
 the formulas:

$$\bar{X} = M[X] = a \pm \sigma \cdot \sqrt{\ln n}; \quad (11)$$

$$\sigma_{nn} = \sigma_{n1} = \frac{\pi\sigma}{\sqrt{6\ln n}}. \quad (12)$$

In expression (11), the plus sign refers to the
 maximum values, that is, $\bar{X}_{nn}$ is determined, and the
 minus sign refers to the minimum values.

Findings

The energy E_n and electric C capacities of the
 on-board storage units of recuperated electricity for
 the VL11M6 and VL8 electric locomotives oper-
 ated with freight trains on the Nyzhnodniprovsk-
 Junction – Chaplino section of the Prydniprovsk
 railway were calculated. In this case, the energy ca-
 pacity is taken to be equal to the recuperation energy
 W_p and is determined by the above experimental-
 calculation method based on the voltage U_p and cur-
 rent I_p obtained (and processed according to [4, 15])
 under real conditions of the recuperative braking
 mode. The capacity was assessed for three cases: ac-
 cording to the average values of W_p, U_p for the RB
 phase, according to formula (2) as the most probable
 value of the statistical values, according to the sta-
 tistics of the maximum values by Gumbel according
 to formulas (11), (12).

The calculation results are shown in Fig. 3–6 and
 in Table 1, from which follows.

Table 1

**Energy and electric capacity of on-board storage devices
 of VL11M6 and VL8 electric locomotives**

№	Electric locomotive type	Energy capacity, E_n , kW/h		Electric capacity of the storage unit, F				
				Average value per phase		Most likely value	According to the statistics of the maximum values by Gumbel	
		$M[\mathcal{E}_n]$	$\sigma_{\mathcal{E}_n}$	$M[\mathcal{E}_n]$	σ_C		$M[C]$	σ_C
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	VL11M6	49.6	45.1	28.45; $V=0.235$	26.3	0.3...16.6; $V=0.411$	71.5; $V=0.06$	17.9
2	VL8	81.87	108.1	48.72; $V=0.6$	64.54	1.06...45.7; $V=0.652$	165.2; $V=0.04$	45.85

Note: V is the probability of the corresponding mathematical expectation.

The recuperation voltage, the average in the RB
 phase, and in terms of instantaneous values, obeys
 the Gauss law with a probability according to Pear-
 son's criterion equal to 0.23 (Fig. 3 and 5). Energy
 E_n and electric C capacities of on-board storage

units are distributed exponentially with a clear prev-
 alence of minimum values. In this case, between C
 and E_n , as in formula (2), qualitatively direct pro-
 portionality is observed (Fig. 4 and 6). The differ-
 ence in the possible values of capacity C, given in
 Table 1, indicates that the task of designing an on-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

board storage device (in terms of mass and dimensions) is ambiguous, therefore, in each specific case of the type of electric locomotive and RB modes, it must be solved individually, taking into account the probability V of the corresponding capacity values (see Table 1).

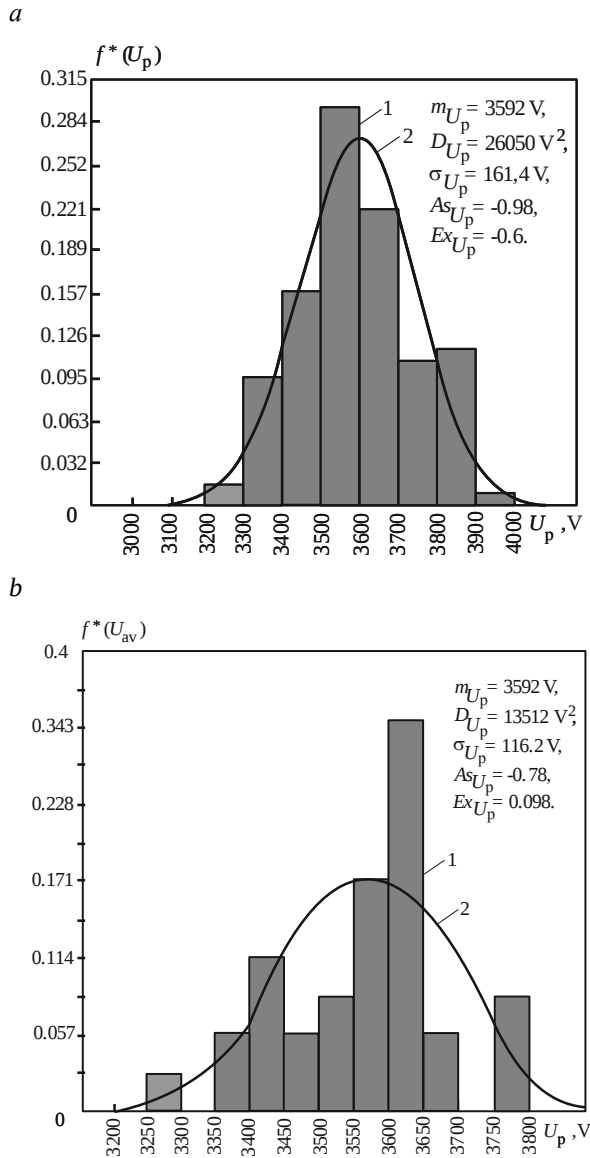


Fig. 3. Histograms (1) and theoretical laws of instantaneous (a) and average (b) voltage values per a recuperation phase at a current collector of VL11M6 electric locomotive in recuperative braking mode

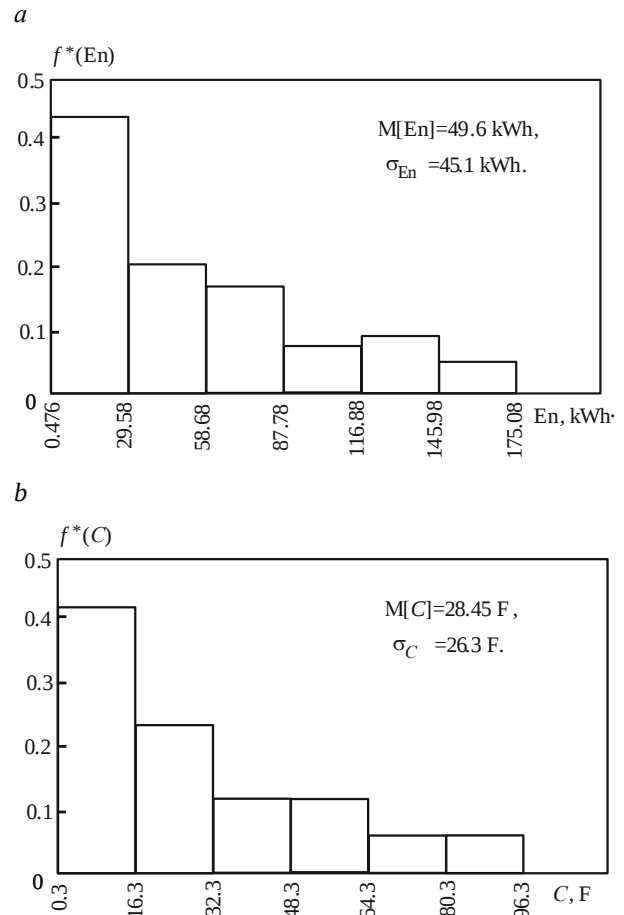


Fig. 4. Statistical distribution laws of energy (a) and electric capacity (b) of on-board storage device of VL11M6 electric locomotive

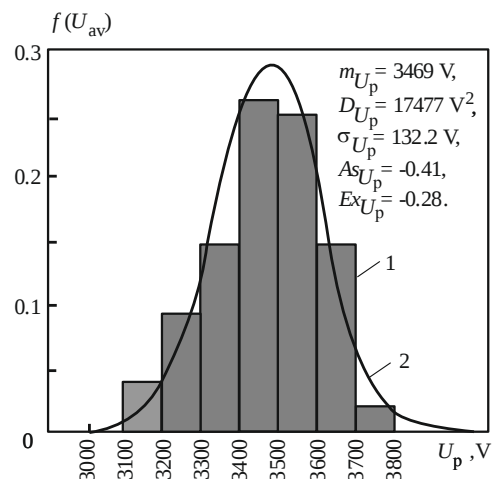


Fig. 5. Statistical (1) and theoretical (2) distributions of recuperated voltage of average values per a phase of VL8 electric locomotive in the section Nd–Junction–Chaplino

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

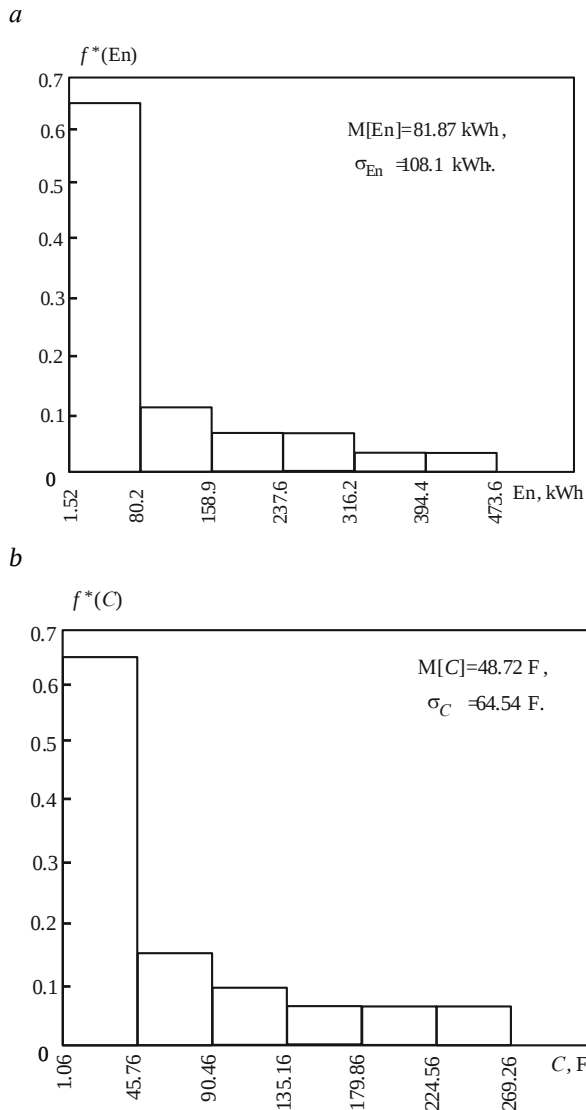


Fig. 6. Statistical distribution laws of energy (a) and electric capacity (b) of on-board storage device of VL8 electric locomotive

Originality and practical value

Autonomous phase mode of regenerative braking of electric rolling stock was developed for the first time. It allows significantly reducing mass and dimensions of supercondenser storage. Asymptotic theory of extreme statistics by Gumbel was adapted to the methodology of calculation of energy and electric capacities of the on-board storage unit, which made it possible to take into account the stochastic nature of recuperable voltage and current.

The probabilistic patterns of the influence of the nature of the recuperation energy change on the capacity of the on-board storage in the phase of regenerative braking have been established.

The developed method and the technique based on it, allow evaluating the functional parameters of on-board storage units of all types of electric rolling stock, taking into account the stochastic nature of recuperable voltages and currents. Numerical and graphical dependences of the energy and electric capacities of the on-board storage units are recommended for predicting and evaluating these parameters for various modes of regenerative braking.

Conclusions

1. The main parameters determining the functional capabilities of the on-board capacitive storage units of recuperable electric energy are the maximum energy capacity, the minimum electric capacity and the energy reversal time, which are not calculated for a full trip of the ERS with a train, but only for the phase of its recuperative braking.

2. The most efficient and accurate method for evaluating the recuperation energy, and hence the energy storage capacity, is an experimental calculation method based on the use of time dependences of voltage and current obtained in real recuperation modes.

3. The random nature of the values of the recuperation energy and voltage determines the random nature and capacity of the storage unit, which can be assessed either by the total statistical set of W_p and U_p , or by Gumbel's statistics of extreme capacity values, or by determining its most probable value.

4. It has been established that the energy capacity of the on-board storage units of the operated electric locomotives is distributed according to an exponential law with a mathematical expectation of 50...82 kWh, and the absolute values of the capacity in the range of $x \approx 16,6 \dots 28,45$ F are observed with a probability 0.411 ... 0.235, and in the range of $\approx 46 \dots 49$ F – with a probability of 0.652...0.6. The maximum values of capacities in the range of $\approx 72 \dots 165$ F are rare, their probability does not exceed 0.04...0.06.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Афанасов А. М., Арпуль С. В., Мясников А. С. Анализ режимов пуска автономного электропоезда при питании тягового электропривода от ионистора. *Електрифікація транспорту*. 2015. № 10. С. 38–42.
2. Галамбош Я. *Асимптотическая теория экстремальных порядковых статистик*. Москва : Наука, 1984. 303 с.
3. Гумбель Э. *Статистика экстремальных значений*. Москва : Мир, 1965. 450 с.
4. Костин Н. А., Шейкина О. Г. Неканоническое спектральное разложение случайных функций тяговых напряжения и тока в системах электрического транспорта. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 1. С. 68–71. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.1.13>
5. Костин Н. А., Никитенко А. В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной и энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока. *Залізничний транспорт України*. 2014. № 3. С. 15–23.
6. Рябцев Г. Г., Ермаков И. А., Рубичев Н. А. Расчет конденсаторных накопителей энергии для вагонов метрополитена. *Електротехніка*. 2011. № 8. С. 15–19.
7. Сулим А. О. Методологія визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для поїзда метрополітену. *Матеріали 79 Міжнародної науково-практичної конференції «ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ»* (Дніпро, 16-17 травня 2019). Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2019. С. 130–131.
8. Шевлюгин М. В. *Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии* : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Московский государственный университет путей сообщения. Москва : 2009. 49 с.
9. Ahmadi S., Dastfan A., Assili M. Energy saving in metro systems: Simultaneous optimization of stationary energy storage systems and speed profiles. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2018. Vol. 8. Iss. 1. P. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2018.03.003>
10. Arbolea P., Bidaguren P., Armendariz U. Energy Is On Board: Energy Storage and Other Alternatives in Modern Light Railways. *IEEE Electrification Magazine*. 2016. Vol. 4. Iss. 3. P. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2016.2584938>
11. Ceraolo M., Lutzemberger G. Stationary and on-board storage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways. *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 264. P. 128–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.070>
12. Ghaviha N., Campillo J., Bohlin M., Dahlquist E. Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 4561–4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>
13. Ghaviha N., Bohlin M., Dahlquist E. Speed Profile Optimization of an Electric Train with On-board Energy Storage and Continuous Tractive Effort. *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. (Capri, 22-24 June 2016). Capri, 2016. P. 639–646. DOI: <https://doi.org/10.1109/speedam.2016.7525913>
14. Kim J., Kim J., Lee C., Kim G., Lee H., Lee B. Optimal Capacity Estimation Method of the Energy Storage Mounted on a Wireless Railway Train for Energy-Sustainable Transportation. *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 986–1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040986>
15. Kostin M., Nikitenko A. Statistics and Probability Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Electric Locomotive in the Recuperation Mode. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013. № 2a. P. 273–275.
16. Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P. Optimal Capacity and Positioning of Stationary Supercapacitors for Light Rail Vehicle Systems. *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2014)*. 2014. P. 807–812. DOI: <https://doi.org/10.1109/speedam.2014.6872019>
17. Sumpavakup C., Ratniyomchai T., Kulworawanichpong T. Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy. *Journal of Modern Transport*. 2017. Vol. 25. Iss. 4. P. 223–235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0146-6>

М. О. КОСТІН^{1*}, А. М. МУХА^{2*}, О. Г. ШЕЙКІНА^{3*}, О. Я. КУРІЛЕНКО^{4*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ел. пошта nkostin@ukr.net, ORCID 0000-0002-0856-6397

^{2*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ел. пошта andremu@i.ua, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ел. пошта sheikina.dit@gmail.com, ORCID 0000-0002-5367-2674

^{4*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ел. пошта kurylenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-2045-917X

Визначення енергетичної та електричної ємностей бортового суперконденсаторного накопичувача енергії регенерації

Мета. У статті передбачено розробку на основі асимптотичної теорії екстремальних статистик Гумбеля методу визначення основних функціональних параметрів бортового суперконденсаторного накопичувача енергії рекуперації з урахуванням стохастичного характеру зміни рекуперованих напруги та струму. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використані методики, прилади та комп'ютерні системи тимчасової реєстрації рекуперованих напруг і струмів на діючих електровозах, методи теорії випадкових процесів і способи ймовірно-статистичної обробки реєстрограм напруг і струмів. **Результати.** Запропоновано та практично застосовано експериментально-розрахунковий метод оцінки енергії рекуперації. Розроблено ймовірнісний метод визначення енергетичної та електричної ємностей бортових суперконденсаторних накопичувачів енергії рекуперації. Виконано чисельні ймовірно-статистичні розрахунки енергетичної та електричної ємностей бортового накопичувача для електровозів ВЛ8 та ВЛ11М6 під час їх експлуатації на ділянках Придніпровської залізниці. Установлено, що енергетична та електрична ємності бортових накопичувачів розподіляють за експоненціальним законом із чітким превалюванням їх мінімальних значень і дотриманням між ними прямої пропорційності. **Наукова новизна.** Уперше розроблено автономний фазовий режим регенераційного гальмування електрорухомого складу, що дозволяє істотно зменшити масогабаритні показники суперконденсаторного накопичувача. Адаптовано асимптотичну теорію екстремальних статистик Гумбеля до методики розрахунку енергетичної та електричної ємностей бортового накопичувача, що дозволило врахувати стохастичний характер зміни рекуперованих напруги та струму. Установлено ймовірнісні закономірності впливу характеру зміни енергії рекуперації на ємність бортового накопичувача в фазі регенераційного гальмування. Подальший розвиток отримав розрахунково-експериментальний метод оцінки енергії рекуперації, що базується на моніторингу та використанні часових залежностей напруги та струму, отриманих у реальних режимах рекуперативного гальмування. Уперше в системах електричної тяги запропоновано здійснювати перехід від режиму рекуперативного гальмування до режиму рекуперативної регенерації. **Практична значимість.** Розроблений метод і методика, що базується на ньому, дозволяють оцінювати функціональні параметри бортових накопичувачів усіх видів електрорухомого складу з урахуванням стохастичного характеру рекуперованих напруг і струмів. Чисельно-графічні залежності енергетичної та електричної ємностей бортового накопичувача рекомендовано для прогнозування й оцінки цих параметрів за різних режимів регенераційного гальмування. Оскільки задача конструювання бортового накопичувача (за масою і габаритами) неоднозначна, у кожному конкретному випадку для типу електровоза та режимів рекуперації її потрібно розв'язувати індивідуально з урахуванням ймовірності відповідних значень ємності.

Ключові слова: бортовий накопичувач; енергетична ємність; суперконденсатор; енергія рекуперації; випадковий процес; напруга; струм; екстремальна статистика

REFERENCES

1. Afanasov, A. M., Arpul, S. V., & Myasnikov, A. S. (2015). The Analysis Regimes at The Start of Autonomous Electric Power From the Electric Traction Ionistor. *Electrification of Transport*, 10, 38-42. (in Russian)
2. Galambosh, Ya. (1984). *Asimptoticheskaya teoriya ekstremalnykh poryadkovykh statistik*. Moscow: Nauka. (in Russian)
3. Gumbel, E. (1965). *Statistika ekstremalnykh znacheniy*. Moscow: Mir. (in Russian)
4. Kostin, N. A., & Sheikina, O. G. (2015). Non-Canonical Spectral Decomposition of Random Functions of the Traction Voltage and Current in Electric Transport Systems. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 1, 68-71. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.1.13> (in Russian)
5. Kostin, M. A., & Nikitenko, A. V. (2014). Recuperative Braking Autonomy Is a Basis of Reliable and Efficient Energy Recuperation in DC Electric Rolling Stock. *Railway Transport of Ukraine*, 3, 15-23. (in Russian)
6. Ryabtsev, G. G., Yermakov, I. A., & Rubichev, N. A. (2011). Raschet kondensatornykh nakopiteley energii dlya vagonov metropolitena. *Elektrotehnika*, 8, 15-19. (in Russian)
7. Sulym, A. O. (2019). Metodologiya vyznachennya racionalnykh parametriv yemnisnogo nakopychuvacha energii dlya poyizda metropolitenu. In *Abstracts of the 79th International Scientific and Practical Conference «PROBLEMS AND PROSPECTS OF RAILWAY TRANSPORT DEVELOPMENT»* (pp. 130-131), Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Dnipro, Ukraine. (in Ukraine)
8. Shevlyugin, M. V. (2009). *Resurso- i energosberegayushchie tekhnologi na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispolzovaniem nakopiteley energii* (Extended abstract of PhD dissertation). Russian University of Transport, Moscow, Russia. (in Russian)
9. Ahmadi, S., Dastfan, A., & Assili, M. (2018). Energy saving in metro systems: Simultaneous optimization of stationary energy storage systems and speed profiles. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 8(1), 78-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2018.03.003> (in English)
10. Arboleya, P., Bidaguren, P., & Armendariz, U. (2016). Energy Is On Board: Energy Storage and Other Alternatives in Modern Light Railways. *IEEE Electrification Magazine*, 4(3), 30-41. DOI: <https://doi.org/10.1109/mele.2016.2584938> (in English)
11. Ceraolo, M., & Lutzemberger, G. (2014). Stationary and on-board storage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways. *Journal of Power Sources*, 264, 128-139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.070> (in English)
12. Ghaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M., & Dahlquist, E. (2017). Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. *Energy Procedia*, 105, 4561-4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980> (in English)
13. Ghaviha, N., Bohlin, M., & Dahlquist, E. (2016). Speed profile optimization of an electric train with on-board energy storage and continuous tractive effort. In *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)* (pp. 639-646). Capri, Italy. DOI: <https://doi.org/10.1109/speedam.2016.7525913> (in English)
14. Kim, J., Kim, J., Lee, C., Kim, G., Lee, H., & Lee, B. (2018). Optimal Capacity Estimation Method of the Energy Storage Mounted on a Wireless Railway Train for Energy-Sustainable Transportation. *Energies*, 11(4), 986-1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040986> (in English)
15. Kostin, M., & Nikitenko, A. (2013). Statistics and Probability Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Electric Locomotive in the Recuperation Mode. *Przeglad Electrotechniczny*, 2a, 273-275. (in English)
16. Ratniyomchai, T., Hillmanssen, S., & Tricoli, P. (2014). Optimal capacity and positioning of stationary supercapacitors for light rail vehicle systems. In *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2014)* (pp. 807-812). DOI: <https://doi.org/10.1109/speedam.2014.6872019> (in English)
17. Sumpavakup, C., Ratniyomchai, T., & Kulworawanichpong, T. (2017). Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy. *Journal of Modern Transportation*, 25(4), 223-235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0146-6> (in English)

Received: November 13, 2020

Accepted: March 15, 2021

УДК 621.33:004.942

Т. М. МІЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Інтелектуальні системи енергопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. + 38 (099) 136 96 25, ел. пошта mishchenko_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

Методологія та моделі комбінованого моделювання електромагнітних процесів у системах електричної тяги

Мета. Основною метою статті є розробка ідентифікаційних моделей і нового методу моделювання електромагнітних процесів у системах електричної тяги з одночасним урахуванням усіх її підсистем, а також декількох фідерних зон електрифікованої ділянки. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використано методи математичного моделювання, основи теорії випадкових процесів та методику ймовірнісно-статистичної їх обробки, методи розв'язання інтегральних рівнянь та аналізу електричних тягових кіл у системах електричної тяги. **Результати.** Установлено вимоги, яким має відповідати адекватна, стохастична ідентифікаційна модель пристроїв систем електричної тяги. Виконано розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Фредгольма першого роду. Отримано аналітичний вираз ідентифікаційної динамічної моделі електровоза ДЕ–1 та здійснено перевірку її адекватності. Розроблено і представлено в таблиці методологію комбінованого моделювання електромагнітних процесів у пристроях і підсистемах систем електричної тяги. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано використовувати імпульсну перехідну функцію як ідентифікаційні моделі тягової підстанції й тягової мережі з електрорухомим складом під час прогнозного моделювання електромагнітних та електроенергетичних процесів у системах електричної тяги. Розроблено новий метод комплексного моделювання електромагнітних та електроенергетичних процесів у системі електричної тяги з одночасним урахуванням усіх її підсистем, а також декількох міжпідстанційних зон електрифікованої ділянки. Уперше запропоновано метод розбивання кореляційних функцій для розв'язання інтегрального кореляційного рівняння, що дозволяє визначати імпульсну перехідну функцію як ідентифікаційну модель будь-якої підсистеми системи електричної тяги. **Практична значимість.** Розроблені ідентифікаційні моделі та метод комбінованого моделювання дають можливість прогнозувати електромагнітні процеси одночасно в усіх фідерних зонах електрифікованої ділянки системи електричної тяги. Отримана ідентифікаційна модель електровоза ДЕ–1 може бути адаптована з подальшим її використанням для моделювання процесів у тягових колах електровозів інших типів. Застосований під час розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Вольтерра першого роду (типу згортки) метод факторизації кореляційних функцій може бути адаптований до розв'язання інших інтегральних рівнянь, якими описують процеси в системах електричної тяги.

Ключові слова: підсистема; комбіноване моделювання; ідентифікація; вагова функція; модель; випадковий процес; напруга; електрична тяга; струм

Вступ

Як відомо, від часів заснування й до сьогодні будь-яка система електричної тяги (СЕТ) складається з підсистем: зовнішнього електропостачання (ЗЕП), тягових підстанцій (ТП), тягової мережі (ТМ) та електрорухомого складу (ЕРС). Зазначене та ряд інших факторів обумовлює значну складність, велику потужність, динамічність і стохастичність кожної СЕТ, особливо якщо вона повинна забезпечувати швидкісний ($160 \leq V \leq 200$ км/год) чи високошвидкісний ($V \geq 200$ км/год) рухи поїздів [7]. У цьому

випадку систему тягового електропостачання (СТЕ) постійного струму підсилюють поздовжньою лінією електропередач 24 або 36 кВ постійної напруги, а ЕРС містить: тяговий трансформатор, випрямно-інверторний перетворювач, фільтр, автономний інвертор напруги, асинхронні двигуни. Звідси, суттєво зростає і складність, і нелінійність підсистем, а отже, й усієї СЕТ, що істотно ускладнює математичне моделювання електромагнітних процесів. Тому в наш час аналіз процесів шляхом моделювання («класичного» математичного чи імітаційного) найчастіше здійснюють лише в одній певній підсистемі, а для інших ставлять певні умови,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

і вони залишаються без уваги. Зрозуміло, що отримані таким чином результати розрахунків мають невисоку точність, оскільки вся СЕТ складається з неперервно електрично зв'язаних (залежних одна від одної) підсистем, охоплених єдиним електромагнітним процесом, і тому потрібно аналізувати всю СЕТ.

З аналізу наявних на сьогодні як вітчизняних, зокрема [1, 5, 10], так і закордонних [14–20] наукових публікацій випливає, що моделювання процесів у СЕТ здійснюють без урахування їх електричного взаємозв'язку в підсистемах і при цьому:

- як моделі ТП використовують джерело постійної чи синусоїдної ЕРС, що увімкнене послідовно з лінійним резистором, інколи додають і лінійний індуктивний елемент. Зрозуміло, що такі прості схеми заміщення не можуть враховувати складні нелінійні динамічні пристрої, якими обладнані ТП. Наприклад, ТП постійного струму мають потужні понижувальний і тяговий трансформатори, випрямно-інверторний агрегат, згладжувальний реактор, пасивний підстанційний фільтр, два швидкодіючих вимикачі;

- аналогічна ситуація і з моделями ЕРС: їх беруть як ідеальне джерело струму чи джерело незмінної активної потужності, значення яких отримують у результаті тягових розрахунків за номінальної напруги на струмоприймачі ЕРС. Недоліки таких схем заміщення ЕРС докладно наведені в [3];

- тягові мережі заміщують відомими електричними схемами з лінійними активними і реактивними елементами, а лінії електропередач й трансформатори в підсистемі ЗЕП – відповідно П-подібною чи Т-подібною схемою заміщення чотириполюсника;

- моделювання електромагнітних процесів у тягових колах підсистем здійснюють лише для детермінованих напруг і струмів у СЕТ, у той час як їх і фідерні, і підстанційні, і в ЕРС величини є випадковими (стохастичними) [6, 16].

Означені вище складності підсистем накладають особливі вимоги до застосовуваних методів моделювання процесів СЕТ, основними з яких є математичне та імітаційне моделювання.

Однак застосування для цієї мети лише методів «класичного» чи комп'ютерного моделювання (як найбільш поширених) є надзвичайно трудомістким, що обумовлено таким [3].

«Класичне» моделювання базується на побудові схеми заміщення досліджуваного пристрою або системи з подальшим математичним описом, згідно із законами електротехніки, фізичних процесів, що протікають у них. Однак аналіз наведених у науковій публікації [7] схемотехнічних рішень частково вже створених і перспективних підсистем тягового електропостачання свідчить, по-перше, про істотну складність навіть їх структурних схем, не кажучи вже про розрахункові схеми заміщення з алгоритмами роботи їх тягових перетворювачів. Отже, закономірна складність і математичних моделей навіть для однієї фідерної зони й одного поїзда на ній. По-друге, практично, як правило, у фідерній зоні рухається кілька поїздів (тобто електропоїздів), а в разі організації швидкісного й високошвидкісного рухів планують узагалі пакетний графік руху поїздів із 5 ... 7 поїздами в пакеті у фідерній зоні. Нарешті, під час аналізу електромагнітних і електроенергетичних процесів у підсистемі тягового електропостачання не можна обмежуватися однією фідерною зоною, потрібно розглядати 7 зон.

Зазначене вище дозволяє стверджувати, що практично неможливо побудувати точну математичну модель такої складної нелінійної динамічної потужної системи, як СТЕ, тільки, як це зараз здійснюють, на основі теоретичного аналізу фізичних процесів, що протікають у пристроях чи підсистемах цієї системи з подальшим використанням законів і методів теоретичної електротехніки. Якраз зазначене практично і гальмує математичне моделювання, а отже, і прогнозування процесів у перспективних СТЕ, особливо тих, як модернізують для впровадження швидкісного й високошвидкісного руху поїздів [6, 16].

У свою чергу, імітаційні моделі є віртуальними, і їх застосування має ряд обмежень, пов'язаних із неадекватністю моделі в умовах існування параметричних елементів у схемі системи, а також із трудомісткістю власне самого процесу моделювання, тим паче випадкових процесів напруг і струмів.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

На нашу думку, вирішення цієї проблеми можливе методами ідентифікації [11], розвиток яких спостерігається останнім часом [8, 18], бо якраз ідентифікація є одним з ефективних методів побудови моделей, по-перше, складних пристроїв (чи систем) і, по-друге, за великої їх кількості (у нашій задачі – ТП, ЕРС, ТМ, фідерні зони). Методи ідентифікації також раціонально застосовувати для моделювання пристроїв (чи систем), які тільки розробляють і про які наявно мають мало апріорної інформації або вона зовсім відсутня.

Тому на підставі розроблених у роботі [11] ідентифікаційних моделей підсистем пропонуємо методологію нового, комбінованого, методу моделювання процесів не лише в одній міжпідстанційній зоні, але і в декількох зонах електрифікованої ділянки певної залізниці.

Мета

Основною метою статті є розробка ідентифікаційних моделей і нового методу моделювання електромагнітних процесів у СЕТ з одночасним урахуванням усіх її підсистем, а також декількох фідерних зон електрифікованої ділянки.

Методика

На сьогодні існує, назовемо його, «роздільне» моделювання, коли дослідження електромагнітних процесів здійснюються в окремих підсистемах. На відміну від цього методу сутність, а отже, і гнучкість запропонованого методу «комбінованого» моделювання полягає в тому, що для складних підсистем (чи окремих пристроїв) типу «чорної скриньки» будують моделі «вхід–вихід» методами ідентифікації, а для інших підсистем цієї ж СЕТ створюють класичні моделі на базі схем заміщення. Наприклад, досліджуючи електротягове навантаження в певній фідерній зоні між ТП1 і ТП2, будують «класичну» математичну модель ТМ (на основі законів теоретичної електротехніки), а моделі ТП1 і ТП2 – методами ідентифікації.

У загальному випадку методологія застосування комбінованого методу представлена в таблиці 1.

Таблица 1

Методологія застосування комбінованого методу

Table 1

Methodology of using the combined method

№ варіанта	Підсистема, у якій досліджують процеси		Методи моделювання в:			
			ЛЕП, ЗЕП	ТП	ТМ	ЕРС
1	ЛЕП ЗЕП	імітаційне	–	ідентифікаційне	класичне	ідентифікаційне
2	ТП	імітаційне	класичне	–	класичне	ідентифікаційне
3	ТМ	–	класичне	ідентифікаційне	–	ідентифікаційне
4	ЕРС	класичне	імітаційне	ідентифікаційне	імітаційне	–

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Рекомендації, наведені в таблиці, щодо використання того чи іншого методу моделювання підсистем у різних варіантах комбінованого методу не є остаточними, можливі їх зміни залежно від заданих параметрів підсистем та поставленої задачі ідентифікації, у вузькому чи широкому змісті [7, 11].

Ідентифікаційні моделі підсистем. Для якісного розв'язання поставленої задачі ідентифікаційна модель досліджуваної підсистеми повинна відповідати таким вимогам:

- бути статистичною, оскільки електромагнітні процеси в СЕТ стохастичні. При цьому визначення оператора (моделі) підсистеми повинно базуватися на поняттях авто- і взаємнокореляційних функцій як найважливіших характеристиках стохастичних процесів;

- відповідати задачі «чорної скриньки», оскільки структури таких складних підсистем, як ТП і ЕРС, невідомі;

- бути лінійною. По-перше, це необхідно, щоб залишатися в рамках кореляційної теорії випадкових процесів, що має широке застосування в разі статистичних розв'язань у техніці. По-друге, нелінійна система (її характеристика) достатньо точно може бути лінеаризована, наприклад, дуже поширеним методом статистичної лінеаризації. Нарешті, якщо вхідний і вихідний процеси підкоряються закону Гаусса (що часто має місце в СТЕ), то в разі виконання критерію мінімуму середньоквадратичної похибки оптимальний лінійний оператор є взагалі оптимальним оператором;

- бути оптимальною за певним критерієм.

Виконання цієї умови обумовлено тим, що в загальному випадку на вхідний «корисний» процес $X(t)$ можуть накладатися різного роду як технічні, так і організаційні, як внутрішні, так і зовнішні щодо підсистем завади $Z(t)$, тобто маємо: $X(t) + Z(t)$. Тому необхідний оператор, який забезпечував би найбільшу динамічну точність перетворення вхідного процесу $X(t)$ у вихідний $Y(t)$ у разі прогнозування останнього, тобто необхідний оптимальний оператор (оптимальна модель). При цьому слід зробити застереження, що вираз «оптимальний оператор» («оптимальна модель») не свідчить про те, що

він (вона) володіє найбільшою можливою точністю своєї роботи в кожному конкретному випадку значень параметрів пристроїв чи підсистем і в будь-який момент часу. Однак за достатньо тривалої їх роботи в різних умовах, для яких вона призначена, точність моделі буде найбільш можливою. Тобто «оптимальна модель» повинна бути оптимальною у середньостатистичному сенсі можливих умов роботи підсистеми. Більше того, у випадку стохастичного характеру вхідного $X(t)$ і вихідного $Y(t)$ процесів задачу визначення «оптимальної моделі» потрібно здійснювати за ймовірнісними характеристиками $X(t)$ і вихідного $Y(t)$ [9]. На практиці статистичних розв'язань задачі оптимізації оператора застосовують ряд критеріїв оптимуму. Однак ще з часів Н. Вінера (1949 р.) й до цього часу, згідно зі значною кількістю публікацій, зокрема [9, 12], якість статистичної оптимальності моделі системи найбільш висока в разі використання критерію середньоквадратичної похибки. Якщо модель (оператор) системи відповідає цьому критерію, тоді квадрат різниці між розрахованим $Y^*(t)$ і реальним $Y(t)$ значеннями вихідного процесу системи за його прогнозування має мінімальну величину:

$$\overline{\varepsilon^2} = M \left\{ \left[Y^*(t) - Y(t) \right]^2 \right\} = \min ,$$

де M – операція математичного очікування.

Виходячи із зазначеного, під час розробки оптимальної моделі ТП, будемо керуватися цим критерієм. Вважають що в разі виконання цього критерію результати, отримані за цією моделлю, будуть найточніше відповідати реальним досліджуваним величинам підсистеми. У цьому випадку модель вважають адекватною, чим і оцінюється її ефективність.

У теорії та практиці прогнозування керування лінійними системами найбільш часто застосовують ідентифікаційні моделі у вигляді «класичних» форм: диференціального або інтегрального оператора, інтегро-диференціального рівняння, числового ряду, імпульсної перехідної функції, передатної або частотної функції, ряду Вольтерра та ін. При цьому вибір виду визначають за структурою досліджуваної системи та змістом поставленого завдання.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

В електротехніці та енергетиці найбільш застосовними операторами (моделями, характеристиками) системи є передатні функції та імпульсна перехідна функція. Передатні функції можна розглядати як основні характеристики лінійної системи, якщо під час аналізу її властивостей користуються площиною комплексного змінного (що характерно під час досліджень усталених процесів). Але найчастіше необхідні дослідження в області дійсної змінної t . У цьому випадку, на думку практично всіх дослідників, за ідентифікаційну модель слід брати імпульсну перехідну (вагову) функцію. При цьому в теорії статистичної динаміки лінійних систем доведено [12], що вагова функція $h(t)$ є оптимальною, якщо її отримано як результат розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Фредгольма першого роду:

$$K_{xy}(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) K_x(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

за $-\infty < t < \infty$;
чи рівняння Вінера–Хопфа:

$$K_{xy}(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) K_x(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

за $t > 0$,
де в (1) і (2) $K_x(t)$ і $K_{xy}(t)$ – це авто- і відповідно взаємнокореляційна функції стохастичних процесів $X(t)$ на вході та $Y(t)$ на виході підсистеми.

Отже, враховуючи зазначене вище для отримання виразу вагової функції $h(t)$, як моделі (оператора) підсистеми (чи системи, чи просто її пристрою), необхідно розв'язати рівняння (1) або (2). Ряд методів розв'язання рівняння (2) наведено в роботі [3], тому в цій роботі розглянемо розв'язання рівняння (1), для чого скористаємося методом розбивання кореляційних функцій $K_x(t)$, $K_{xy}(t)$ [11].

Отже, представимо автокореляційну функцію $K_x(t)$ на вході підсистеми у вигляді:

$$K_x(t) = \begin{cases} K_x^+(t) & \text{за } t \geq 0, \\ K_x^-(t) & \text{за } t < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Оскільки, як відомо з [9], $K_x(t)$ функція симетрична, то:

$$K_x^+(t) = K_x^-(t). \quad (4)$$

За аналогією представимо і $K_{xy}(t)$:

$$K_{xy}(t) = \begin{cases} K_{xy}^+(t) & \text{за } t \geq 0, \\ K_{xy}^-(t) & \text{за } t < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Вигляд і характер зміни експериментально отримуваних для підсистем СЕТ функцій $K_x(t)$, $K_{xy}(t)$ [6] показує, що ці функції за $t \leq 0$ є аналітичними функціями й допускають аналітичне продовження на позитивну піввісь. Тоді, виходячи з рівняння (1) для $t < 0$, можемо записати:

$$K_{xy}^-(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau. \quad (6)$$

Відповідно до виразу (3) і в силу симетрії (4) розіб'ємо інтеграл в (1) на два інтеграли:

$$\begin{aligned} K_{xy}^+(t) &= \int_0^t h(\tau) K_x^+(t - \tau) d\tau + \\ &+ \int_t^{\infty} h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau = \\ &= \int_0^t h(\tau) K_x^+(t - \tau) d\tau + \int_0^{\infty} h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau + \\ &+ \int_t^0 h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau - \int_0^t h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau = \\ &= \int_0^t h(\tau) K_x^+(t - \tau) d\tau + \int_0^{\infty} h(\tau) K_x^-(t - \tau) d\tau - \\ &- \int_0^t h(\tau) K_x^+(t - \tau) d\tau. \quad (7) \end{aligned}$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Застосувавши процедуру віднімання рівняння (6) із виразу (7), отримуємо інтегральне рівняння Вольтера першого роду у вигляді:

$$K_{xy}^+(t) - K_{xy}^-(t) = \int_0^t h(\tau) \begin{bmatrix} K_x^+(t-\tau) - \\ -K_x^-(t-\tau) \end{bmatrix} d\tau. \quad (8)$$

Рівняння (8) містить різнецеве ядро і тому є інтегральним рівнянням типу згортки, яке розв'язують із застосуванням прямого перетворення Лапласа [4]. Справді, згідно з теоремою Бореля (теоремою згортки) [3], рівняння (8) в операторній формі за Лапласом має вигляд:

$$K_{xy}^+(\bar{p}) - K_{xy}^-(\bar{p}) = H(\bar{p}) [K_x^+(\bar{p}) - K_x^-(\bar{p})]. \quad (9)$$

Звідси передатна функція чи пристрою, чи підсистеми, чи взагалі системи буде записана як:

$$H(\bar{p}) = \frac{K_{xy}^+(\bar{p}) - K_{xy}^-(\bar{p})}{K_x^+(\bar{p}) - K_x^-(\bar{p})}. \quad (10)$$

Оригінал шуканої вагової функції $h(t)$ знаходять за теоремою лишків як обернене перетворення Лапласа від $H(\bar{p})$.

Ідентифікаційна модель електровоза ДЕ1. Користуючись виразом (10) та експериментальними даними кореляційної функції напруги на струмоприймачі $K_u(t)$ електровоза (як вхідного стохастичного процесу) та взаємної кореляційної функції напруги й тягового струму $K_{ui}(t)$, отримаємо вагову функцію $h(t)$ електровоза ДЕ1 як підсистеми СЕТ постійного струму.

Отже, маємо:

$$K_u(t) = 12 \cdot 10^4 \exp[-0,1|t|] \text{ В}^2;$$

$$K_{ui}(t) = 4,3 \cdot 10^4 \exp[-0,35|t|] \text{ ВА}.$$

Підставивши в (10) складові факторизаційних кореляційних функцій, отримаємо передатну функцію електровоза:

$$H(\bar{p}) = \frac{4,3 \cdot 10^4 \cdot (0,1 + 0,35) \cdot (p + 0,1)}{12 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 0,1(p + 0,35)}, \quad (11)$$

Тоді шукана вагова функція буде:

$$h(t) = L^{-1} \left[H(\bar{p}) \right] = -0,806 \cdot \delta(t) + 0,202 \exp(-0,35t) \text{ См}, \quad (12)$$

де $\delta(t)$ – функція Дірака.

Для перевірки адекватності цієї моделі за формулою

$$m_I = \int_0^\infty h(\tau) \cdot m_u(t - \tau) d\tau = m_u \int_0^\infty h(t) dt$$

було визначено значення математичного очікування тягового струму m_I електровоза в усталеному режимі роботи. Чисельні розрахунки показали, що за математичного очікування напруги на струмоприймачі $m_u = 3262 \text{ В}$ значення $m_I = 751,2 \text{ А}$, що лише на 0,5 % відрізняється від експериментально отриманої величини 755 А.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше запропоновано використовувати імпульсну перехідну функцію як ідентифікаційні моделі тягової підстанції і тягової мережі з електрорухомим складом під час прогнозного моделювання електромагнітних та електроенергетичних процесів у системах електричної тяги.

Розроблено новий метод, метод комплексного моделювання електромагнітних та електроенергетичних процесів у системі електричної тяги з одночасним урахуванням усіх її підсистем, а також декількох міжпідстанційних зон електрифікованої ділянки.

Уперше запропоновано метод розбивання кореляційних функцій для розв'язання інтегрального кореляційного рівняння, що дозволяє визначати імпульсну перехідну функцію як ідентифікаційну модель будь-якої підсистеми системи електричної тяги.

Розроблені ідентифікаційні моделі та метод комбінованого моделювання дають можливість прогнозувати електромагнітні процеси одночасно в усіх фідерних зонах електрифікованої ділянки системи електричної тяги.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Отримана ідентифікаційна модель електро-воза ДЕ 1 може бути адаптована з подальшим її використанням під час моделювання процесів у тягових колах електровозів інших типів.

Застосований під час розв'язання інтегрального кореляційного рівняння Вольтерра першого роду (типу згортки) метод факторизації кореляційних функцій може бути адаптований до розв'язання інших інтегральних рівнянь, якими описують процеси в системах електричної тяги.

Висновки

1. У наявних методах моделювання схеми заміщення пристроїв і підсистем СЕТ не є адекватними, оскільки занадто прості й не володіють здатністю прогнозування досліджених процесів.

2. Складність, нелінійність, стохастичність і динамічність насамперед тягових підстанцій та електрорухомого складу обумовлюють необхідність розробки та застосування моделей і методів ідентифікації як складових комбінованого методу моделювання.

3. Імпульсна перехідна функція оптимальна за критерієм середньоквадратичного відхилення, і тому є адекватною моделлю будь-якого пристрою чи підсистем електричної тяги.

4. Запропонований метод комбінованого моделювання процесів у системах електричної тяги є адекватним і його можна використовувати під час досліджень електромагнітних процесів в інших системах електричного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Босий Д. О., Сиченко В. Г. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму. *Технічна електродинаміка*. 2009. Вип. 4.3. С. 86–89.
2. Закарюкин В. П., Крюков А. В. *Методы совместного моделирования систем тяги и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока*. Иркутск : ИрГУПС, 2010. 160 с.
3. Костин Н. А., Мищенко Т. Н. Стохастическая идентификационная модель прогнозирования параметров устройств систем электрического транспорта. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.007>
4. Краснов М. Л., Киселев А. И., Макаренко Г. И. *Интегральные уравнения*. Москва : Наука, 1968. 192 с.
5. Михайличенко П. Є. *Наукове обґрунтування та розробка заходів підвищення ефективності роботи системи електричної тяги постійного струму при аварійних режимах* : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2013. 24 с.
6. Мищенко Т. Н., Михайличенко П. Є., Костин Н. А. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприемнике первого украинского электровоза ДЭ 1. *Електротехніка і електромеханіка*. 2003. № 2. С. 43–46.
7. Мищенко Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів. *Електротехніка і Електроенергетика*. 2014. № 1. С. 19–28.
8. Новицкий И. В., Слесарев В. В., Малієнко А. В. Метод ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів керування підготовчими процесами перед збагаченням руд. *Науковий вісник НГУ*. 2020. № 2. С. 42–46. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/042>
9. Пугачев В. С. *Теория случайных функций и её применение к задачам автоматического управления*. Москва : Физматгиз, 1962. 659 с.
10. Сиченко В. Г., Ряботинь Б. А., Словак О. Д. Моделювання електромагнітних процесів перетворення електричної енергії на тяговій підстанції постійного струму. *Технічна електродинаміка*. 2011. С. 245–250.
11. *Современные методы идентификации систем* / под ред. П. Эйхоффа. Москва : Мир. 1983. 400 с.
12. Солодовников В. В. Статистическая динамика систем автоматического управления. Москва : Физматгиз, 1960. 655 с.
13. Alnuman H., Gladwin D., Foster M. Electrical modelling system with multiple trains. *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 11. P. 3211–3231. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113211>

14. Jabr R. A., Dzaifc I. Solution of DC Railway Traction power flow systems including Limited Network Receptivity. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33. Iss. 1. P. 962–969. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2688338>
15. Kocaarslan İ., Akçay M. T., Ulusoy S. E., Bal E., Tiryaki H. Creation of a dynamic model of the electrification and traction power system of a 25 kV AC feed railway line together with analysis of different operation scenarios using MATLAB/Simulink. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2017. Vol. 25. P. 4254–4267. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1612-84>
16. Kostin, M., Mishchenko, T., & Hoholyuk, O. (2020). Fryze Reactive Power in Electric Transport Systems with Stochastic Voltages and Currents. *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. (Pinczow, 16-19 September 2020). Pinczow, 2020. P. 1–4.
17. Mao F., Mao Z., Yu K. The Modelling and Simulation of DC Traction Power Supply Network for Urban Rail Transit Based of Simulink. *Journal of Physics : Conference Series*. 2018. Volume 1087. Iss. 4. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1087/4/042058>
18. Minucci S., Pagano M., Proto D. Model of the 2×25 kV high speed railway supply system taking into account the soil-air interface. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. Vol. 95. P. 644–652.
19. Shang J., Zhang J., Zhang Z. Optimizational Mathematical Modeling Methods of DC Traction Power Supply System for Urban Mass Transit. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. Vol. 2018. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3084184>
20. Sisay M. *Modeling and Simulation of Traction Power Supply System*. 2017. URL: <http://etd.aau.edu.et/bitstream/handle/123456789/15217/Molalegn%20Sisay.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

T. M. MISHCHENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Intelligent Power Supply Systems», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 136 96 25, e-mail mishchenko_tm@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

Methodology and Models of Combined Modeling of Electromagnetic Processes in Electric Traction Systems

Purpose. The main purpose of the work is the development of identification models and a new method of modeling electromagnetic processes in electric traction systems with simultaneous consideration of all its subsystems, as well as several feeder zones of the electrified section. **Methodology.** To achieve this purpose, the methods of mathematical modelling, the basics of the theory of random processes and the methodology of their probabilistic-statistical processing, the methods for solving integral equations and analysis of electric traction circuits in electric traction systems are used. **Findings.** The requirements to be met by an adequate, stochastic identification model of electric traction devices are established. The solution of Fredholm's integral correlation equation of the first kind is performed. The analytical expression of the identification dynamic model of the electric locomotive DE–1 is obtained and its adequacy is checked. The methodology of combined modeling of electromagnetic processes in devices and subsystems of electric traction systems is developed and presented tabularly. **Originality.** For the first time it is proposed to use the pulse transition function as identification models of traction substation and traction network with electric rolling stock in predictive modeling of electromagnetic and electric power processes in electric traction systems. A new method has been developed, a method of complex modeling of electromagnetic and electric power processes in the system of electric traction with simultaneous consideration of all its subsystems, as well as several inter-substation zones of the electrified section. For the first time, a method of partitioning the correlation functions for solving an integral correlation equation has been proposed, which allows defining a pulse transition function as an identification model of any subsystem of an electric traction system. **Practical value.** The developed identification models and the method of combined modeling make it possible to predict electromagnetic processes simultaneously in all feeder zones of the electrified section of the electric traction system. The obtained identification model of the electric locomotive DE–1 can be adapted with its subsequent use in modeling processes in the traction circuits of electric locomotives.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

tives of other types. The method of factorization of correlation functions used in solving the Volterra integral correlation equation of the first kind (convolution type) can be adapted to the solution of other integral equations, which describe the processes in electric traction systems.

Keywords: subsystem; combined modeling; identification; weight function; model; random process; voltage; electric traction; current

REFERENCES

1. Bosiy, D. O., & Sichenko V. G. (2009). Matematychnye modelyuvannya elektrotyagovogo navantazhennya v zadachax vyvchennya elektromagnitnykh procesiv dlya system elektropostachannya elektrychnogo transportu zminnogo strumu. *Texnichna elektrodynamika*, 4.3, 86-89. (in Ukrainian)
2. Zakaryukin, V. P., & Kryukov, A. V. (2010). *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagi i vneshnego elek-troznabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka*. Irkutsk: IrGUPS. (in Russian)
3. Kostin, M., & Mishchenko, T. (2019). Stochastic identification model for forecasting of parameters of devices of electric transport systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 1, 7-15.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.007> (in Russian)
4. Krasnov, M. L., Kiselev, A. I., & Makarenko, G. I. (1968). *Integralnye uravneniya*. Moscow: Nauka. (in Russian)
5. Mikhalychenko, P. Ye. (2013). *Naukove obgruntuvannya ta rozrobka zaxodiv pidvyshchennya efektyvnosti roboty systemy elektrychnoy tyagy postijnogo strumu pry avarijnykh rezhymakh* (Extended abstract of PhD dissertation). Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
6. Mishchenko, T. M., Mikhalychenko, P. Ye., & Kostin, N. A. (2003). Veroyatnostnye kharakteristiki sluchaynoy funk-tsii napryazheniya na tokopriemnike pervogo ukrainskogo elektrovoza DE 1. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2, 43-46. (in Russian)
7. Mishchenko, T. M. (2014). The prospects of the technical solutions and modeling systems of electric traction in high-speed trains. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 1, 19-28. (in Ukrainian)
8. Novitskiy, I., Slesarev, V., & Malienko, A. V. (2020). Method of identification of nonlinear dynamic control objects of preparatory processes before ore dressing. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 42-46. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/042> (in Ukrainian)
9. Pugachev, V. S. (1962). *Teoriya sluchaynykh funktsiy i ee primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow: Fizmatgiz. (in Russian)
10. Sichenko, V. G., Riabokon, B. A., & Slovak, A. D. (2011). Simulation of electromagnetic processes of conversion of electric power at the DC traction substation. *Tekhnichna elektrodynamika*, 245-250. (in Ukrainian)
11. Eykhoff, P. (Ed.). (1983). *Sovremennye metody identifikatsii sistem*. Moscow: Mir. (in Russian)
12. Solodovnikov, V. V. (1960). *Statisticheskaya dinamika sistem avtomaticheskogo upravleniya*. Moscow: Fizmatgiz. (in Russian)
13. Alnuman, H., Gladwin, D., & Foster, M. (2018). Electrical Modelling of a DC Railway System with Multiple Trains. *Energies*, 11(11), 3211-3231. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113211> (in English)
14. Jabr, R. A., & Dzafic, I. (2018). Solution of DC Railway Traction Power Flow Systems Including Limited Network Receptivity. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(1), 962-969.
DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2688338> (in English)
15. Kocaarslan, İ., Akçay, M. T., Ulusoy, S. E., Bal, E., & Tiryaki, H. (2017). Creation of a dynamic model of the electrification and traction power system of a 25 kV AC feed railway line together with analysis of different operation scenarios using MATLAB/Simulink. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25, 4254-4267. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1612-84> (in English)
16. Kostin, M., Mishchenko, T., & Hoholyuk, O. (2020). Fryze Reactive Power in Electric Transport Systems with Stochastic Voltages and Currents. In *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)* (pp. 1-4). Pinczow, Poland. (in English)
17. Mao, F., Mao, Z., & Yu, K. (2018). The Modeling and Simulation of DC Traction Power Supply Network for Urban Rail Transit Based on Simulink. *Journal of Physics: Conference Series*, 1087(4), 1-7.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1087/4/042058> (in English)
18. Minucci, S., Pagano, M., & Proto, D. (2018). Model of the 2 × 25 kV high speed railway supply system taking into account the soil-air interface. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 95, 644-652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.017> (in English)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

19. Shang, J., Zhang, J., & Zhang, Z. (2018). Optimizational Mathematical Modeling Methods of DC Traction Power Supply System for Urban Mass Transit. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3084184> (in English)
20. Sisay, M. (2017). *Modeling and Simulation of Traction Power Supply System*. Retrieved from <http://etd.aau.edu.et/bitstream/handle/123456789/15217/Molalegn%20Sisay.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (in English)

Надійшла до редколегії: 16.11.2020

Прийнята до друку: 15.03.2021

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 656.211:004:61

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

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта skalozub.vl.v@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{2*}Каф. «Інтелектуальні системи енергопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта vgoga@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

^{3*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта al.dp.ua@gmail.com, ORCID 0000-0003-1815-6508

Комплексні моделі впорядкування мультипослідовностей із нечіткими параметрами

Мета. Основною метою статті є формування математичних комплексних конструктивних моделей процесів упорядкування мультипослідовностей елементів із нечіткими параметрами. При цьому встановлено такі вимоги до процедур нечіткого упорядкування мультипослідовностей з урахуванням складності операцій (НУМПСО): урахування нечітких оцінок складності операцій формування, необхідність визначення нечітких класів для впорядкування вихідних елементів, а також побудови індивідуальних нечітких моделей для процесів надходження замовлень із різних джерел. **Методика.** Для розв'язання задач оптимального планування недетермінованих процесів клінічного моніторингу лікування хворих виконано формування комплексних конструктивних математичних моделей процесів упорядкування мультипослідовностей елементів із нечіткими параметрами – FMLCPM. Під час формування моделей задач НУМПСО застосовано методику зі створення моделей із багат шаровими структурами. Для реалізації нечітких задач застосовано методи та процедури дискретизації системи нечітких величин із використанням множин α -рівнів. **Результати.** У статті запропоновано підхід до розв'язання задач аналізу та оптимального планування процесів клінічного моніторингу лікування хворих, представлених як управління потоками в сервісних системах у разі невизначеності. Для його формалізації та виконання розроблено комплексні багат шарові конструктивно-продукційні моделі впорядкування мультипослідовностей із нечіткими параметрами. **Наукова новизна.** У роботі отримали розвиток контруктивно-продукційні методи моделювання складних систем, представлені у формі багат шарової моделі FMLCPM, що призначена для процесів упорядкування мультипослідовностей елементів із нечіткими параметрами. В FMLCPM запропоновано моделі шарів, які забезпечують урахування нечітких оцінок складності операцій упорядкування, класифікацію нечітких параметрів вихідних елементів, формування та аналіз індивідуальних нечітких моделей процесів надходження замовлень до сервісних систем. **Практична значимість.** Отримані результати мають значення для розвитку спектру застосування задач оптимального планування процесів у сервісних системах, представлених як упорядкування мультипослідовностей із нечіткими параметрами. Розроблені комплексні моделі процесів НУМПСО є придатними та ефективними для формалізації задач аналізу та оптимального планування процесів клінічного моніторингу, а також широкого спектру інших задач моніторингу недетермінованих процесів транспорту, логістичних та сервісних систем.

Ключові слова: конструктивне моделювання; мультипослідовності; упорядкування послідовностей; багат шарові моделі; нечіткі параметри; складність операцій формування; нечітка класифікація; клінічний моніторинг; індивідуальні нечіткі моделі процесів

Вступ

Задачі конструктивного (шляхом побудови) оптимального впорядкування елементів певних недетермінованих послідовностей або множин, із метою отримання впорядкованих установленим чином заключних структур, коли необхідно враховувати складність («вагу») заданих операцій формування, є досить поширеними й складними під час реалізації [2, 12, 15, 16, 20, 21]. Серед них найпростіші задачі сортування [2], до яких належать також моделювання управління ланцюгами постачання для сортування замовлень [15], моделі групового сортування, які призначені для задач вибору функцій класифікації даних [20], процеси розформування-формування (РФ) залізничних багатогрупових составів (БГС) [13, 21], конструктивне формування моделей потоків у досліджуваних мережах у [5] та ін. Загалом різноманітні задачі з конструктивного впорядкування довільно організованих послідовностей елементів становлять значний теоретичний та практичний інтерес.

У статті [5] уперше була сформульована змістовна постановка задачі оптимального впорядкування набору послідовностей елементів та запропонована нова математична модель для класу процесів конструктивного впорядкування з урахуванням складності операцій (УМПСО). При цьому була розроблена конструктивна структура для їх чисельної реалізації.

Також у зазначених статтях було розглянуто важливий приклад технологій УМПСО для залізничного транспорту, якими є процеси РФ составів. У наведених вище прикладах таких задач упорядкування послідовностей з урахуванням складності операцій (УПСО), параметри всіх елементів та об'єктів процесів, а також їх математичних моделей разом із процедурами розглядали як детерміновані. Разом із цим у [5] відзначено й широкий клас різноманітних недетермінованих процесів, реалізованих шляхом конструктивного впорядкування наборів послідовностей замовлень. Також запропоновано класифікацію ознак (властивостей об'єктів або процесів упорядкування), наявність яких визначає окремі класи математичних моделей аналізу та оптимального планування. Зокрема, серед таких видів ознак відзначені властивості

параметрів потоків (нечіткі, невизначені ін.), кількість процесів та число зон обслуговування (один або багато), умова щодо припустимості впорядкування не всіх об'єктів (вилучення окремих), урахування змісту й повноти інформації про потоки замовлень тощо.

Окрім РФ залізничних составів, моделювання й аналіз яких виконано в [13, 21], існують інші класи недетермінованих процесів обслуговування УМПСО з метою забезпечення оптимального впорядкування їх елементів. У нашій статті досліджено задачі з організації моніторингу процесів реабілітації хворих на діабет. Фактично отримані при цьому теоретичні результати можуть бути застосовані в більш загальному сенсі, наприклад, для моніторингу технічного стану множин складних технічних систем. Особливостями таких процесів моніторингу є те, що окремі об'єкти контролю (а саме хворі) мають власні, індивідуальні, моделі процесів реабілітації з недетермінованими (у статті – нечіткими) параметрами. Також суттєво те, що дані спостережень нерівномірні в часі.

Проблеми моделювання недетермінованих процесів із нечіткими параметрами, а також нерівномірними інтервалами спостережень привертають усе більше уваги. У статті [15] зазначено, що багато методів спектрального аналізу було розроблено з урахуванням послідовностей, узятих із постійним інтервалом вибірки. Однак існують емпіричні часові ряди, наприклад, у геонауці (дані про чисельність скам'янілостей, ізотопний аналіз тощо), які не відповідають регулярному відбору проб через відсутність даних, прогалини в даних, випадкові вибірки або неповні послідовності даних. Як правило, інтерполяція нерівномірного ряду для отримання послідовності з постійним інтервалом дискретизації змінює його властивості, у тому числі спектральний зміст ряду. У таких випадках часто перевагу надають підходам, які працюють із нерівномірними даними безпосередньо, уникаючи необхідності переходів до явного постійного кроку інтерполяції.

У роботах [9, 16, 18] розглянуто проблему підвищення точності прогнозу кількості пацієнтів з пневмонією. Її рішення може допомогти практикуючим лікарям підготувати необхідні ліки, працівників, інші засоби. Зазначена проблема створює велику небезпеку для життя ба-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

гатьох людей, тому під ас прогнозування потрібна адекватна точність. Для вирішення завдання використано нечіткі часові ряди (FTS) як ефективний спосіб прогнозування даних. Цей метод має переваги перед методами ARIMA й експоненціального згладжування Холта. Використання пропонованого методу FTS, який модифікує алгоритм Чена за рахунок більш високого порядку відносин, що зв'язують вихідні дані, дало змогу підвищити точність прогнозу числа пацієнтів із пневмонією.

У статті [10] запропоновано новий метод прогнозування нечітких часових рядів (FTS), заснований на оптимальному розбитті інтервалів в універсумі дискурсу й оптимальних вагових векторах двофакторних груп логічних відносин нечіткого тренду другого порядку (TSFTLRG). Пропонований метод використовує методи оптимізації рою частинок (PSO) для одночасного одержання оптимального розбиття інтервалів і вагових векторів. Цей метод FTS за точністю прогнозування обмінних курсів перевершував наявні методи TAIEX та NTD / USD.

Змістовно задачу організації та моделювання моніторингу процесів реабілітації захворювань можна звести до нечітких процесів упорядкування, призначених для формування «оптимальної» черги хворих на спеціалізоване обслуговування (діагностування, лікування, операції тощо). Відповідно до [10], у них вхідними даними є списки хворих (із діагностичними характеристиками), що надходять із різних джерел у довільній послідовності та в різні терміни. У списках клієнтів мають бути зазначені результати попередніх аналізів та вказані необхідні додаткові обстеження тощо. Задача впорядкування УМПСО полягає в побудові з кількох вхідних послідовностей (списків) однієї (або встановленого числа) вихідної послідовності клієнтів на обслуговування, у якій об'єкти повинні бути впорядковані відповідно до певних діагностованих пвд час аналізу категорій лінгвістичних показників: «першочергово», «близько 10 днів» тощо. При цьому елементи з однаковим класом оцінок діагностування можна вважати як еквівалентними щодо впорядкування, так і відмінними між собою, з урахуванням показників «ваги» операцій, які застосовують для впорядкування. Тож для таких задач УПСО визначення порядку клієнтів у ви-

хідних списках, що зростає за номерами, не відповідає сутності задач процесу моніторингу.

Для розв'язання задач УМПСО в [5] були запропоновані змістовні та відповідні їх формальні постановки, сформовані моделі операцій, побудовані метрики оцінювання ступеня неупорядкованості поточних станів процесів конструювання рішень, розроблені спеціалізовані алгоритми реалізації задач упорядкування «з вагою». У теоретичному сенсі в роботі [17] на прикладі задач моделювання УМПСО РФ составів був запропонований розвиток конструктивно-продукційних моделей (КПМ). Його сутність полягає у формуванні багат шарових КПМ, або MLCPM, яке виконують шляхом введення до моделей додаткових формальних структур конструювання. За рахунок нових засобів моделей MLCPM забезпечуються можливості врахування різної складності операцій формування порядку, а також можливості аналізу поточних властивостей рішень (оцінки загальної складності процесів формування результату, упорядкованості послідовностей замовлень тощо).

В MLCPM для процесів УМПСО була запропонована структурна декомпозиція загальної моделі конструювання на систему окремих часткових моделей, шарів, які разом із тим формально залишаються КПМ. При цьому були виділені такі шари окремих операцій конструювання: L_1 – оцінювання-перетворення даних; L_2 – оцінювання станів процесу та відбір можливих операцій або процедур перетворення структур упорядкування; L_3 – генерація наступних рівнів вузлів моделі процесу у вигляді графа; L_4 – оцінювання локальних або глобальних властивостей; L_5 – оцінювання загальних параметрів моделей; L_6 – оптимізація процесу формування рішень. Особливості структури MLCPM наведені в [19]. Змістовно формування комплексних моделей, призначених для впорядкування мультипослідовностей задач процесів моніторингу реабілітації захворювань з нечіткими параметрами, полягає в утворенні нової структури багат шарової MLCPM, складові якої забезпечують реалізацію набору необхідних і визначених задач нечіткого моделювання.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Мета

Основною метою статті є формування комплексних математичних конструктивних моделей процесів упорядкування мультислідовностей із нечіткими параметрами. При цьому встановлено певні додаткові вимоги до нечітких процедур УМПСО (НУМПСО). По-перше, потреба врахування нечітких оцінок показників складності операцій. По-друге, класифікація характеристик наборів невпорядкованих входних замовлень щодо їх призначення, тобто визначення вихідних класів упорядкування. По-третє, утворення індивідуальних нечітких моделей процесів надходження замовлень із різних джерел. Для реалізації нечітких задач НУМПСО необхідно також виконати розвиток багатопоточних конструктивно-продукційних моделей (КПМ). Таким чином, мета дослідження полягає в розробці комплексних моделей зі структурою багатопоточних MLCPM, призначених для аналізу спеціалізованих процесів НУМПСО.

Методика

Визначимо сутність задач НУМПСО для поданих вище процесів моніторингу. У них відомими є множини невпорядкованих послідовностей, або списків клієнтів (замовлень) (*in*-потоків, або наборів *in-seq*), які надходять у довільній послідовності, а також множини впорядкованих цільових послідовностей замовлень (*out*-потоків, або *out-seq*). Для елементів *in*-потоків (*in-order*) визначені певні властивості, атрибути (*a-order*), які можуть бути й нечіткими величинами. На основі аналізу (діагностування, класифікації тощо) наборів атрибутів (*a-order*) елементів (*in-order*) необхідно встановити категорію їх цільового потоку (індекс *out-seq*), а також показники впорядкованості – *pos*-індекси, які також можуть бути лінгвістичними термами).

Визначено суттєву відмінність постановок для процесів НУМПСО від детермінованих, де цільові потоки (*out-seq*) та потрібна в них упорядкованість елементів (*in-order*), тобто *pos*-індекси, було задано безпосередньо. Наприклад, у завданнях РФ составів *pos*-індекси було задано кодами станцій призначення.

Далі відома сукупність операцій конструювання *out-seq* з оцінками їх віднос-

ної/абсолютної складності (ваги), що можуть бути задані детермінованими або нечіткими величинами. За оптимального планування *out-seq* відомі загальні ресурси та обмеження щодо процесів конструювання, а також умови, що визначають їх завершення. У кількох *in*-потоках можливе існування елементів (*in-order*), які мають однакові встановлені категорії цільового потоку (*out-seq*) та порядок за *pos*-індексом. Виконано умову «on-line», що означає можливість неодноразової появи елементів *in*-потоків. Необхідно сформулювати модель процесу утворення на основі заданої множини невпорядкованих *in*-потоків замовлень множин упорядкованих за *pos*-індексами призначення *out*-потоків. При цьому потрібно мінімізувати загальні витрати на процеси НУМПСО з урахуванням властивостей атрибутів (*a-order*), показників складності операцій конструювання, а також ресурсних обмежень. Постановка та формалізація детермінованих задач оптимального впорядкування процесів УПСО наведена в роботі [19].

Для формування та реалізації конструктивних нечітких моделей з урахуванням складності операцій (НУПСО), у цій статті запропоновано методики та процедури, за допомогою яких процеси з нечіткими параметрами зводять до множини задач моделювання та аналізу УПСО з детермінованими параметрами, що були досліджені в [5]. Такі методи моделювання та реалізації нечітких задач типові за своєю структурою, але відрізняються природою та сутністю об'єктів і змістом дослідження.

Загальна структура комплексних моделей із реалізації НУМПСО в цілому відповідає структурі MLCPM, де окремими шарами часткових моделей розв'язують задачі оперування об'єктами та процесами з нечіткими характеристиками або складовими. У задачах моделювання процесів моніторингу засобами нових окремих шарів MLCPM ураховують нечіткі оцінки показників складності операцій конструювання, визначення вихідних класів (*out*-потоків) та впорядкованості елементів *in-order* у вигляді *pos*-індексів, формування та аналізу індивідуальних нечітких моделей процесів надходження замовлень до *in*-потоків. Кожна з наведених вище нових конструктивних моделей нових шарів MLCPM може бути також застосовано окремо за призначенням.

Результати

Під час формування конструктивних моделей нечітких процесів упорядкування елементів будемо визначати загальну структуру задач НУМПСО у такому вигляді:

$$(S \rightarrow Q): \{S_p \rightarrow Q_q\}, p, q = 1, 2, \dots, d, \quad (1)$$

де S , S_p та Q , Q_q позначають нечіткі структури *in-seq* та *out-seq* відповідно; p – число *in-seq* послідовностей; q – число *out-seq* потоків у НУПСО, з різними кількостями потоків (p, q) ; d – граничне значення множин. Окремі структури мультислдовностей НУПСО будемо позначати як $S_1 \rightarrow Q_1$, $S_m \rightarrow Q_1$, $S_1 \rightarrow Q_r$ тощо, або скорочено $S_1 Q_1$, $S_m Q_1$, $S_1 Q_r$. Структури послідовностей S'_p та Q'_q складаються з елементів *in-order* (замовлення) або $e_i(p)$, $e_j(q)$, які характеризуються наборами атрибутів (*a-order*). Елементи S'_p відрізняються за номерами i_p (вхідні неупорядковані замовлення), а номери вихідних цільових потоків (*out-seq*) визначають шляхом оброблення значень атрибутів (*a-order*) у моделі конструювання. Також за рахунок процедур моделювання встановлюють порядковий номер для виходів (*out-seq*), який визначають за допомогою приписування елементам потоків $e_j(q)$ *pos*-індексів (*pos-ind*) i_q . Задача з визначення вихідних класів (*out-seq*) для впорядкування елементів вхідних замовлень *in-order* призначена для забезпечення можливості встановити між елементами *out-seq* потоків $e_k(q)$ та $e_m(q)$ звичайної умови впорядкування відповідних значень індексів (*pos-ind*) n_q :

$$n_r(q) \leq n_m(q), \text{ if } r < m \text{ за } (r < m),$$

де через r та m позначені номери елементів *out-seq* (Q_q).

Як і в [5], для задач НУПСО процес конструювання впорядкування *out-seq* (Q_q) подано за допомогою значень параметрів «зон обслуговування» (ЗО) $Z_e, e = 1, 2, \dots, m_z$. Структури ЗО визначають усі властивості процесу впорядкування мультислдовностей із нечіткими характеристиками. Реалізацію НУПСО вико-

нують поетапно, при цьому всі характеристики конструювання відображають за допомогою орієнтованих графів із вершинами, що зберігають структури ЗО $Z_e, e = 1, 2, \dots, m_z$. Разом із характеристиками процесу, наприклад, можуть міститися S_p , Q_q та їх модифікації. Для ЗО $Z_e Z^{(k)}$ відомі процедури доступу до елементів $D^e = \{D^e_j(m)\}$, а також множини операцій перетворення $F^e = \{F^e_z\}$, за якими визначають новий зміст зон Z_e . Операції перетворення ЗО мають показники складності, «ваги» $W^e = \{W^e_z\}$, що можуть бути нечіткими величинами [4]. Перетворення ЗО Z_e реалізують процеси-виконавці – $A(Z_e)$.

Для оцінювання ступеня досягнення результату Q_q був уведений показник $R(Z)$ – загальна оцінка неупорядкованості ЗО $Z_e Z^{(k)}$. З огляду на $R(Z)$, оптимальна реалізація задач УПСО, до розрахунків множини яких зведено задачі НУПСО, полягає у встановленні (шляхом конструювання варіантів) виду, аргументів та послідовностей застосування операторів перетворення F^e для окремих зон Z_e , щоб отримати $R(Z) = 0$ за мінімальних витрат на процес упорядкування, складності операцій конструювання та заданих обмежень. Показники складності операцій перетворення $F^e = \{F^e_z\}$, тобто $W^e = \{W^e_z\}$, у загальному випадку можуть бути нечіткими величинами, які задають векторами $W(Z) = (W_1(Z), W_2(Z), \dots, W_p(Z))$, $A(Z_e)$, а також відповідними моделями нечітких величин і наборами припустимих значень показників $W(Z)$, $D_W = \{W_r(Z) \leq W_{r*}\}$.

Разом із показником $R(Z)$ загальної неупорядкованості ЗО $Z_e Z^{(k)}$ для задач УМПСО необхідно реалізувати процедури розрахунку параметрів складності операцій, які виконують за допомогою приписування величин показників «ваги» термінальним символам графіків конструювання [5]. Загальну оцінку складності

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

впорядкування $W(Z^k)$ на етапі процесу конструювання (k) обчислюють так:

$$W_{ipq}^{(k+1)}, r = W_i^{(k)} + \mathcal{W}_{(p,q)}^{(r)}; \forall r, p, q \in m_Z, \quad (2)$$

де $W_i^{(k)}$ – оцінка складності вузла $g_i(k)$ графа розміток G_{PC} ; i – номер вузла; $W(r)_{(p,q)}(n)$ – «вага» операції перетворення (алгоритму A^r) для зон (p – вихідні, q – результуючі) залежно від кількості елементів, що беруть участь в операції. Складність, «вагу» алгоритму A^r , визначають у моделі терміналами $(T, W_T(Z))$. Граф розмітки G_{PC} процесу конструювання (ПК, або PC) визначають характеристиками зон обслуговування $Z(e)$. Розмітка G_{PC} в загальному випадку є графом, де позначені вузли $g_i(k) \in G_{PC}(k)$, k – етап конструювання, характеристики вузлів $\mathcal{V} - g_i(k) \in \mathcal{V}$. Складовим етапом процесу конструювання порядку задач НУМПСО є вибір алгоритмів $A_i^r(k)$, що можуть бути застосовані до вузла $g_i(k)$ на етапі $(k+1)$. При цьому обчислювальні процеси щодо відбору допустимих алгоритмів $A_i^r(k)$, операцій перетворення стану процесів формування, побудови множин станів графа розміток G_{PC} та ін. можна виконувати одночасно, паралельно. У цілому формалізація опису ПК у вигляді графа розміток G_{PC} дозволяє явно подавати й оцінювати всі його властивості щодо формування висновку з «вагою» операцій.

Під час формування комплексних моделей задач НУМПСО застосовуємо методику, розроблену в [5, 17], що полягає у створенні конструктивних математичних моделей із багатошаровими структурами. Конструктивні моделі шарів призначені для реалізації окремих змістовних підзадач. У подальшому часткові моделі $\{S_k\}$ позначаються індексами $1, 2, \dots, n_S$:

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_n). \quad (3)$$

Для відображення етапів процесу конструювання k створюють структури графа розміток $G(Z^k)$, через який зв'язуються між собою всі конструктивні моделі шарів $\{S_k\}$.

Подано структуру рекурсивної багатошарової нечіткої моделі – FMLCPM, відповідно до [5], у вигляді:

$$\xi_{MLCPM} \rightarrow A_{IN}^{x_G, Z} |_{in_seq}, \xi_1; \quad (4)$$

$$\xi_S \rightarrow A_S, \xi_{(S+1)} \text{ за } S=1, 2, \dots, n_S-1; \quad (5)$$

$$\xi_{n_S} \rightarrow A_{n_S}, \xi_{end}; \xi_{end} \rightarrow A_{end}^{b} |_{z, x_G, I}, A_q |_{b \cdot \xi_q},$$

де $q \in [2, \dots, n_q]$.

Також конструктивні моделі окремих шарів $\{S_k\}$ реалізують оператори паралельного конструювання такого вигляду:

$$\xi_{par} \rightarrow A_{cond}^{not(b)} |_{z, x_G}, \xi_*, \xi_{synchr}; \quad (6)$$

де

$$\xi_x \rightarrow \left(\| A_{ci}^{I_i, Y_i} |_{not(b_i) \cdot A_i, Y_i, I_i} \| \right) \text{ за } i \in t; \quad (7)$$

$$\xi_{synchr} \rightarrow A_{end}^{(b^* = \Lambda b_i), I'} |_{b, I}, A_{synchr} |_{not(b_* \cdot \xi_*)}. \quad (8)$$

В FMLCPM (4) – (6) позначено структури для реалізації задач УПСО як внутрішньої складової НУМПСО, що залежить від параметрів дискретизації нечітких моделей, а саме α -рівнів [3, 6]. У (4) – (6) позначені: A_{IN} – алгоритм процесу формування внутрішніх моделей (L_1); A_S – алгоритм конструювання моделей шарів LMCP_s; A_{ci} – алгоритм паралельного конструювання; x_G – представлення графа розміток ПК; Z – зони обслуговування; $in-seq$ – набір вхідних послідовностей; I_i, Y_i, b_i – параметри паралельних процесів (11); A_{end} – алгоритм контролю закінчення (11); A_{synchr} – алгоритм синхронізації закінчення; A_q – алгоритм повтору моделей шарів (q) (5). У (7) визначено паралельні структури моделі процесу конструювання A_{ci} , $i \in t$, які виконують до умови $(b_i) = \text{true}$; у разі наступних звернень до алгоритмів A_{ci} їх пропускають. Умови завершення всіх паралельних алгоритмів (7) перевіряє структура синхронізації (8) через логічний вираз b_* : за $b_* = \text{true}$ процедура (6) завершується.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Розробка FMLCPM для задачі НУМПСО далі полягає у формуванні моделей окремих шарів $S = (S_1, S_2, \dots, S_{m_s})$ (3). Схема процесу формування НУПСО складається з таких етапів:

L1. Отримання, контроль вхідної мульти-послідовності даних задач НУМПСО (1).

L2. Формування нечітких послідовних вхідних *in-seq* та вихідних *out-seq* структур для НУМПСО (1). Визначення для елементів потоків $e_j(q)$ *pos*-індексів (*pos-ind*), i_q .

L3. Прогнозування нечітких послідовностей вхідних *in-seq* та вихідних *out-seq* структур.

L4. Формування внутрішніх моделей зон обслуговування $Z, Z_e, e = 1, 2, \dots, m_z$.

L5. Формування моделей міри впорядкування ($ML_3; \xi_3$) і нечітких моделей показників складності операцій $W^e = \{W_z^e\}$.

L6. Формування та реалізація α -рівневих нечітких моделей процесів НУМПСО.

L7. Вимірювання оцінок порядку мульти-послідовностей $R(Z)$: за $R(Z) = 0$ завершення α -рівневого моделювання.

L8. Модель ($ML_5; \xi_5$) подає зміст утворення конструювання множини можливих операторів (процедур) перетворень зон Z_k . (Можливе паралельне виконання відповідно до (6) – (8)).

L9. Конструювання паралельними операторами ($ML_6; \xi_6$) нового шару графа розміток $G(Z)^{(k+1)}$.

L10. Перехід до етапу L6, або виконання процедур скаляризації нечітких величин результату, отриманих на основі α -рівневих нечітких моделей.

Процес конструювання задач НУМПСО відповідно до єдиної структури (4) подано за схемою L1 – L10. З урахуванням введення нечіткої «ваги» терміналів, які представляють складність операцій, а також індивідуальних моделей прогнозування вхідних послідовностей *in-seq* будують конструктивні моделі шарів для етапів L2 – L10.

Узагальнена блок-схема шару реалізації α -рівневої [3, 7] моделі – MLCPM(α) – багатошарової моделі (MLCPM) як складової процесів НУМПСО представлена на рис. 1. У цілому

MLCPM(α) відповідає (4). На рисунку відображені оператори конструювання, які можна виконувати паралельно, відповідно до (6) – (8).

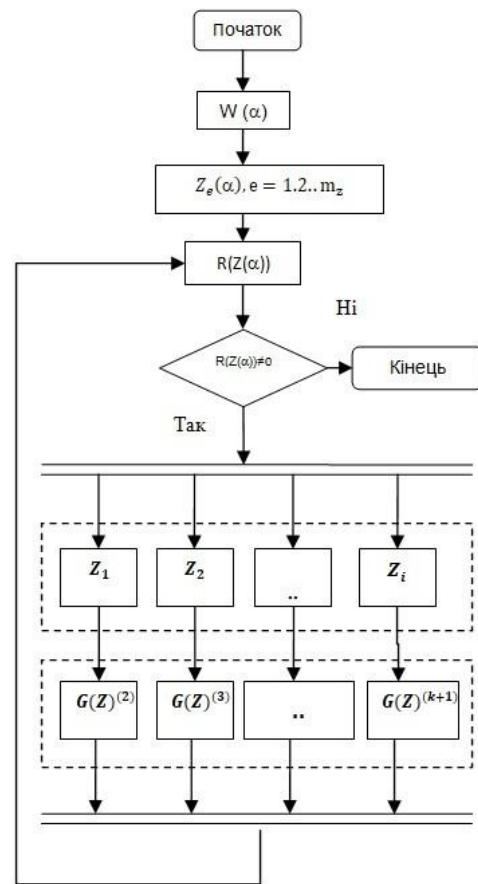


Рис. 1. Блок-схема α -рівневої моделі впорядкування – MLCPM(α)

Fig. 1. Block diagram of the α -level ordering model – MLCPM(α)

У значній мірі процедури реалізації наборів детермінованих задач УМПСО, які відповідають окремим α -рівням за MLCPM(α), рис. 1, за функціями подібні до MLCPM [4, 5]. Суттєва відмінність полягає в дискретизації нечітких величин задач НУМПСО шляхом формування відповідних детермінованих множин α -рівневих оцінок показників [3]. Наведені на рис. 1 набори процедур виконують такі функції: шар $W(\alpha)$ забезпечує формування оцінок «ваги» операцій конструювання на різних α -рівнях; наступний шар функцій виконує формування α -рівневих моделей для зон обслуговування та впорядкування мультипослідовнос-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

тей $Z_e, e=1, 2, \dots, m_Z$. Контроль $R(Z(\alpha))$ закінчення процесу конструювання оптимального порядку елементів визначають оператори оцінювання міри порядку $R(Z(\alpha)) \neq 0$. Нарешті, процедури $MLCPM(\alpha)$ реалізують завдання α -рівневого моделювання процесу конструювання порядку НУМПСО.

На рис. 2 представлена узагальнена схема конструктивної моделі задач – НУМПСО. Окремі незалежні функції моделі реалізуються блоками – шарами комплексної моделі. Шар L_{in} реалізує всі функції отримання та контролю вхідних мультипослідовностей, $L_{in}\{S(in-seq)\}$, відповідно до L1. Шар L_{out} забезпечує комплекс моделей класифікації нечітких даних та формування описів вихідних потоків, $L_{out}\{Q(out-seq), Q(pos-seq)\}$. Шар L_{prd} виконує процедури моделювання та прогнозування вхідних послідовностей, $L_{prd}\{FTS(in-seq), SpM(in-seq)\}$, отриманих $L_{in}\{S(in-seq)\}$. Процедури шару L_{FUZ} призначені для реалізації нечітких моделей НУМПСО за рахунок переходу до багаточисельних детермінованих моделей, які належать до різних α -рівневих оцінок параметрів нечітких характеристик $L_{FUZ}\{\text{Дискретні } \alpha - \text{рівні}, \alpha \in [0; 1]\}$. Шар $MLCPM(\alpha)$ реалізує задачі, представлені на рис. 1. Методи та процедури функціонального шару $\{V(X_*(\alpha))\}$, X_* забезпечують узагальнення, скаляризацію результатів задач $MLCPM(\alpha)$, отриманих на різних α -рівнях дискретизації. Під час виконання умови $Cond(R(X_*))$ закінчення оптимізації процесів НУМПСО як результат отримуємо X_* .

Шар L2 моделей завдань НУМПСО L_{PRD} : (рис. 3) виконує процедури формування, аналіз нечітких FTS [8, 11, 12, 14, 18], а також сепарабельних SpM [4] моделей потоків $\{in-seq\}$. Для цього створюють шар функцій ведення Баз Даних вхідних потоків для мультипослідовностей, блок DB, $\{in-seq\}$. На основі інформації бази даних формують нечіткі моделі процесів $\{in-seq\}$, блок FTS, що забезпечує побудову та прогнозування окремих потоків $\{FTS_k\}$. Також за даними блока DB виконують формування сепарабельних моделей процесів SpM. Особливість цих моделей у тому, що на їх основі реалізують задачі аналізу, моделювання та прогнозування процесів із нерівномірним кроком між спостереженнями.

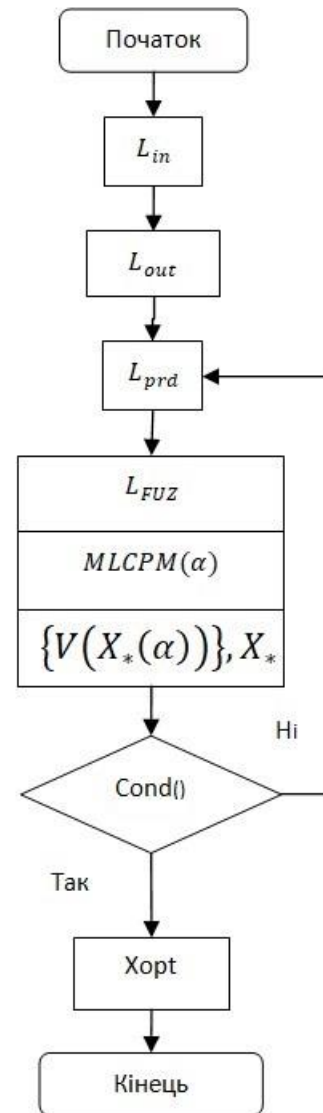


Рис. 2. Блок-схема FMLCPM

Fig. 2. Block diagram of FMLCPM

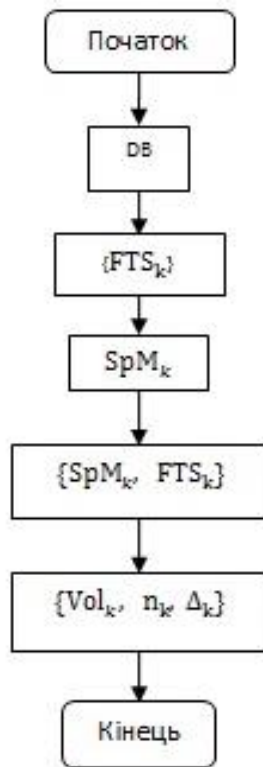
Моделі FTS та SpM для процесів $\{in-seq\}$ наведені в роботі далі. Процедури шару L2 (рис. 3) реалізують задачі моделювання $\{SpM_k, FTS_k\}$, а також формування результатів R_{ez} : $\{Vol_k, n_k, \Delta_k\}$.

Охарактеризуємо функції окремих шарів $MLCPM(\alpha)$ детальніше. Певні шари конструювання FMLCPM можуть мати представлення подібною до рис. 1 схемою.

Особливість шару введення мультипослідовності даних L1 має полягати в тому, що набори атрибутів (a -order) елементів $in-order$ можуть

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

бути неоднорідними (детерміновані, нечіткі та ін.). Конструктивні моделі формування нечітких вхідних *in-seq* та вихідних *out-seq* послідовних структур шару L2 реалізують спеціалізовані процедури нечіткої класифікації [1], за якими визначають потоки *out-seq*, а елементам установлюють (*pos-ind*), i_q .

Рис. 3. Блок-схема шару моделювання L_{PRD} Fig. 3. Block diagram of the simulation layer L_{PRD}

Моделі шару L3 забезпечують реалізацію важливої «технологічної» задачі з ухвалення рішень про закінчення процесів НУМПСО. Для цього шляхом аналізу та прогнозування обсягів надходження нечітких даних вхідних послідовностей *in-seq* визначають очікувані склад та обсяги даних вихідних *out-seq* структур за встановлений проміжок часу.

Під час формування параметрів шарів L4, L5 внутрішніх моделей зон обслуговування замовлень Z , $Z_e, e=1,2,\dots,m_z$, а також моделей міри впорядкування ($ML_3; \xi_3$) ураховують також нечіткі моделі для показників складності операцій упорядкування $W^e = \{W_z^e\}$ елементів замовлень.

В FMLCPM реалізацію нечітких задач НУМПСО виконують за допомогою шару L6. При цьому застосовують методи та процедури [3, 7], які дозволяють реалізувати нечіткі моделі шляхом дискретизації системи нечітких величин із використанням множин α -рівнів. Кожну з утворених під час дискретизації детермінованих моделей УМПСО реалізують засобами $MLCPM(\alpha)$, із подальшим узагальненням, скаляризацією [3] отриманої сукупності часткових результатів НУМПСО відповідно до L10.

Процедури шару L7, призначеного для вимірювання ступеня неупорядкованості мультипослідовностей $R(Z)$, використовують моделі статті [5], за якими під час виконання умови $R(Z)=0$ процедура закінчується. Для вимірювання $R(Z)$ використовують числові показники елементів (*pos-ind*), i_q . Для оцінки їх упорядкування як послідовності $\{(n_i < n_j, i < j), i=1,2,\dots,n\}$ цілих чисел, що мають зростати, використовують показник:

$$mes(L) = M_L(L) = \sum_{k=1}^n V_k; \quad (9)$$

$$V_k = \sum_{i=1}^{k-1} p_i, p_i = \{0; n_i < n_k \mid 1; n_i > n_k\}.$$

Під час оцінювання зворотного, спадного, порядку використовують подібну до (9) характеристику, яка відповідає властивостям міри [4, 5] та ефективно забезпечує реалізацію моделей НУМПСО.

Процедури оптимального впорядкування конструюють усі можливі послідовності $L_Z = \{L_Z^{(j)}\}, j=1,2,\dots,m_L$, які відповідають правилам перетворення зон обслуговування $Z_l, l=1,2,\dots,m_z$. Шляхом спрямованого перебору формують множину L_Z , що містить оптимальні послідовності $L_Z^{(j)}$ замовлень, тобто з $\min(R(L_Z^0))$.

Моделі конструювання графа розміток $G(Z^{(k)})$, L8 та L9, забезпечують утворення множини всіх можливих операторів перетворень зон обслуговування Z_k (модель $ML_5; \xi_5$), а також формування чергового шару графа ро-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

зміток за допомогою відібраних операторів, модель ML_6 [5]. Під час формування $G(Z^{(k)})$ використовують дані про склад зон $\{Z_l\}$, а також про число виконавців. Для вузлів графа $G(Z)$ виконують усі операції щодо їх перетворення, а також для всіх «нових» вузлів графа розраховують оцінки показників складності, використовуючи модель (9).

Ураховуючи кількість виконавців, які можуть реалізувати оператори формування вузлів графа $G(Z)$ незалежно, утворюють послідовності реалізації таких операцій для кожного з них. Перелічені вище процедури конструювання оптимального НУПСО можна формально виконати за допомогою паралельних структур (6) – (8).

Особливості моделей та процедур реалізації детермінованих $MLCPM(\alpha)$, у тому числі властивості методів вибору раціональних наборів операторів генерації вузлів графа $G(Z)$, разом із прикладами формування варіантів поділу зон $\{Z_l\}$ під час виконання операцій конструювання рішень, а також з оцінками мір (9) упорядкування мульти-послідовностей $R(Z)$, наведені в [5].

Дослідимо ключову задачу НУМПСО для процесів клінічного моніторингу щодо формування нечітких вхідних *in-seq*, вихідних *out-seq* послідовних структур, зі встановленням вимог до порядку (*pos-ind*), i_q , для елементів мульти-послідовностей. Для реалізації цієї задачі буде застосовувати процедури нечіткої класифікації [1].

Суттєва відмінність цих процесів моніторингу НУМПСО від детермінованих, наприклад розформування БГС, полягає в попередній відсутності у вхідних наборах (*in-seq*) однозначної впорядкованості елементів для цільових потоків (*out-seq*), тобто *pos*-індексів. У процесах НУМПСО для елементів потоків (*in-order*) визначені атрибути, що можуть бути нечіткими величинами. Тому для всіх елементів додатково необхідно встановити класи цільових потоків (індекс *out-seq*) та показники впорядкованості. Це виконано шляхом аналізу (діагностування, класифікації тощо) наборів атрибутів (*a-order*) елементів (*in-order*) на основі моделі нечіткого діагностування та прогнозування.

Для діагностування характеристик елементів послідовностей *in-seq* із нечіткими та неоднорідними умовами невизначеності (статистичні, нечіткі та ін.) використано модель та процедуру [1], яка розвиває метод управління Такагі-Сугено [3]. Для нечітких величин процедура класифікації (НПК) складається з таких етапів:

– формування наборів нечітких параметрів *in-seq* (X), а також їх діагностованих станів (Y), які визначають терм-множини лінгвістичної змінної «Класи (*pos-ind*)»;

– формування для (X) моделей функцій належності терм-множинам станів (Y) лінгвістичної змінної «Класи-(*pos-ind*)»:

$$(\mu_1(x_i), \mu_2(x_i), \dots, \mu_l(x_i)), i = 1, 2, \dots; \quad (10)$$

– для кожної терм-множини $y_k \in (Y)$ встановлюють коефіцієнти відносної важливості (впливу) параметрів (X):

$$W^{(k)} = (w_{1k}, w_{2k}, \dots, w_{mk}, k = 1, 2, \dots, L),$$

$$\sum_j w_{jk} = 1; \quad (11)$$

– для значень набору параметрів *in-seq* (X) розраховують величини функцій належності для всіх терм-множини станів (Y) лінгвістичної змінної «Класи-(*pos-ind*)»:

$$(\mu_1(x_{i*}), \mu_2(x_{i*}), \dots, \mu_l(x_{i*})), \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, m;$$

– розраховувати показники результуючих терм-множин (станів (Y)) з урахуванням вагових коефіцієнтів (8):

$$V^{(k)} = \sum_i w_{ik} \times \mu_{ik}(x_{i*}), \quad k = 1, 2, \dots, L. \quad (13)$$

Величини $\{V^{(k)}\}_l$ (13) представляють узагальнені оцінки міри належності параметрів *in-seq* (X) до кожної терм-множини змінної «Класи-(*pos-ind*)». Результат класифікації ($k = 1, 2, \dots, l$) відповідає максимальному значенню (13):

$$V^{(rez)} = \max_k (V^{(k)}(Y)). \quad (14)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Зауважимо, що процедура НПК (10) – (14) може бути застосована для класифікації множин даних, відмінних від нечітких. У цьому випадку в моделях (10), (12), (13) застосовують інші показники, що змістовно подібні до $\mu(x)$ та визначають нормовані до інтервалу $[0;1]$ характеристики достовірності параметрів *in-seq* (X). Наведена загальна процедура класифікації при цьому зберігається.

За наявності бази даних (рис. 3, DB) вхідних мультипослідовностей процесів клінічного моніторингу засобами моделі (10) – (14) також можна розв'язувати задачу класифікації черги *out-seq*, до якої необхідно віднести певні елементи наборів *in-seq*. Процедура класифікації НПК також дозволяє реалізувати задач з нечіткого прогнозування (періодів до подій, очікуваних рівнів контрольованих показників та ін.). Для таких розрахунків як класи діагностування параметрів (Y) формують відповідні терми лінгвістичних змінних, наприклад, ПЕРІОД («До 3 днів», «До 6 днів», ін.), або РІВЕНЬ (P_1 , P_2 , ...). Результати класифікації відповідно до (13) – (14) дають найбільш достовірні оцінки нечітких періодів до подій або характеристик процесів, які відповідають наявній інформації.

Розглянемо питання розрахунків величин функцій належності $\mu(Y)$ для терм-множини станів (Y) (12) за нечітких параметрів *in-seq* (X), рис. 4. Під час моделювання процесів клінічного моніторингу прикладом таких параметрів може бути інтервал між контрольованими подіями тощо. На рис. 4 показані графічні моделі лінгвістичної змінної КРОК, побудованої з використанням стандартних процедур нечіткого моделювання [3].

Умовний приклад змінної КРОК має вигляд $S_\mu = (10\mu, 60\mu, 110\mu)$, містить три класи термів, достатніх для класифікації інтервалів контролю процесів моніторингу. Тут за допомогою символу « μ » позначені трикутні нечіткі величини [3, 7]. На рис. 4 наведено приклад із визначення класів та оцінок ступенів належності до них для детермінованого ($t_1(x)$) та нечіткого ($t_2^*(x)$) вхідного параметра.

За схемою рис. 4 параметри вхідних даних належать до нечітких термів із більшою величиною ступеня належності. Тобто $t_1(x)$ належить до класу 10μ , а нечіткий параметр $t_2^*(x)$ до класу 110μ . Отримані оцінки ступеня належності

сті в подальшому використовують у процедурі НПК.

Наведені вище шари процедур FMLCPM (рис.1–3) забезпечують реалізацію всіх задач, що відрізняють задачі НУМПСО від детермінованих задач упорядкування мультипослідовностей, яким присвячено дослідження [5]. Тут специфічними задачами є врахування нечітких оцінок показників складності операцій формування, необхідність визначення вихідних класів для впорядкування задач, утворення індивідуальних нечітких моделей процесів надходження замовлень із різних джерел. Таким чином, загальна схема реалізації процесів НУПСО шляхом переходу до множин детермінованих задач упорядкування, із подальшим узагальненням окремих результатів оптимальних розрахунків, складається з наведеної вище системи моделей і методів розв'язання задач етапів L1 – L10.

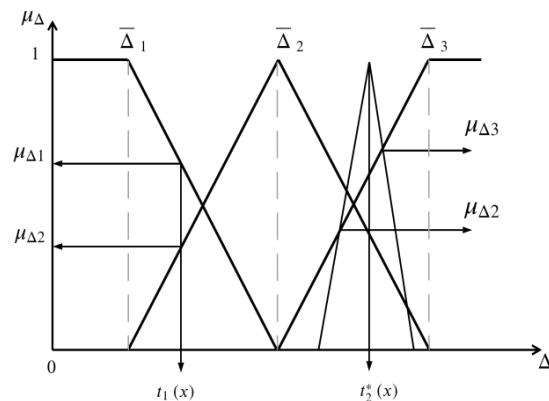


Рис. 4. Оцінювання функцій належності (класів) нечітких параметрів елементів *in-seq* (інтервалів контролю)

Fig. 4. Estimation of membership functions (classes) of fuzzy parameters of *in-seq* elements (control intervals)

Наукова новизна та практична значимість

У статті отримала розвиток постановка нової науково-прикладної задачі з планування сервісних систем шляхом формування комплексних конструктивних математичних моделей процесів упорядкування мультипослідовностей із нечіткими параметрами. Особливість недетермінованих задач НУМПСО встановлюють додаткові (щодо детермінованих) вимоги до нечітких процедур упорядкування, які передбачають урахування нечітких оцінок складності

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

операцій формування, потреби щодо визначення класів для впорядкування вихідних елементів, необхідність побудови індивідуальних нечітких моделей для процесів надходження замовлень із різних джерел. Для реалізації задач НУМПСО удосконалено комплексні багатопарові конструктивно-продукційні моделі. Розроблено багатопарові конструктивні моделі процесів упорядкування мультипослідовностей задач клінічного моніторингу захворювань із нечіткими параметрами.

Розроблені у статті комплексні моделі процесів НУМПСО є ефективними для формалізації задач аналізу та оптимального планування процесів клінічного моніторингу, а також широкого спектру інших задач моніторингу недетермінованих процесів транспорту, логістичних та сервісних систем.

Висновки

У статті запропоновано підхід до розв’язання задач аналізу та оптимального планування процесів клінічного моніторингу ліку-

вання хворих, представлених як управління потоками в сервісних системах в разі невизначеності. Для його формалізації та виконання розроблені комплексні багатопарові конструктивно-продукційні моделі упорядкування мультипослідовностей із нечіткими параметрами – НУМПСО. Моделі враховують нечіткі показники складності операцій формування рішень та існування індивідуальних нечітких моделей реабілітації для окремих клієнтів. Під час реалізації нечітких моделей процесів НУМПСО застосовують методи та модифіковані процедури детермінованих задач упорядкування мультипослідовностей, а також моделі та уніфіковані процедури класифікації, призначені для встановлення відносин порядку між замовленнями. Для аналізу індивідуальних моделей процесів реабілітації окремих клієнтів застосовують нечіткі моделі класу FTS, які утворюють за даними спостережень вхідних наборів задач НУМПСО.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жуковицький І. В., Скалозуб В. В., Устенко А. Б., Клименко І. В. Формування інтелектуальних інформаційних технологій залізничного транспорту на основі моделей аналітичних серверів та онтологічних систем. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 6. С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i6.151635>
2. Кормен Г., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. *Характеристики Алгоритмы : построение и анализ*. Т. 2. Москва : Издательский дом «Вильямс», 2010. 1296 с.
3. Пегат А. *Нечеткое моделирование и управление*. Москва : БИНОМ, 2009. 798 с.
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., Ільман В. М., Білий Б. Б. Конструктивні багатопарові моделі для упорядкування послідовностей з урахуванням складності операцій формування. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. С. 61–76. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/213232>
6. Скалозуб В. В., Мурашов О. В. Моделювання даних процесів моніторингу при нерівномірних і нечітких інтервалах спостережень. *Системні технології*. 2021. Т. 4, № 135. С. 63–75. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-14>
7. Яхьяева Г. Э. *Нечеткие множества и нейронные сети*. Москва : БИНОМ, 2012. 316 с.
8. Bernal J. L., Cummins S., Gasparrini A. Interrupted time series regression for the evaluation of public health interventions: a tutorial. *International Journal of Epidemiology*. 2017. Vol. 46. Iss. 1. P. 348–355. DOI: <https://doi.org/10.1093/ije/dyw0988>
9. Chen S. M. Forecasting enrollments based on fuzzy time series. *Fuzzy Sets and Systems*. 1996. Vol. 81. Iss. 3. P. 311–319. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00220-0](https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00220-0)
10. Chen S.-M., Phuong B. D. Fuzzy time series forecasting based on optimal partitions of intervals and optimal weighting vectors. *Knowledge-Based Systems*. 2017. Vol. 118. P. 204–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.11.019>

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

11. Gao R., Duru O. Parsimonious fuzzy time series modeling. *Expert Systems With Applications*. 2020. Vol. 156. P. 113447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113447>
12. Koenker R. *Quantile Regression*. Cambridge University Press, 2005. pp. 137–143.
13. Kozachenko D., Bobrovskiy V., Gera B., Skovron I., Gorbova A. An optimization method of the multi-group train formation at flat yards. *International Journal of Rail Transportation*. 2020. Vol. 9. Iss. 1. P. 61–78. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2020.1732235>
14. Möller-Levet C. S., Klawonn F., Cho K.-H., Wolkenhauer O. Fuzzy Clustering of Short Time-Series and Unevenly Distributed Sampling Points. *Advances in Intelligent Data Analysis V*. 2003. P. 330–340. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-45231-7_31
15. Pardo-Iguzquiza E., Rodriguez-Tovar F. J. Spectral and cross-spectral analysis of uneven time series with the smoothed Lomb–Scargle periodogram and Monte Carlo evaluation of statistical significance. *Computers & Geosciences*. 2012. Vol. 49. P. 207–212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.018>
16. Shang Z., Li M. Feature Selection Based on Grouped Sorting. *2016 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*. 2016. P. 451–454. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCID.2016.1111>
17. Shynkarenko V. I., Ilman V. M. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. i. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50. P. 655–662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9655-z>
18. Tahseen A. J., Aqil S. B., Cemal A. A New Quantile Based Fuzzy Time Series Forecasting Model. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*. 2008. Vol. 2, № 3. P. 995–1001.
19. Tricahya S., Rustam Z. Forecasting the Amount of Pneumonia Patients in Jakarta with Weighted High Order Fuzzy Time Series. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 546. Iss. 5. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/546/5/052080>
20. Yadavalli V. S. S., Balcou C. A supply chain management model to optimise the sorting capability of a «third party logistics» distribution centre. *South African Journal of Business Management*. 2017. Vol. 48. P. 77–84. DOI: <https://doi.org/10.4102/sajbm.v48i1.22>
21. Zhukovyts'kyi I. Use of an automaton model for the designing of real-time information systems in the railway stations. *Transport Problems*. 2017. Vol. 12. Iss. 4. P. 101–108. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.4.10>

V. V. SKALOZUB^{1*}, V. M. HORIACHKIN^{2*}, O. V. MURACHOV^{3*}

^{1*}Dep. «Computer Information Technology», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail skalozub.vl.v@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{2*}Dep. «Intelligent Power Supply Systems», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail vgora@ukr.net, ORCID 0000-0002-8952-952X

^{3*}Dep. «Computer Information Technology», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 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 Models of Ordering Multi-Sequences with Fuzzy Parameters

Purpose. The aim of the article is to develop complex constructive mathematical models of ordering processes for multi-sequences of elements with fuzzy parameters. At the same time, the following requirements for fuzzy ordering of multi-sequences with complexity evaluation (FOMSCE) were established: accounting fuzzy estimates of the formation operations complexity, the need to define fuzzy classes for ordering the initial elements, as well as building individual fuzzy models for the processes of receiving orders from different sources. **Methodology.** To solve the problems of optimal planning of non-deterministic processes of clinical monitoring of the patients' treatment, the formation of complex constructive mathematical models of the processes of ordering multi-sequences of elements with fuzzy FMLCPM parameters was applied. For forming models of FOMSCE tasks, a methodology is used to create models with multilayer structures. To implement fuzzy problems, methods and procedures for discretizing a system of fuzzy quantities using sets of α -levels are applied. **Findings.** The article proposes an approach to solving the problems of analysis and optimal planning of the processes of clinical monitoring of the patients' treatment, represented as flow control in service systems under uncertainty. For its formalization and implementation, complex multilayer constructive-production models for ordering multi-sequences with fuzzy parameters have been

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

developed. **Originality.** The work has developed constructive-production methods for modeling complex systems, presented in the form of a multilayer model FMLCPM, which are designed for the processes of ordering multi-sequences of elements with fuzzy parameters. In FMLCPM, layer models are proposed that provide accounting for fuzzy estimates of the complexity of ordering operations, classification of fuzzy parameters of output elements, the formation and analysis of individual fuzzy models of the processes of receipt of orders in service systems. **Practical value.** The practical value of the results obtained lies in the spectrum development of applications of the problems of optimal planning of the processes in the service systems, presented as an ordering of multi-sequences with fuzzy parameters. The complex models of FOMSCE processes developed in the article are suitable and effective for formalizing the tasks of analysis and optimal planning of clinical monitoring processes, as well as a wide range of other tasks for monitoring non-deterministic transport processes, logistics and service systems.

Keywords: constructive modeling; multi-sequences; sequence ordering; multilayer models; fuzzy parameters; formation operations complexity; fuzzy classification; clinical monitoring; individual fuzzy process models

REFERENCES

1. Zhukovyts'kyi, I. V., Skalozub, V. V., Ustenko, A. B., & Klymenko, I. V. (2018). Formation of intelligent information technologies of railway transport based on models of analytical servers and ontological systems. *Information and control systems at railway transport*, 6, 3-11. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i6.151635> (in Ukrainian)
2. Kormen, T., Leyzerson, Ch., Rivest, R., & Shtayn, K. (2010). *Kharakteristiki Algoritmy: postroenie i analiz* (Vol. 2). Moscow: Izdatelskiy dom «Vilyams». (in Russian)
3. Pegat, A. (2009). *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie*. Moscow: BINOM. (in Russian)
4. Skalozub, V., Biliy, B., Galabut, A., & Murashov, O. (2020). Methods of intelligent modeling of processes with a variable observation interval and constructive ordering «with weight». *System Technologies*, 3(128), 127-143. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-128-2020-12> (in Ukrainian)
5. Skalozub, V. V., Ilman, V. M., & Bilyy, B. B. (2020). Constructive multiplayer models for ordering a set of sequences, taking into account the complexity operations of formations. *Science and Transport Progress*, 4(88), 61-76. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/213232> (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. Yakhyayeva, G. E. (2012). *Nechetkie mnozhestva i neyronnye seti*. Moscow: BINOM. (in Russian)
8. Bernal, J. L., Cummins, S., & Gasparrini, A. (2017). Interrupted time series regression for the evaluation of public health interventions: a tutorial. *International Journal of Epidemiology*, 46(1), 348-355. DOI: <https://doi.org/10.1093/ije/dyw0988> (in English)
9. Chen, S.-M. (1996). Forecasting enrollments based on fuzzy time series. *Fuzzy Sets and Systems*, 81(3), 311-319. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00220-0](https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00220-0) (in English)
10. Chen, S.-M., & Phuong, B. D. H. (2017). Fuzzy time series forecasting based on optimal partitions of intervals and optimal weighting vectors. *Knowledge-Based Systems*, 118, 204-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.11.019> (in English)
11. Gao, R., & Duru, O. (2020). Parsimonious fuzzy time series modelling. *Expert Systems with Applications*, 156, 113447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113447> (in English)
12. Koenker, R. (2005). *Quantile Regression* (pp. 137-143). Cambridge University Press. (in English)
13. Kozachenko, D., Bobrovskiy, V., Gera, B., Skovron, I., & Gorbova, A. (2020). An optimization method of the multi-group train formation at flat yards. *International Journal of Rail Transportation*, 9(1), 61-78. DOI: <https://doi.org/10.1080/23248378.2020.1732235> (in English)
14. Möller-Levet, C. S., Klawonn, F., Cho, K.-H., & Wolkenhauer, O. (2003). Fuzzy Clustering of Short Time-Series and Unevenly Distributed Sampling Points. *Advances in Intelligent Data Analysis V*, 330-340. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-45231-7_31 (in English)
15. Pardo-Igúzquiza, E., & Rodríguez-Tovar, F. J. (2012). Spectral and cross-spectral analysis of uneven time series with the smoothed Lomb-Scargle periodogram and Monte Carlo evaluation of statistical significance. *Computers & Geosciences*, 49, 207-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.06.018> (in English)
16. Shang, Z., & Li, M. (2016). Feature Selection Based on Grouped Sorting. *2016 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)* (pp. 451-454). DOI: <https://doi.org/10.1109/ISCID.2016.1111> (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

17. Shynkarenko, V. I., & Ilman, V. M. (2014). Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. i. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure. *Cybernetics and Systems Analysis*, 50(5), 655-662. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9655-z> (in English)
18. Tahseen, A. J., Aqil, S. B., & Cemal, A. (2008). A New Quantile Based Fuzzy Time Series Forecasting Model. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 2(3), 995-1001. (in English)
19. Tricahya, S., & Rustam, Z. (2019). Forecasting the Amount of Pneumonia Patients in Jakarta with Weighted High Order Fuzzy Time Series. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 546, Iss. 3, pp. 1-10). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/546/5/052080> (in English)
20. Yadavalli, V. S. S., & Balcou, C. (2017). A supply chain management model to optimise the sorting capability of a «third party logistics» distribution centre. *South African Journal of Business Management*, 48(1), 77-84. DOI: <https://doi.org/10.4102/sajbm.v48i1.22> (in English)
21. Zhukovyts'kyi, I. (2018). Use of an automaton model for the designing of real-time information systems in the railway stations. *Transport Problems*, 12(4), 101-108. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.4.10> (in English)

Надійшла до редколегії: 13.11.2020

Прийнята до друку: 12.03.2021

MATEPIAJO3HABCTBO

UDC 669.141.24:539.5

I. O. VAKULENKO^{1*}, D. M. BOLOTOVA², S. V. PROIDAK³, B. KURT⁴, A. E. ERDOGDU⁵,
H. O. CHAIKOVSKA⁶, K. ASGAROV⁷^{1*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail vakulenko_ihor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916²Dnipro Lyceum of Railway Transport, Universalna St., 7, Dnipro, Ukraine, 490204, tel. +38 (098) 351 99 70, e-mail dasha.bolotova@i.ua, ORCID 0000-0001-6947-3663³Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail proydak.sv@ukr.net, ORCID 0000-0003-2439-3657⁴Dep. «Metallurgy and Materials Engineering», Nevsehir University, Nevsehir, Turkey, 50300, tel. +90 (0506) 744 03 00, e-mail lbkurt74@gmail.com, ORCID 0000-0002-7245-6774⁵Dep. «Mechanical Engineering», Karabuk University, Karabuk, Turkey, 78050, tel. +90 (533) 355 55 61, e-mail aemraherdogdu@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-1831-3972⁶Dep. «Materials Science and Materials Processing», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 618 14 63, e-mail chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-6707-0159⁷Dep. «Mechanical Engineering», Karabuk University, Karabuk, Turkey, 78050, tel. +90 (538) 455 04 45, e-mail hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

Strain Hardening of Low-Carbon Steel in the Area of Jerky Flow

Purpose. The aim of this work is to assess the effect of ferrite grain size of low-carbon steel on the development of strain hardening processes in the area of nucleation and propagation of deformation bands. **Methodology.** Low-carbon steels with a carbon content of 0.06–0.1% C in various structural states were used as the material for study. The sample for the study was a wire with a diameter of 1mm. The structural studies of the metal were carried out using an Epiquant light microscope. Ferrite grain size was determined using quantitative metallographic techniques. Different ferrite grain size was obtained as a result of combination of thermal and thermo mechanical treatment. Vary by heating temperature and the cooling rate, using cold plastic deformation and subsequent annealing, made it possible to change the ferrite grain size at the level of two orders of magnitude. Deformation curves were obtained during stretching the samples on the Instron testing machine. **Findings.** Based on the analysis of stretching curves of low-carbon steels with different ferrite grain sizes, it has been established that the initiation and propagation of plastic deformation in the jerky flow area is accompanied by the development of strain hardening processes. The study of the nature of increase at dislocation density depending on ferrite grain size of low-carbon steel, starting from the moment of initiation of plastic deformation, confirmed the existence of relationship between the development of strain hardening at the area of jerky flow and the area of parabolic hardening curve. **Originality.** One of the reasons for decrease in Luders deformation with an increase of ferrite grain size of low-carbon steel is an increase in strain hardening indicator, which accelerates decomposition of uniform dislocations distribution in the front of deformation band. The flow stress during initiation of plastic deformation is determined by the additive contribution from the frictional stress of the crystal lattices, the state of ferrite grain boundaries, and the density of mobile dislocations. It was found that the size of dislocation cell increases in proportion to the diameter of ferrite grain, which facilitates the development of dislocation annihilation during plastic deformation. **Practical value.** Explanation of qualitative dependence of the influence of ferrite grain size of a low-carbon steel on the strain hardening degree and the magnitude of Luders deformation will make it possible to determine the optimal structural state of steels subjected to cold plastic deformation.

Keywords: ferrite grain size; dislocation; Luders deformation; strain hardening index; low-carbon steel

Introduction

In the process of plastic deformation of metal material, the interaction of moving dislocations with defects at crystalline structure is accompanied by their deceleration up to a complete stop. To resume plastic flow, it is necessary to unblock dislocations, which becomes possible only due to an increase in resulting stress. In the literature this phenomenon is called strain hardening [1, 14]. To assess the degree of development of strain hardening processes, various techniques are used based on the analysis of deformation curves [7, 16]. In appearance, the deformation curves of metallic materials are divided into two types: with and without the area of jerky flow. At the area of jerky flow, the propagation of deformation is extremely inhomogeneous and provided due to the growth of deformation bands [9, 2]. In absolute terms, deformation degree in such a band coincides with the length of jerky flow area on the deformation curve. Such deformation in the literature is called Luders deformation. Deformation on section of jerky flow ends when the entire working part of the specimen is deformed by the amount of Luders deformation. In the case of second type of flow, the deformation curve has no section of jerky flow [13]. In this case, after the appearance of the first signs of plastic deformation, the area of uniform strain hardening immediately begins [3,10]. Regardless of the type of the deformation curve, the level of mobile dislocations density must be sufficient to maintain conditions for the continuity of deformation propagation. On other hand, already at the stages of appearance of the first signs of plastic deformation as a result of interaction of moving dislocations with defects at crystalline structure, it becomes necessary to constantly compensate for the continuous decrease in the number of mobile dislocations. In this case, the growth rate of dislocation density is determined by the structural state of alloy and the size of main structural element [1]. For single phase alloys and low carbon steels, the main structural element is grain size.

Purpose

The aim of this work is to assess the effect of ferrite grain size of low carbon steel on the development of strain hardening processes in the area of nucleation and propagation of deformation bands.

Methodology

Low-carbon steels with a carbon content of 0.06–0.1% C in various structural states were used as the material for the study. Samples for the study were a wire with a diameter of 1 mm. The structural studies of metal were carried out using an Epiquant light microscope. Ferrite grain size was determined using quantitative metallographic techniques. Different ferrite grain sizes were obtained as a result of combination of thermal and thermo mechanical treatments. Varying the heating temperature, cooling rate, using cold plastic deformation and subsequent annealing, made it possible to change the ferrite grain size at the level of two orders of magnitude. The strain hardening characteristics were determined from the analysis of tension curves plotted in logarithmic coordinates. Strain curves were obtained by stretching the samples on an Instron type testing machine at a strain rate of 10^{-3} s^{-1} .

Findings

The strength properties of most metallic materials near the grain boundaries of matrix are approximately of the same order of magnitude as compared to the perfect crystalline structure [3]. On other hand, dependence of the applied stress on activation of a certain dislocation slip system and the structure of grain boundary itself indicate the development of complex structural changes upon its overcoming. On this basis, for single-phase alloys, the grain size (d) is considered to be the main structural element that determines conditions for the initiation and propagation of deformation.

For low-carbon steels, this characteristic is the ferrite grain size (Fig. 1). It was found experimentally that with decreasing d , the resistance to the onset propagation of plastic deformation increases. Based on the analysis of deformation curves of low-carbon steels (Fig. 2) and generalization of experimental data on the change in resistance to small plastic deformations (σ_0) (Fig. 2) and yield stress (σ_T) on the ferrite grain size (Fig. 3) obeys to the relation [11]:

$$\sigma_T = \sigma_i + k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

where σ_i is some initial stress, k_y is the slope coefficient. Depending on the loading conditions and investigated processes of plastic deformation, the value of σ_i is quite often identified with the friction stress of crystal lattice [7], stress increase due to the presence of impurity atoms in the alloy [9], crystal lattice defects caused by embedded atoms [3], flow stress, and the yield point of a single crystal [1]. The value k_y characterizes the stress intensity from accumulation dislocations at slip plane near the grain boundary [11]. According to the results of these works, the fulfilment of relation (1) is confirmed; however, significant difficulties arise in explaining the nature of dependence σ_i and k_y on the structural state of steel. For example, the data [7] indicate absence phenomenon of pile-up dislocations near grain boundaries in alloys with a body-centred crystal lattice. In [5], it is believed that the k_y quantity is not constant, and according to the results of [6] the exponent at d is not equal to $(-0,5)$.

Based on the generalization of indicated research results, it is proposed to divide the value σ_i into components:

$$\sigma_i = \sigma_i^T + \sigma_i^E, \quad (2)$$

where σ_i^E – athermal and σ_i^T – thermal components. The value of σ_i^T is a rather complex characteristic that determines dependence of σ_i on temperature, chemical composition of alloy [6], rate and degree of plastic deformation [7] according to the ratio:

$$\sigma_i^T = \alpha_1 \mu b \rho^{0,5} + \alpha_2 \mu b \lambda^{-1} + \frac{\alpha_3 x}{b \alpha_0^3} \quad (3)$$

where μ is the shear modulus, b is the Burgers vector, ρ is the total density of dislocations, λ is the distance between the particles (precipitates) of the second phase, x , α_1 , α_2 , α_3 , α_0 is constants.

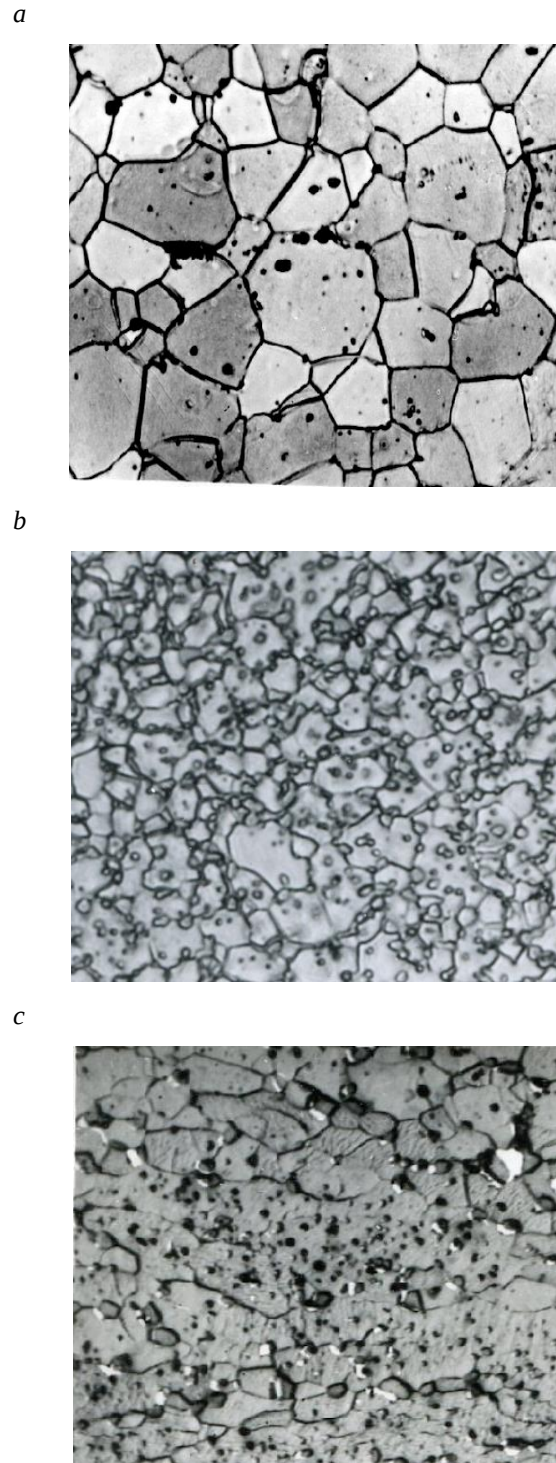


Fig. 1. Structure of low carbon steel after various heat treatments. Magnification:
a – 800, b – 2000, c – 2500

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

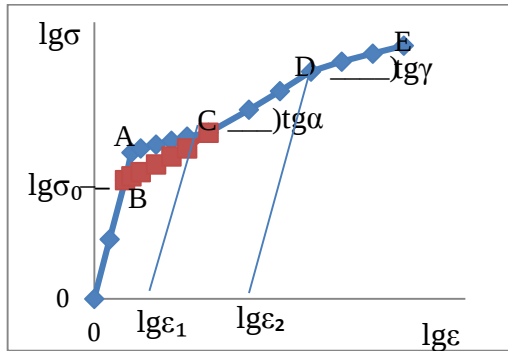
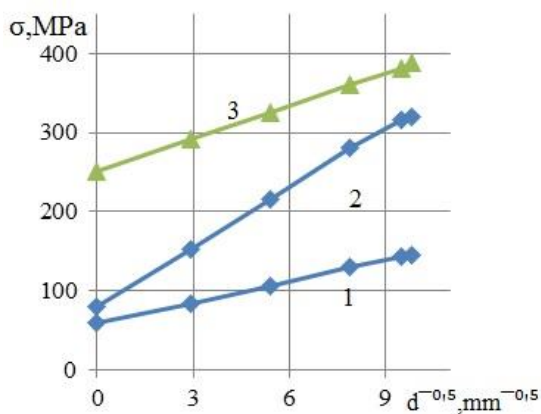


Fig. 2. Deformation curve in logarithmic coordinates

For single-phase metals and low-carbon steels, for which the influence of second phase particles is insignificant, and the role of second and third terms can be neglected, relation (3) takes form of Orowan's equation ($\sigma = \alpha \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{\rho}$) [1].

Fig. 3. Influence of ferrite grain size by ratios (1), for σ_0 (1), yield stress (2) and ultimate strength (3) of low-carbon steel with 0.06% carbon

Thus, the contribution of thermal component to the value σ_i for low-carbon steels can be significantly simplified and reduced to dependence on the dislocation density present in metal. A significant variety of the structural state of metallic materials is reflected in the conditions of the plastic flow initiation. Depending on the type of crystal lattice, under loading, metallic materials can have a jerky flow area, or the development of the processes of uniform strain hardening is immediately observed.

As follows from the analysis of numerous experimental data, relations at type (1) are equally successful both for steels with and without a yield area, for describing the yield stress and flow stress up to the ultimate strength (Fig. 3, curve 3). At the

same time, a contradiction arises when using the same equation to describe the strength characteristics of metal with a different structural state. Indeed, a single mechanism is used to describe the behaviour of steels with different degrees of plastic deformation [4]. However, depending on the degree of plastic deformation, the mechanism has certain differences. For example, for steel with a yield point, the onset of flow is due to the formation of slip bands from generation of dislocations by the boundaries of ferrite grains [1]. While at absence of a physical yield point, development of slip is associated with the work of other sources of dislocations [7]. As for the absolute values σ_i and k_y , the differences found may be associated not only with the test conditions and chemical composition of the steel, but with differences in the initial structural state. For technical iron and low-carbon steel, in the range of ferrite grain sizes from 40 to 3.6μ , a change in k_y from 18.2 to $22.2 \text{ N/mm}^{3/2}$ was found [8]. Moreover, at the same time, with a sufficiently accurate coincidence between the calculated relation (1) and the experimental values of yield stress on ferrite grain size, the fulfillment of this dependence may be violated when d is replaced by the substructure parameter [1, 7]. Thus, for technical iron and low-carbon steel with subgrains sizes of $0.5\text{--}7.0 \mu$, to explain the nature of dependence of yield stress on d relation of the type (1) [8] was used, in which k_y is presented as a quantity dependent on dislocations density in subgrains. The exponent at d can also differ from the traditional value ($-1/2$), reaching the value ($-3/4$) [1].

Thus, characteristics of resistance to small plastic deformations for low-carbon steel are fairly well described by relation (1), when the role of the main structural element is assigned to the ferrite grain size, and other influences are minimal. With an increase in the dislocation density in the area of formation of the first signs of plastic deformation, the inevitable processes of their redistribution caused the development of an alternative method for determining the quantities σ_i and k_y . The proposed technique is based on the analysis of deformation curve. As a result of extrapolation of the area of uniform strain hardening of the CD section (Fig. 1) to zero plastic deformation, according to

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

[15], the obtained value σ_0 was equated to σ_i from relation (1).

This identification is based on the concept of practically identical conditions for the appearance of the first signs of plastic deformation and rather close absolute values. According to the proposed method, after replacing σ_i by σ_0 , and k_y by k_Y^1 , relation (1) takes the form:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k_Y^1 \cdot d^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Considering that:

$$\sigma_T - \sigma_0 = k_Y^1 \cdot d^{-\frac{1}{2}}, \quad k_Y^1 = \frac{\sigma_T - \sigma_0}{d^{-\frac{1}{2}}}. \quad (4a)$$

In contrast to σ_i and k_y from relation (1), quantities σ_0 (Fig. 2) and k_Y^1 (Fig. 4) are dependent on the ferrite grain size. Comparative analysis of the two methods for determining σ_i and k_y showed both coincidence in absolute values and their identical essence [15], and fundamental differences [1], up to inconsistency [8]. In fact, these techniques are based on several different mechanisms of plastic flow development at the initial stages of metal loading. In one case, it is the motion of free dislocations, in the other – it is unblocking or nucleation of additional dislocations upon deformation. Thus, the indicated methods for estimating parameters of deformation initiation and the initial stages of its propagation should be considered as complementary to each other [8].

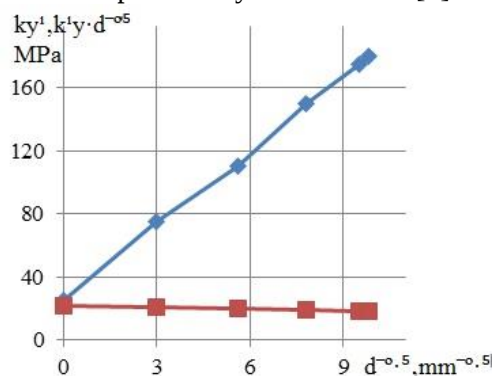


Fig. 4. The dependences $k_Y^1 \cdot d^{-0.5}$ – (◆) and $k_Y^1 \cdot d^{-0.5}$ – (■) on the ferrite grain size of low-carbon steel

It follows from above analysis that when the first signs of plastic deformation appear, resulting changes at internal structure in the metal are by their nature quite close to changes as a result of the development of strain hardening processes. Indeed, the evolution of dislocation structure during plastic deformation gives reason to believe that the development of strain hardening processes is observed already from the moment of appearance of the first signs of irreversible mobile dislocations. Detailed studies of changes in the dislocation structure on the ferrite grain size of low-carbon steel made it possible to determine two fundamental positions. First, these are rather close values of the subgrains size in comparison with the size of the dislocation cell of the deformed metal [1]. Second, the dislocation density at the beginning of the plastic flow is inversely proportional to the size of the ferrite grain. Taking into account the Orowan relationship of $\sigma_T \approx f(\sqrt{\rho})$ and $\sigma_T \approx f(1/\sqrt{d})$ according to (1), for the initial stages of plastic flow, we will write:

$$\rho \approx \frac{1}{d}. \quad (5)$$

The use of relation (5) makes it possible to assess the role of strain hardening processes at the stages of nucleation and propagation of deformation bands. Indeed, as shown in [9], the deformation into the front of Luders band with a width of λ varies from $\varepsilon = 0$ to ε_L (Fig. 5).

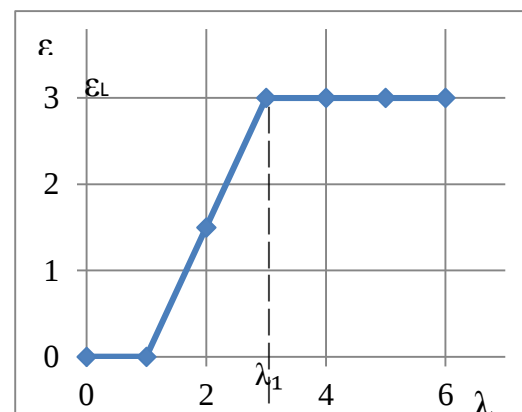


Fig. 5. Distribution diagram of the magnitude of plastic deformation along the Luders band front (ε_L is the Luders deformation, λ_1 is the width of band front in units of grain size)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Considering that a certain amount (a) of grains is laid along the length, the gradient of deformation by the front of strain band will be:

$$\frac{d\varepsilon}{d\lambda} = \frac{\varepsilon_L}{a \cdot d} \quad (6)$$

where ε_L is the Luders deformation.

In essence, the value of $\frac{d\varepsilon}{d\lambda}$ should depend not only on the initial dislocation density, but also on the magnitude of its increment during the formation of the deformation band. According to the Orowan relation [9], the local strain rate ($\dot{\varepsilon}$) is generally estimated as follows:

$$\dot{\varepsilon} = \rho_m \cdot b \cdot k \cdot v, \quad (7)$$

where ρ_m is the density of mobile dislocations, b is the Burgers vector, k is the geometric factor, which is equal up to 1, and v is the velocity of dislocation movement. Compared with (7), $\dot{\varepsilon}$ can be represented in terms of $\frac{d\varepsilon}{d\lambda}$ for the front of deformation band:

$$\dot{\varepsilon} = v_L \cdot \frac{d\varepsilon}{d\lambda}, \quad (8)$$

where v_L is the speed of movement in the front of the deformation band. Assuming that v_L cannot be greater than v , for the initial conditions of propagation of plastic deformation, the following relation should be satisfied:

$$v_L = v \quad (9)$$

Equating (7) and (8) with each other, taking into account (6), finally obtain that for the formation of a deformation band of ε_L in steel with a ferrite grain size (d), the required density of mobile dislocations:

$$\rho_m = \frac{\varepsilon_L}{a \cdot b \cdot d}, \quad (10)$$

where a is the number of ferrite grains that fit on the width in the front of the deformation band. It was found experimentally [9] that the quantity a

is actually a variable characteristic. It depends on the size of ferrite grain and can range from one to several d . The maximum value of a does not exceed 3. On this basis, one should take into account the existence of a certain gradient density of dislocations at transition from the peripheral sections in the front of the deformation band to the volumes of metal that have already undergone Luders deformation. The theoretical concepts of a continuous change at density of dislocations inside individual grains during the formation in the front of deformation band (Fig. 6, *a*) have not received practical confirmation [12]. In fact, from the distribution analysis of etching pits in individual ferrite grains, it was found that dislocations within one grain are distributed almost evenly. Thus, the density of dislocations inside an individual grain, during the formation in the front of the band, should be considered constant without gradients at distribution. As a result, structural changes at metal, within the front of deformation band, will be determined by a discrete change in density of dislocations at transition from one grain to another (Fig. 6, *b*).

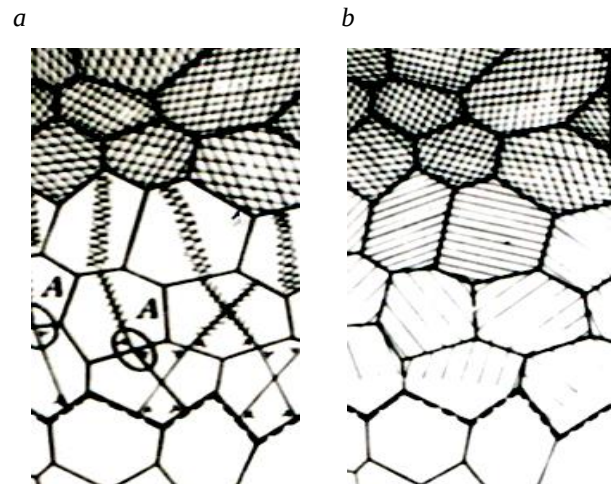


Fig. 6. The scheme of structure in the front of deformation band with a continuous distribution of dislocations within individual grains (*a*) and at a constant dislocation density (*b*) according to [10]

On this basis, development processes of strain hardening of metal at the propagation region of deformation bands have a discrete character. The resulting conclusion has a certain applied value. An example is the results of the development technology for obtaining alloys with ultra-fine grains and the search for areas of their further use [1]. In

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

general, development of strain hardening processes during propagation of deformation bands presupposes an inevitable increase in deforming stress. Based on this, the increase in deforming stress after completion of jerky flow should depend on the value of ε_L .

To estimate the indicated increase of stress the equation [9] was used:

$$\sigma = \alpha \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{\rho}. \quad (11)$$

After substituting (10) into (11), we obtained a relation for estimating the stress required for the formation of a deformation band nucleus in a single-phase alloy or low-carbon steel:

$$\sigma_1 = \alpha \mu b \sqrt{\frac{\varepsilon_L}{abd}} \quad (12)$$

The fulfillment of dependence (12) and the possibility of using it to describe the stress increase at the yield point is confirmed by experimental data for most low-carbon steels [9, 12]. Thus, at the moment of completion in the section of the jerky flow, a certain number of dislocations is already present in metal, which, depending on d , can be estimated from (12). At same time, the data indicating the lack of unambiguity at nature of influence of the ferrite grain size on characteristics of the work hardening of low-carbon steel in the indicated section of the deformation curve deserve some attention. In addition to a significant number of works showing an increase at coefficient and rate of strain hardening with an increase in d [1], there are data indicating a deviation from this ratio [8].

One of the explanations for these deviations at fulfillment of (1) is the absence of influence from substructure parameters in the initial state of low-carbon steel. As a confirmation of the above provisions, let us evaluate the hardening effect at region of deformation band formation depending on the ferrite grain size of low-carbon steel using relation (12). After substitution of experimental values ε_L in (12), for specific grain sizes of low-carbon steel ferrite in different structural states (Fig. 7, *a*), taking $\mu = 82260$ MPa, $b = 2.48 \cdot 10^{-7}$ mm, $a = 2$, $\alpha = 0.3$, the calculated results (σ_1) are shown in Fig. 7, *b*.

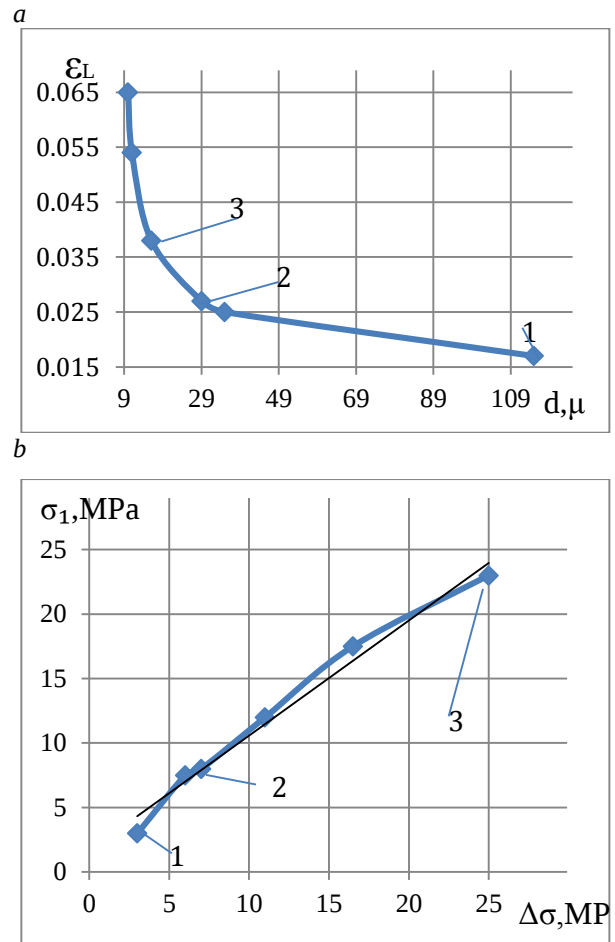


Fig. 7. Influence of ferrite grain size on steel with 0.06% C on ε_L – (*a*). The relationship between the calculated stress at the end of yield area (σ_1) according to (12) and obtained experimentally ($\Delta\sigma$), where $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_3$, σ_2 , and σ_3 , respectively, are the flow stress at the end and the beginning of the yield area (*b*).

For structural states of steel:

- 1 – isothermal transformation at a temperature of 550°C, deformation by drawing by 25–90% and annealing at 680°C, 1 h;
- 2 – martensite quenching and tempering at 680°C, 1 h;
- 3 – normalization

Comparative analysis between the calculated by (12) values of the stress increase at the section of jerky flow (σ_1) and determined from the tension curve ($\Delta\sigma$), indicates a fairly good agreement (Fig. 7, *b*), with a maximum difference between them no more than 5%. Thus, the observed increase at dislocation density during propagation of the deformation band should be considered as confirmation of the fact of development of strain hard-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ening processes. Indeed, if return to the analysis of deformation curve (Fig. 2), then extrapolated part of the curve (BC) can be considered as a kind of continuation of the CD section region of homogeneous strain hardening.

In this case, as a result of formal substitution of the current values of deforming stress and values of plastic deformation for the section of BC curve (Fig. 2) into the ratio:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{m \cdot (\sigma - \sigma_0)}{\varepsilon}, \quad (13)$$

it is possible to evaluate the development of strain hardening processes until reaching region with parabolic hardening (CD, Fig. 2). For the region beginning formation of the first deformation band (point B in Fig. 2), the current value of deforming stress should correspond to the value σ_0 , at absence of macroscopic plastic deformation (2). After substituting indicated values into relation (13) for point B at deformation curve, to obtain:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{m \cdot (\sigma - \sigma_0)}{\varepsilon} = \frac{m \cdot 0}{0} \quad (14)$$

Uncertainty in definition $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ according to (14), after transformation takes the form:

$$\lim_{\substack{d\varepsilon, \sigma \rightarrow \sigma_0 \\ \varepsilon \rightarrow 0}} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \lim_{\varepsilon'} \frac{m \cdot (\sigma - \sigma_0)'}{\varepsilon'} = m \quad (14a)$$

The fulfillment of relation (14a) confirms effect from change of structure during the formation of the embryo of band of the deformation on subsequent development of strain hardening processes in the region with a developed substructure.

Originality and practical value

One of the reasons for decrease at Luders deformation with an increase in the ferrite grain size of a low-carbon steel is an increase in strain hardening coefficient, which accelerate decomposition of uniform distribution of dislocations in the front of the deformation band. The flow stress during the initiating of plastic deformation is determined by the additive contribution of frictional stress of the crystal lattice, by state of the grain boundaries of ferrite, and density of mobile dislocations. It was found that the size of dislocation cell increases in proportion to the diameter of ferrite grain, which facilitates annihilation of dislocations during plastic deformation. Explanation of influence of the ferrite grain size of a low-carbon steel on the coefficient of strain hardening and magnitude of Luders deformation will make it possible to determine the optimal structural state of steels intended for cold plastic deformation.

Conclusions

1. With an increase in the ferrite grain size in a low-carbon steel, the decomposition likelihood of uniform dislocations distribution into a structure with a certain periodicity increases. This leads to a decrease in Luders deformation.

2. Based on the analysis of structural changes in low-carbon steel, the nucleation and propagation of the deformation band is accompanied by the development of strain hardening processes.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вакуленко И. А., Большаков В. И. *Морфология структуры и деформационное упрочнение стали*. Днепропетровск : Маковецкий, 2008. 196 с.
2. Вакуленко І. О., Левченко Г. В., Борисенко А. Ю. Про зв'язок опору мікротекучості та деформаційного зміцнення вуглецевої сталі. *Металознавство та обробка металів*. 2001. № 3. С. 19–22.
3. Глейтер Г., Чалмерс Б. *Большеугольные границы зерен*. Москва : Мир, 1975. 376 с.
4. Calado W. R., Barlosa R. Influence of Carbon Content and Deformation Temperature on Ultra-Grain Refinement of Plain Carbon Steels by Means of Torsion Test. *ISIJ International*. 2013. Vol. 53. Iss. 5. P. 909–914. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.909>
5. Conrad H. Effect of grain size on the lower yield and flow stress of iron and steel. *Acta Metallurgica*. 1963. Vol. 11. Iss. 1. P. 75–77. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(63\)90134-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(63)90134-2)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

6. Conrad H. On the mechanism of yielding and flow in iron. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1961. Vol. 198. Iss. 4. P. 364–375.
7. Cottrell A. H. *The relation between the structure and mechanical properties of metals*. National Physical Laboratory. Symposium № 15, 1963. P. 455–473.
8. Crist B. W., Smith C. V. Comparison of the hall-petch parameters of zone-refined iron determined by the grain size and extrapolation methods. *Acta Metallurgica*. 1967. Vol. 15. Iss. 5. P. 809–816. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(67\)90362-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(67)90362-8)
9. Garofalo F. Factors affecting the propagation of a lüder's band and the lower yield and flow stresses in iron. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1971. Vol. 2. Iss. 8. P. 2315–2317. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02917580>
10. Grash P., Ray R. K. 5 – Deep drawable steel. *Automotive Steels. Design, Metallurgy, Processing and Application*. 2017. P. 113–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100638-2.00005-5>
11. Hall E. O. The Deformation and Ageing of Mild Steel : III Discussion of Results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1951. Vol. 6. Iss. 9. P. 747–753. DOI: <https://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/303>
12. Imamura J., Hayakawa H., Taoka T. Contribution of Local Strain Rate at Lüders Band Front to Grain Size Dependence of Lower Yield Stress in Iron. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1971. Vol. 11. Iss. 3. P. 191–200. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.11.191>
13. Ren C., Dan W., Xu Y., Zhang W. Effects of Heterogeneous Microstructures on the Strain Hardening Behaviors of Ferrite-Martensite Dual Phase Steel. *Metals*. 2018. Vol. 8. Iss. 10. P. 824–841. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8100824>
14. Silva R. A., Pinto A. I., Kuznetsov A., Bott I. S. Precipitation and Grain Size Effects on the Tensile Strain-Hardening Exponents of an API X80 Steel Pipe after High-Frequency Hot-Induction Bending. *Metals*. 2018. Vol. 8. Iss. 3. P. 168–181. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8030168>
15. Szkopiak Z. C. The Hall-Petch parameters of niobium determined by the grain size and extrapolation methods. *Materials Science and Engineering*. 1972. Vol. 9. P. 7–13. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(72\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(72)90004-3)
16. Tsuchida N., Inoue T., Nakano H. Effect of ferrite grain size on the estimated true stress–true strain relationship up to the plastic deformation limit in low carbon ferrite–cementite steels. *Journal of Materials Research*. 2013. Vol. 28. Iss. 18. P. 2171–2179. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.221>

I. O. ВАКУЛЕНКО^{1*}, Д. М. БОЛОТОВА², С. В. ПРОЙДАК³, Б. КУРТ⁴, А. Е. ЕРДОГДУ⁵,
Г. О. ЧАЙКОВСЬКА⁶, Х. АСКЕРОВ⁷

^{1*}Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта vakulenko_ihor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

²Дніпровський ліцей залізничного транспорту, вул. Універсальна, 7, Дніпро, Україна, 490204, тел. +38 (098) 351 99 70, ел. пошта dasha.bolotova@i.ua, ORCID 0000-0001-6947-3963

³Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта proyda.sv@ukr.net, ORCID 0000-0003-2439-3657

⁴Каф. «Металургія та матеріалознавство», Невсехірський університет, Невсехір, Туреччина, 50300, тел. +90 (0506) 744 03 00, ел. пошта bkurt74@gmail.com, ORCID 0000-0002-7245-6774

⁵Каф. «Машинобудування», Карабукський університет, Карабук, Туреччина, 78050, тел. +90 (533) 355 55 61, ел. пошта aemraherdogdu@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-1831-3972

⁶Каф. «Матеріалознавство та обробка матеріалів», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 618 14 63, ел. пошта chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-6707-0159

⁷Каф. «Машинобудування», Карабукський університет, Карабук, Туреччина, 78050, тел. +90 (538) 455 04 45, ел. пошта hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

Деформаційне зміцнення низьковуглецевої сталі в області переривчастої течії

Мета. Основною метою роботи є оцінка впливу розміру зерна фериту низьковуглецевої сталі на розвиток процесів деформаційного зміцнення в області зародження й поширення смуг деформації. **Методика.** Як матеріал для дослідження були низьковуглецеві сталі з вмістом вуглецю 0,06–0,1 % C в різному структурному стані. Зразками для дослідження взято дріт діаметром 1 мм. Структурні дослідження металу здійснено з використанням світлового мікроскопа «Епіквант». Розмір зерна фериту визначено за методикою кількісної металографії. Різний розмір зерна фериту отримано в результаті поєднання термічних і термомеханічних обробок. Варіювання температур нагрівання, схем і швидкостей охолодження з використанням холодної пластичної деформації й подальшого відпалу дозволило змінювати розмір зерна фериту на рівні двох порядків значень. Криві деформації отримано в результаті розтягування зразків на випробувальній машині типу «Інстрон». **Результати.** На основі аналізу кривих розтягування низьковуглецевих сталей із різним розміром зерна фериту встановлено, що зародження й поширення пластичної деформації в області переривчастої течії супроводжується розвитком процесів деформаційного зміцнення. Дослідження процесу приросту густини дислокацій залежно від розміру зерна фериту низьковуглецевої сталі від моменту зародження пластичної деформації підтвердило існування зв'язку між розвитком деформаційного зміцнення в області переривчастої течії й області кривої з параболічним зміцненням. **Наукова новизна.** Однією з причин зменшення деформації Людерса зі збільшенням розміру зерна фериту низьковуглецевої сталі є зростання показника деформаційного зміцнення, що пришвидшує розпад рівномірного розподілу дислокацій у фронті смуги деформації. Напруження течії під час зародження пластичної деформації визначається адитивним внеском від напруження тертя кристалічних ґрат, стану меж зерен фериту й густини рухомих дислокацій. Установлено, що пропорційно діаметру зерна фериту відбувається збільшення розміру дислокаційної комірки, що полегшує анігіляцію дислокацій під час пластичної деформації. **Практична значимість.** Пояснення якісної залежності впливу розміру зерна фериту низьковуглецевої сталі на показник ступеня деформаційного зміцнення й величину деформації Людерса дозволить визначити оптимальний структурний стан сталей, які піддають холодній пластичній деформації.

Ключові слова: розмір зерна фериту; дислокація; деформація Людерса; показник деформаційного зміцнення; низьковуглецева сталь

REFERENCES

1. Vakulenko, I. A., & Bolshakov, V. I. (2008). *Morfologiya struktury i deformatsionnoe uprochnenie stali*. Dnipropetrovsk: Makovetskiy. (in Russian)
2. Vakulenko, I. O., Levchenko, G. V., & Borisenko, A. Yu. (2001). Pro zvyazok oporu mikrotekuchosti ta deformatsijnogo zmichnennya vuglecevoyi stali. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 3, 19–22. (in Ukrainian)
3. Gleyter, G., & Chalmers, B. (1975). *Bolsheuglovye granitsy zeren*. Moscow: Mir. (in Russian)
4. Calado, W. R., & Barbosa, R. (2013). Influence of Carbon Content and Deformation Temperature on Ultra-Grain Refinement of Plain Carbon Steels by Means of Torsion Test. *ISIJ International*, 53(5), 909–914. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.909> (in English)
5. Conrad, H. (1963). Effect of grain size on the lower yield and flow stress of iron and steel. *Acta Metallurgica*, 11(1), 75–77. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(63\)90134-2](https://doi.org/10.1016/0001-6160(63)90134-2) (in English)
6. Conrad, H. (1961). On the mechanism of yielding and flow in iron. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 198(4), 364–375. (in English)
7. Cottrell, A. H. (1963). *The relation between the structure and mechanical properties of metals*. National Physical Laboratory. Symposium No 15 (pp. 455–473). (in English)
8. Christ, B. W., & Smith, G. V. (1967). Comparison of the hall-petch parameters of zone-refined iron determined by the grain size and extrapolation methods. *Acta Metallurgica*, 15(5), 809–816. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(67\)90362-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(67)90362-8) (in English)
9. Garofalo, F. (1971). Factors affecting the propagation of a lüder's band and the lower yield and flow stresses in iron. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2(8), 2315–2317. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02917580> (in English)
10. Grash, P., & Ray, R. K. (2017). 5-Deep drawable steel. *Automotive Steels. Design, Metallurgy, Processing and Application*, 113–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100638-2.00005-5> (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

11. Hall, E. O. (1951). The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 64(9), 747-753. DOI: <https://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/303> (in English)
12. Imamura, J., Hayakawa, H., & Taoka, T. (1971). Contribution of Local Strain Rate at Lüders Band Front to Grain Size Dependence of Lower Yield Stress in Iron. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 11(3), 191-200. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.11.191> (in English)
13. Ren, C., Dan, W., Xu, Y., & Zhang, W. (2018). Effects of Heterogeneous Microstructures on the Strain Hardening Behaviors of Ferrite-Martensite Dual Phase Steel. *Metals*, 8(10), 824-841. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8100824> (in English)
14. Silva, R., Pinto, A., Kuznetsov, A., & Bott, I. (2018). Precipitation and Grain Size Effects on the Tensile Strain-Hardening Exponents of an API X80 Steel Pipe after High-Frequency Hot-Induction Bending. *Metals*, 8(3), 168-181. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8030168> (in English)
15. Szkopiak, Z. C. (1972). The Hall-Petch parameters of niobium determined by the grain size and extrapolation methods. *Materials Science and Engineering*, 9, 7-13. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(72\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(72)90004-3) (in English)
16. Tsuchida, N., Inoue, T., & Nakano, H. (2013). Effect of ferrite grain size on the estimated true stress–true strain relationship up to the plastic deformation limit in low carbon ferrite–cementite steels. *Journal of Materials Research*, 28(16), 2171-2179. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.221> (in English)

Received: November 10, 2020

Accepted: March 09, 2021

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК69:658.5

А. О. ІЧЕТОВКІН^{1*}

^{1*}Каф. «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (067) 625 57 92, ел. пошта artem.ichetovkin72@gmail.com, ORCID 0000-0002-5894-5168

Методика оцінки параметрів у механізмі вибору організаційно-технологічних рішень

Мета. Основною метою цього дослідження є обґрунтування методики оцінки параметрів вибору організаційно-технологічних рішень, на яких базується механізм вибору та які визначають доцільність того чи іншого рішення з позиції пріоритетності параметрів у межах інтегрованого підходу з урахуванням системного ефекту. **Методика.** Згідно з інтегрованим підходом, механізм оптимального вибору організаційно-технологічних рішень повинен базуватися на визначених параметрах і потребує застосування моделей, що враховують синергетичний ефект факторів: зростання ефективності діяльності в результаті інтеграції, злиття окремих частин у єдине ціле за рахунок системного ефекту, на підставі емпіричного методу. Головну роль у межах інтегрованого підходу відіграє оцінка параметрів організаційно-технологічних рішень, яку слід розглядати як один з інструментів інтегрованого управління. **Результати.** Зазначено, що механізм вибору організаційно-технологічних рішень має враховувати застосування технічних рішень та окремих конструктивних параметрів будівельних виробів у різних умовах зовнішнього середовища, оцінювати ризики, які властиві реалізації кожного організаційно-технологічного рішення, що підвищує його ефективність, за рахунок врахування сумарних ризиків. Виходячи з цього, обґрунтовано методику оперативної оцінки параметрів організаційно-технологічних рішень, яка дозволяє підвищити ефективність механізму їх вибору за рахунок врахування сумарних ризиків та сформувати матрицю оцінки типових організаційно-технологічних рішень. Розроблено інформаційну модель процесу вибору організаційно-технологічних рішень відповідно до завдань організаційно-технологічного проектування. **Наукова новизна.** Запропоновано обґрунтовану методику та інформаційну модель оцінки параметрів вибору організаційно-технологічних рішень, що є підґрунтям для вироблення алгоритмів, на підставі визначених параметрів ефективності вибору, із позиції впливу факторів зовнішнього середовища, інтегральних показників рішення, імовірності надійності реалізації проектного рішення без певних відхилень від проектних параметрів якості. **Практична значимість.** Результати дослідження сприяють типізації вироблення організаційно-технологічних рішень, забезпечуючи при цьому можливість урахування всіх інтегральних параметрів впливу та факторів зовнішнього середовища. Матрицю оцінки типових організаційно-технологічних рішень можна застосовувати як на рівні окремої будівельно-проектувальної організації, так і як основу інформаційної системи або програми для автоматизації процесу вибору організаційно-технологічних рішень, що пришвидшить їх аналіз і прийняття та підвищить ефективність механізму вибору.

Ключові слова: методика оцінки; інтегральні параметри; інтегрований підхід; механізм вибору організаційно-технологічних рішень; ризик; фактори зовнішнього середовища

Вступ

Організаційно-технологічну документацію процесів будівництва розробляють відповідно до ДБН «Організація будівельного виробництва»

А.3.1 – 5:2016 [2]. Вона містить загальні вимоги до організації будівельного виробництва, що передбачає впровадження комплексу заходів, спрямованих на досягнення високої продуктивності праці (максимально можливого зменшення витрат ручної праці та, відповідно,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

підвищення комплексної механізації); зменшення витрат ресурсів; досягнення оптимальних строків (скорочення термінів) будівництва; сприяння впровадженню сучасних технологій будівництва.

Таке регулювання, яке здебільшого має рекомендаційний характер щодо організаційно-технологічних рішень, формує вимоги до розв'язання наукової та практичної задачі підвищення якості таких рішень та потребує нових методів їх прийняття. Особливо це стає актуальним у будівництві та проектуванні складних, унікальних споруд з урахуванням законодавчих змін щодо нормування (надання пріоритетності параметричному методу). Ця задача пов'язана з великою кількістю факторів впливу на прийняття рішення, необхідністю охоплення та аналізу значних масивів інформації у відносно короткі терміни.

Ще однією проблемою, на наш погляд, є те, що сьогодні, будівельна галузь України не забезпечена нормативними документами, які б регулювали вироблення організаційно-технологічних рішень із використанням інформаційного моделювання. Водночас, у багатьох країнах, наприклад, США [13], Великобританії [15], Канаді [8], Новій Зеландії [14] та ін., є національні BIM-стандарты, що передбачають розробку проєктів організації будівництва з використанням технологій інформаційного моделювання [9]. Запровадження такого стандарту на підставі дослідження зарубіжних аналогів та їх адаптації до вітчизняних реалій є актуальним у плані розв'язання задачі підвищення якості організаційно-технологічних рішень.

Мета

Основною метою цього дослідження є обґрунтування методики оцінки параметрів вибору організаційно-технологічних рішень, зокрема механізму вибору, визначення доцільності того чи іншого рішення з позиції пріоритетності параметрів у межах інтегрованого підходу з урахуванням системного ефекту.

Методика

Згідно з інтегрованим підходом, механізм вибору організаційно-технологічних рішень на підставі оптимальності повинен базуватися на

таких параметрах, як кошторисна вартість проєкту (та окремих рішень), строки реалізації, параметри якості об'єкта з урахуванням ідентифікованого переліку ризиків, що супроводжують реалізацію того чи іншого варіанта технологічного рішення [4–5].

Під час вибору організаційно-технологічних рішень необхідно використовувати моделі, що враховують синергетичний ефект факторів (зростання ефективності діяльності в результаті інтеграції, злиття окремих частин у єдине ціле за рахунок системного ефекту (емерджентності)), які в значній мірі можуть відображатися в процесі реалізації проєкту [3].

Застосування емпіричного методу, на якому повинна ґрунтуватися побудова моделей, спрямованих на реалізацію механізму вибору організаційно-технологічних рішень, обумовлено врахуванням у межах вирішення проблеми оптимально вибору рішення оцінки ризиків, яку можна здійснити або за наявності ефективної системи прогнозування на підставі статистичних даних, або на підставі експертних оцінок [4]. Тому головну роль у межах інтегрованого підходу відіграє оцінка всіх зазначених вище параметрів організаційно-технологічних рішень, яку слід розглядати як один з інструментів інтегрованого управління.

Результати

Сучасні завдання організаційно-технологічного моделювання в будівництві передбачають узгодження значної кількості параметрів як у просторі, так і в часі. Процес ускладнюється необхідністю розв'язання значної кількості локальних організаційно-технологічних задач (оптимальний вибір) у ланцюгу зі значною кількістю комбінацій проєктних рішень.

Ключовим моментом вважаємо процес вибору критеріїв організаційно-технологічного рішення. Із позиції ефективності та загального процесу будівництва – це введення в експлуатацію об'єкта з проєктними показниками (параметри) у встановлений термін та із запланованими витратами. Щодо окремого під процесу або окремого організаційно-технологічного рішення – це критерії часу, витрат, ступінь впливу на ефективність проєкту взагалі.

Тобто основними вимогами на стадії реалізації об'єкта є: вимоги до якості (якісні показ-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ники); строки реалізації (витрати часу на реалізацію проєкту в цілому; витрати часу на прийняття рішення щодо усунення дефектів та відхилень); вартість (у цілому проєкту та окремих організаційно-технологічних рішень, спрямованих на усунення дефектів та відхилень (наслідки ризиків)) [11–13]. Якщо розглядати процес будівництва, наприклад, у ситуації порушення графіка виконання робіт, важливих параметрів проєкту кошторисна вартість, строк реалізації, якість об'єкта, що були викликані певними ризиками – технологічними, фінансовими, організаційними та ін., то перелік і зміст організаційно-технологічних рішень фактично може істотно вирізнитися від тих, на підставі яких було сформовано організаційно-технологічну документацію.

Незважаючи на тенденції до підвищення ефективності роботи проєктних організацій (розроблення організаційно-технологічних рішень), урахування розвитку технічних та інформаційних можливостей, досить часто дотримання графіків виконання виробничих процесів залишається надзвичайно складною проблемою, що може пояснюватись слабкою оцінкою умов зовнішнього середовища, узгодженості прогнозування наслідків їх впливу на об'єкт, його якісні показники (у тому числі якісні показники будівельних процесів). Відповідно, це також впливає й на інші параметри, які потрібно розглядати з урахуванням ризиків зовнішнього середовища. Проєктні організації спираються на геологічні інформаційні системи та застосовують [9–10]:

- широкий перелік ERP (EnterpriseResourcePlanning)-систем (організаційна стратегія інтеграції виробництва й операцій, управління трудовими ресурсами, фінансового менеджменту й управління активами, орієнтована на безперервне балансування й оптимізацію ресурсів підприємства за допомогою спеціалізованого інтегрованого пакета прикладного програмного забезпечення – коштовне та технічно складне рішення, що дозволяє оптимізувати та інтегрувати всі керівні процеси в межах компанії або проєкту);

- РМ (Project Manager)-програми (дозволяють побудувати процес роботи над проєктом із наявними ресурсами в рамках виділеного бюджету, визначених термінів і з обумовленою

якістю); в окремих випадках спеціалізовані програмні комплекси для здійснення проєктних і технологічних розрахунків.

Для розв'язання задач, що потребують обробки значного масиву даних, будівельна галузь, як і більшість інших, усе активніше застосовує методи комп'ютерного моделювання. У наш час такі методи розвиваються шляхом нарощування системи координат, і вже зараз існують моделі, що трансформуються із 3D в 6D, включаючи окрім просторових координат, часові, вартісні, технологічні [7, 10].

У цілому ефективність концепції інформаційного моделювання доведена як серед наукової спільноти, так і на реальних проєктах [1, 3, 4, 7, 9, 12], але створення таких моделей залишається трудомістким, вартісним процесом, і є доцільним лише в разі використання протягом усього життєвого циклу проєкту. Водночас упровадження інформаційного моделювання в будівельну практику українських компаній проходить дуже повільно та значно відстає від світових тенденцій у цьому напрямі, крім того, не забезпечує на сьогодні комплексного підходу та стратегічних напрямів розвитку будівельної галузі. Саме тому комплексність та інтегрованість є запорукою формування ефективного механізму вибору організаційно-технологічних рішень.

Крім того, вважаємо, що механізм вибору організаційно-технологічних рішень має враховувати застосування технічних рішень та окремих конструктивних параметрів будівельних виробів у різних умовах зовнішнього середовища, оцінювати ризики, які властиві реалізації кожного організаційно-технологічного рішення, що підвищує його ефективність, за рахунок врахування сумарних ризиків, а зовнішнє середовище, особливо зараз, має істотні передумови до змін та утворення додаткових ризиків у будівельній діяльності.

Формування організаційно-технологічних рішень – це ресурсовитратний процес, із великою кількістю залучених учасників та зацікавлених сторін. Крім того, прийняття рішення виключно на підставі математичних моделей та критеріїв іноді може відобразити всі його об'єктивні наслідки, якщо, наприклад, під час формування моделей або параметрів не були враховані всі фактори (особливо це стосується

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

вибору організаційно-технологічних рішень, спрямованих на усунення наслідків ризиків). Тому потребує обов'язковості застосування експертних методів та напрацювання матриці базових параметрів аналогічних ситуацій і реалізованих проєктів.

Ще однією умовою забезпечення ефективності механізму вибору організаційно-технологічного рішення має стати, окрім визначення параметрів, визначення пріоритетів; це пояснюється тим, що в разі настання певних ризиків [16] задля забезпечення певного рівня одного параметра (наприклад, якості) ми повинні змінити вимоги до іншого параметра (наприклад, строків реалізації та (або) вартості проєкту).

Основою процесу проєктування організаційно-технологічних рішень є технічні умови, які регламентують функціональне призначення та конструктивно-технологічні параметри [3], на підставі яких формується комплекс організаційно-технологічних рішень ($S_{ot1}, S_{ot2}, \dots, S_{otn}$) з урахуванням:

- конструктивних особливостей проєкту;
- обмежень (просторових, часових, логістичних та ін.);
- забезпечення фінансовими та трудовими ресурсами
- наявності та доступу до технологічних ресурсів;
- можливості використання певних видів обладнання й технологій;
- параметрів досягнення ефективності реалізації проєкту (параметри якості, надійності, функціональності, вартості);
- ідентифікованих ризиків та їх наслідків від певних організаційно-технологічних рішень.

Виходячи із завдань організаційно-технологічного проєктування, процес вибору організаційно-технологічних рішень можемо визначити у вигляді такої інформаційної моделі:

$$S_{oti} \{Z_i, P_{oti}, C_{ci}, C_{ti}, Q_i\}, \quad (1)$$

де Z_i – параметри зовнішнього середовища, у якому реалізовується проєкт; P_{oti} – показники (вимоги) організаційно-технологічного рішення;

C_{ci} – інтегральні вартісні показники організаційно-технологічного рішення; C_{ti} – інтегральні строки реалізації рішення; Q_i – параметри якості проєкту (у тому числі параметри надійності, функціональності, екологічності).

Оцінка варіантів організаційно-технологічних рішень передбачає необхідність врахування як інтегральних характеристик інформаційної моделі (C_{ci}, C_{ti}), так і ймовірність надійності реалізації проєктного рішення без певних відхилень від проєктних параметрів якості (рис. 1).

Застосування різних видів технологій та конструктивних параметрів у різних умовах зовнішнього середовища має різні рівні ризиків [11]. Тому така оцінка повинна базуватися на попередній оцінці факторів зовнішнього середовища, що можуть впливати на ефективність організаційно-технологічних ризиків. Модель ефективного обліку таких ризиків (R_j) має ґрунтуватися на інструменті оцінки параметрів впливу зовнішнього середовища на організаційно-технологічні рішення. Ця величина може бути визначена, як наслідок j -го ризику (втрати) L_j й передбачає оцінку його ймовірності (p_j), а очікувану величину ризику використовують для визначення страхового резерву часу (або матеріально-технічних ресурсів) [16]:

$$R_j = L_j \cdot p_j. \quad (2)$$

Якщо розглядати n варіантів організаційно-технологічного рішення ($S_{ot1}, S_{ot2}, \dots, S_{otn}$), то для кожного з них визначають:

$$\begin{aligned} \{C_{c1} - R_{Cc1}, C_{t1} - R_{Ct1}\} &= U_1; \\ \{C_{cn} - R_{Ccn}, C_{tn} - R_{Ctn}\} &= U_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Якщо визначити U_{if} , як фактичний стан інтегральних показників організаційно-технологічного рішення, а U_{ip} – проєктний, то з урахуванням впливу ризиків (R_j) можемо оцінити ймовірні відхилення показників організаційно-технологічного рішення:

$$\delta_i = U_{if} - U_{ip}. \quad (4)$$

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

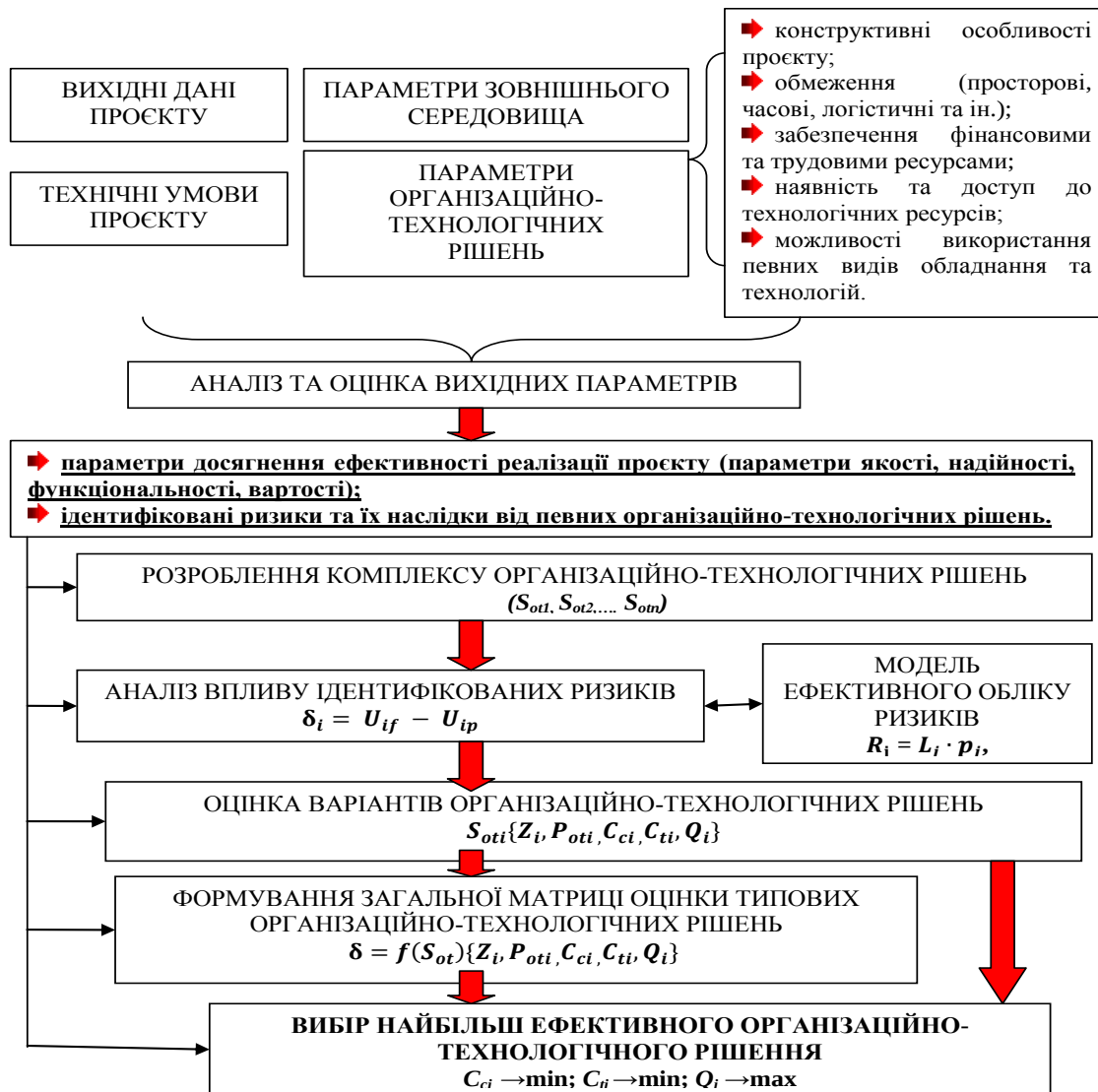


Рис. 1. Методика оцінки параметрів в механізмі вибору організаційно-технологічних рішень

Fig. 1. Methodology for evaluating parameters in the mechanism for choosing the organizational and technological solutions

Якщо виключити вплив форс-мажорних ризиків, то величина відхилення δ_i залежить від поєднання параметрів зовнішнього середовища та безпосередньо технологічних особливостей, які використовують у проектному рішенні. Відповідно, якщо технології, на яких базуються проектні рішення, подібні або ідентичні, то δ_i більшою мірою залежить від зовнішнього середовища (умов будівельного майданчика), а також конструктивних умов об'єкта будівництва.

Це дає змогу сформулювати оціночні алгоритми та параметри для певних подібних організа-

ційно-технологічних рішень і створити загальну матрицю оцінки типових організаційно-технологічних рішень, яка може бути сформована на підставі достовірних статистичних даних раніше реалізованих проектів і включати: параметри зовнішнього середовища; параметри організаційно-технологічного рішення; кількість можливо доцільних рішень; можливі відхилення фактичних показників від проектних. Така матриця здатна забезпечити інтеграцію умов реалізації проекту, організаційно-технологічними рішеннями та інтегральними

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

параметрами з урахуванням впливу на них ризиків.

Загальний вигляд такої моделі:

$$\delta = f(S_{ot})\{Z_i, P_{oti}, C_{ci}, C_{ti}, Q_i\}. \quad (5)$$

Оскільки варіанти проектних та, відповідно, організаційно-технологічних рішень, що наповнюють матрицю, можуть бути достатньо різнорідними, конкретний спосіб кодування в процесі оброблення даних залежить від моделі, яку будуть використовувати для оцінки δ .

Наукова новизна та практична значимість

У роботі застосовано обґрунтовану методику та інформаційну модель оцінки параметрів вибору організаційно-технологічних рішень, що є підґрунтям для вироблення алгоритмів, на підставі визначених параметрів ефективності вибору, із позиції впливу факторів зовнішнього середовища, інтегральних показників рішення, імовірності надійності реалізації проектного рішення без певних відхилень від проектних параметрів якості.

Матрицю оцінки організаційно-технологічних рішень можна застосувати для

автоматизації процесу вибору, що пришвидшить аналіз та прийняття рішень і підвищить ефективність механізму вибору.

Висновки

У результаті застосування методики оперативної оцінки параметрів організаційно-технологічних рішень, механізм їх вибору стане більш ефективним, за рахунок врахування сумарних ризиків. Це дозволить сформувати матрицю оцінки типових організаційно-технологічних рішень як на рівні окремої будівельно-проектувальної організації, так і може стати основою інформаційної системи або програми для автоматизації процесу вибору організаційно-технологічного рішення з урахуванням визначених у дослідженні параметрів.

Вибір найбільш ефективного організаційно-технологічного рішення буде відповідати умові: інтегральні вартісні показники організаційно-технологічного рішення: $C_{ci} \rightarrow \min$; інтегральні строки реалізації рішення $C_{ti} \rightarrow \min$; параметри якості проекту (у тому числі параметри надійності, функціональності, екологічності) $Q_i \rightarrow \max$. Такі умови також підлягають ранжуванню за пріоритетністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гоц В. В. *Інтегроване управління інформаційним середовищем девелоперських проектів* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. Київ : КНУБА, 2014. 25 с.
2. *ДБН А.3.1-5-2016 Організація будівельного виробництва*. [Чинний від 2016-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 49 с.
3. Жаров Я. В. Оценка параметров организационно-технологических решений на основе нейросетевых моделей. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2018. № 2. С. 110–115. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5a816be4a063d1.42360453
4. Заяць Є. І. Розвиток методів оцінки, обґрунтування та вибору раціональних організаційно-технологічних рішень зведення висотних багатофункціональних комплексів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 6 (207). С. 37–44.
5. Ісасенко Д. В., Плоский В. О., Теренчук С. А. Формування нечіткої бази знань системи підтримки прийняття рішень з технічного регулювання будівельної діяльності. *Управління розвитком складних систем*. 2018. № 35. С. 168–174.
6. Лукманова И. Г., Нежникова Е. В. Комплексная оценка системы менеджмента качества в строительстве. *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10. С. 1791–1795.
7. Омеляненко М., Омеляненко М. Інформаційна модель об'єкта нормування як основа визначення нормативних вимог з застосуванням параметричного методу нормування. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2020. № 58. С. 233–247. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.58.233-247>

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

8. AEC (CAN) BIM protocol. Implementing Canadian BIM Standards for the Architectural, Engineering and Construction industry based on international collaboration. Version 1. The AEC (UK) committee, AEC (CAN) CanBIM designers committee. 2012. 54 p.
9. Chen L., Luo H. A BIM-based construction quality management model and its applications. *Automation in Construction*. 2014. Vol. 46. P. 64–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.009>
10. Gajzler M., Zima K. Evaluation of planned construction projects using fuzzy logic. *International Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 15. Iss. 4. P. 641–652. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0177-8>
11. Love P. E. D., Li H. Quantifying the causes and costs of rework in construction. *Construction Management & Economics*. 2000. Vol. 18. Iss. 4. P. 479–490. DOI: <https://doi.org/10.1080/01446190050024897>
12. Nasirzadeh F., Khanzadi M., Afshar A., Howick S. Modeling quality management in construction projects. *International Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 11. Iss. 1. P. 14–22.
13. *National BIM standard – United States. Version 2*. National Institute of Building Sciences building SMART alliance. 2012. 676 p.
14. *New Zeland BIM Handbook. A guide to enabling BIM on building projects*. Building and construction productivity partnership. 2014. 142 p.
15. *PAS 1192-2:2013. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modeling*. The British Standards Institution. 2013. 68 p.
16. Serpell A., Ferrada X., Rubio L., Arauzo S. Evaluating risk management practices in construction organizations. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015. Vol. 194. P. 201–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.135>

A. A. ICHETOVKIN^{1*}

^{1*}Dep. «Industrial and Civil Engineering», Zaporizhzhia National University, Sobornyi Av., 226, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (067) 625 57 92, e-mail artem.ichetovkin72@gmail.com, ORCID 0000-0002-5894-5168

Methodology of Estimation of Parameters in the Mechanism of Selecting Organizational and Technological Solutions

Purpose. The aim of this study is the substantiation of the methodology for assessing the choice parameters of the organizational and technological solutions, the selection mechanism is based on and determining the expediency of a particular decision regarding the priority of certain parameters within the integrated approach taking into account the systemic effect. **Methodology.** According to the integrated approach, the mechanism for the optimal choice of the organizational and technological solutions should be based on certain parameters. The selection mechanism requires the use of models that take into account the synergistic effect of the following factors: efficiency increase of the activity as a result of integration, merging of individual parts into a single system due to the systemic effect based on the empirical method. The main role within the integrated approach belongs to the assessment of the parameters of organizational and technical solutions, which should be considered as one of the tools of integrated management. **Findings.** It was determined that the mechanism for selecting the organizational and technological solutions should take into account the use of technical solutions and individual design parameters of construction products in various environmental conditions, assess the risks inherent in the implementation of each organizational and technological solution, which increases its efficiency by taking into account the total risks. Proceeding from this, a methodology for the rapid assessment of the parameters of organizational and technological solutions has been substantiated. The methodology makes it possible to increase the efficiency of the mechanism for their selection by taking into account the total risks and to form a matrix for assessing typical organizational and technological solutions. An informational model of the process of choosing organizational and technological solutions according to the tasks of organizational and technological design is proposed. **Originality.** A substantiated methodology and information model for assessing the parameters of the choice of organizational and technological solutions is proposed, which is the basis for the development of algorithms for their assessment, based on certain parameters of the choice efficiency, from the standpoint of the influence of environmental factors, integral indicators, the likelihood of reliability of the implementation of the design quality parameters. **Practical value.** The results of the study help to make the process of developing organizational and technological solutions typical, while ensuring the ability to take into account all integral parameters of the impact, and environmental factors. The matrix for evaluating typical organizational and technological solutions can be used both at the level of a separate construction and design organiza-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

tion, and as the basis of an information system, or a program for automating the process of selecting organizational and technological decisions, which will speed up the process of analysis and adoption of such decisions, and increase the efficiency of the choice mechanism.

Keywords: assessment methodology; integral parameters; integrated approach; mechanism for choosing organizational and technological solutions; risk; environmental factors

REFERENCES

1. Hots, V. V. (2014). *Intehrovane upravlinnya informatsiynym seredovyschem developers'kykh proektiv* (Extended abstract of PhD dissertation). Kiev. (in Ukrainian)
2. *DBN A.3.1-5-2016 Orhanizatsiya budivel'noho vyrobnytstva*. (2016). (in Ukrainian)
3. Zharov, I. (2018). Assessment of options for organizational and technological solutions based on neural network models. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named after. V. G. Shukhov*, 3(2), 110-115. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5a816be4a063d1.42360453 (in Russian)
4. Zaiats, Ye. I. (2015). Development of methods of the assessment, substantiation and choice of rational organizational and technological decisions of construction of high-rise multifunctional complexes. *Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 6(207), 37-44. (in Ukrainian)
5. Isaenko, D. V., Ploskyi, V. O., & Terenchuk, S. A. (2018). Formation of the fuzzy knowledge of the knowledge support system for decisionmaking technical regulation in construction. *Management of Development of Complex Systems*, 35, 168-174. (in Ukrainian)
6. Lukmanova, I. G., & Nezhnikova, E. V. (2013). Comprehensive assessment of quality management systems in construction. *Fundamental research*, 10, 1791-1795. (in Russian)
7. Omelianenko, M., & Omelianenko, M. (2020). Information model of the standardization object as the basis of determination of normative requirements with application of parametric standardization method. *Current Problems of Architecture and Urban Planning*, 58, 233-247. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.58.233-247> (in Ukrainian)
8. *AEC (CAN) BIM protocol. Implementing Canadian BIM Standards for the Architectural, Engineering and Construction industry based on international collaboration. Version 1*. (2012). The AEC (UK) committee, AEC (CAN) CanBIM designers committee. (in English)
9. Chen, L., & Luo, H. (2014). A BIM-based construction quality management model and its applications. *Automation in Construction*, 46, 64-73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.009> (in English)
10. Gajzler, M., & Zima, K. (2017). Evaluation of Planned Construction Projects Using Fuzzy Logic. *International Journal of Civil Engineering*, 15(4), 641-652. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0177-8> (in English)
11. Love, P. E. D., & Li, H. (2000). Quantifying the causes and costs of rework in construction. *Construction Management and Economics*, 18(4), 479-490. DOI: <https://doi.org/10.1080/01446190050024897> (in English)
12. Nasirzadeh, F., Khanzadi, M., Afshar, A., & Howick, S. (2013). Modeling quality management in construction projects. *International Journal of Civil Engineering*, 11, 14-22. (in English)
13. *National BIM standard-United States. Version 2*. (2012). National Institute of building sciences building SMART alliance. (in English)
14. *New Zeland BIM Handbook. A guide to enabling BIM on building projects*. (2014). Building and construction productivity partnership. (in English)
15. *PAS 1192-2:2013. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modeling*. (2013). The British Standards Institution. (in English)
16. Serpell, A., Ferrada, X., Rubio, L., & Arauzo, S. (2015). Evaluating Risk Management Practices in Construction Organizations. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 194, 201-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.135> (in English)

Надійшла до редколегії: 11.11.2020

Прийнята до друку: 11.03.2021

УДК 624.139:539.37

В. Ю. УЛЬЯНОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Інженерна геологія і геотехніка», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 43, ел. пошта egig@pgasa.dp.ua,
ORCID 0000-0002-9028-3408

Шляхи підвищення ефективності термопресіометрії

Мета. У роботі передбачено визначення шляхів підвищення ефективності інженерних досліджень, виходячи зі значного обсягу розвідувальних робіт, що необхідно під час створення сучасних техногенних об'єктів, з урахуванням недоліків наявних приладів та устаткувань, які використовують для вимірювання напруженого стану ґрунтів, та у зв'язку з потребою у вдосконаленні конструкції термопресіометрів, що мають сприяти дослідженням різноманітних мерзлих ґрунтів. **Методика.** Порівняльно-аналітичним методом та за методом аналогії обрано шляхи вдосконалення лопатевого термопресіометра для дослідження мерзлих ґрунтів із різноманітними заповнювачами. Теплотехнічними розрахунками визначено глибину відтавання, абсолютне осідання ґрунту, модуль деформації та ін. **Результати.** Визначені проблемні питання застосування наявних термопресіометрів (обмеженість досліджень ґрунтів певного типу, трудомісткість та недостатня точність показань) можуть бути подолані завдяки запропонованій удосконаленій конструкції лопатевого термопресіометра для випробувань мерзлих піщано-глинистих ґрунтів, що базується на поліпшеній схемі нагрівання, застосуванні якісних матеріалів та змінюванні форми лопатей і корпусу. Прилад призначений для застосування на багатолітньомерзлих і природних мерзлих ґрунтах світу, зокрема й України. **Наукова новизна.** Для вивчення деформаційних характеристик ґрунтів, їх теплотехнічних показників, у тому числі вимірювання чаші відтавання багатолітньомерзлих і сезонномерзлих ґрунтів уперше запропоновано модель удосконаленого термопресіометра з поліпшеною формою корпусу з якісних корозійостійких матеріалів, зокрема й неметалевих; зі скороченням кількості його лопатей до однієї висувної секторної лопаті-штампа (квадратної або округлої) та використанням однієї нагрівальної лопаті-штампа; спеціальну конструкцію щупа з механічним/гідролічним приводом датчика з термopарою (або з двома щупами-«вилкою» – для поліпшення вимірювань). Також рекомендовано впровадження електричної провідної системи, призначеної для відталих ґрунтів, зі штоком для вимірювання висувної лопаті-штампа. З'ясовано можливість застосування термопресіометра під час дослідження сезонномерзлих ґрунтів. **Практична значимість.** Удосконалення моделі приладу повинно сприяти його застосуванню в інженерно-геологічних дослідженнях під час різноманітних видів будівництва, зокрема транспортного й гідротехнічного, де використовують методи глибинного заморожування слабких і нестійких ґрунтів.

Ключові слова: лопаті-штампи; термопресіометр; деформаційні властивості ґрунтів; чаша відтавання; метод «гарячого штамп»

Вступ

Господарське освоєння територій супроводжується формуванням промислових, містобудівельних, транспортних та інших геосистем, кожна з яких потребує відповідних інженерно-геологічних досліджень, спрямованих на комплексне вивчення природних і техногенних умов району. Попри численність праць з інженерно-геологічних вишукувань неодноразово виникало питання про їхню ефективність і про відсутність у нормах обґрунтованої методики оцінювання достатності та якості отриманої інженерно-геологічної інформації, що дає великий простір для суб'єктивного підходу до планування й проведення дослідницьких робіт.

Багаторічний досвід роботи проєктних організацій показує, що в практиці інженерно-геологічних досліджень деякі польові методи визначення деформаційних властивостей ґрунтів є малопридатними через їхню трудомісткість, довготривалість і недостатню точність. Проте вони доцільні й представляють значний інтерес із точки зору застосування в умовах усе більшого ускладнення будівельних робіт (через різноманітність типів ґрунтів і кліматичних умов, техногенний вплив на ґрунти в минулому та сьогодні, наявність у межах територій ґрунтів зі специфічними властивостями) [6]. Однією з таких причин, які становлять складність будівництва, є процеси змерзання ґрунту, що і стало основою

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

цієї роботи, у якій розглянемо термопресіометри – пристрої для вимірювання деформаційних характеристик і властивостей мерзлих ґрунтів у польових умовах [1–3, 11–12, 14].

Як відомо, за конструкцією та характером впливу на стінки бурових свердловин пресіометри поділяють на радіальні, лопатеві та із секторним прикладанням навантаження. Лопатеві пресіометри звичайної конструкції (наприклад, ЛПМ–14 та ін.) впливають на ґрунти горизонтальним навантаженням, яке передається плоскими вертикальними сталевими пластинами-штампами: штампи зрізають стінки лінійної свердловини з мінімальним порушенням ґрунту. Але такі прилади застосовують не для всіх типів ґрунтів (винятком є, наприклад, великоуламкові). Пресіометри із секторним горизонтальним прикладанням навантаження, яке передається двома сталевими, циліндрично вгнутими плитами (штампами), розташованими на протилежних сторонах свердловини, кожна з яких охоплює сектор від 45 до 90°, є різновидами звичайних лопатевих пресіометрів, але з більшим ступенем урахування роботи приладу у свердловині.

Менш відомі такі ж прилади тільки з одним висувним штампом, із розташованим на протилежному боці секторним виступом такої ж форми, як і висувний штамп (навантаження стінок свердловини від цього не змінюється, оскільки обидва сектори тиснуть на стінки з однаковою силою), а ось конструкція їх дещо спрощена: циліндричні штампи секторних пресіометрів розкриваються горизонтально, навантажуючи стінки свердловини. До цього ж типу належить і свердловинний лопатевий пресіометр гідравлічний ЛПП–42 діаметром 273 мм, сконструйований Л. С. Амаряном (Виробничий і науково-дослідний інститут інженерних вишукувань в будівництві (ВНДІВБ)) для дослідження широко розповсюджених грубоуламкових ґрунтів із різноманітними заповнювачами [4]. Значного поширення цей тип пресіометра не отримав, але відомий досвід успішної експлуатації таких пресіометрів, виготовлених за оригінальними кресленнями відділом дослідних робіт «ПівСхідТІБВ» (м. Магадан, 1986–1989 рр.), за участю автора цієї статті [14].

Через складність виконання та трудомісткість проведення випробувань до серійного виробництва прилади цього типу не дійшли, хоча поодинокі спроби відтворення та застосування на об'єктах будівництва підтверджені авторськими свідоцтвами [11, 12], у яких указано, що термопресіометри сприяють відтаванню ґрунту, яке виконують пропусканням струму вздовж приладу, оснащеного еластичною оболонкою, а змінювання радіуса відталого зони визначається за змінюванням електричного опору ґрунту. У модифікаціях цього приладу для прогрівання були застосовані пружинячі пластини, розташовані по торцях корпусу [2]. За [14], неодноразовими були спроби поліпшення показників визначення деформаційних властивостей багатолінійно-мерзлих ґрунтів, зокрема і великоуламкових, із метою зниження трудовитрат і часу виконання дослідів, що відображено в авторських свідоцтвах № 1240826 (1985), № 1079749 (1981), SU 1573088 A1 (1990). Як з'ясувалося в результаті практичних досліджень, характеристики стисливості ґрунтів, які визначають термопресіометрами радіального типу на основі лінійно-деформованого простору, постійно відрізнялися від характеристик, отриманих під час випробування ґрунтів методом так званого «гарячого штампа».

Окрім питання точності термопресіометричного методу, багато не з'ясовано щодо параметрів перехідного шару між мерзлим і відталим ґрунтом, які вимірюють під час роботи радіальних термопресіометрів, а також виникає необхідність урахування форми конуса відталого ґрунту, яка впливає на розрахунки стисливості. Із таких та інших причин розроблені моделі й досі мало вживають у практиці інженерних досліджень.

Про спроби здійснення термопресіометричних досліджень на практиці свідчать як відомчі нормативні документи, так і матеріали профільних науково-практичних конференцій та збережені науково-технічні звіти [7, 13, 14]. Однак і після 1991 р. інформація про випробування мерзлих ґрунтів термопресіометрами здається неповною, хоча зрідка про них і згадують в окремих виданнях. Зокрема, у своїй книзі М. А. Мінкін, очевидно, у довідкових цілях [8], окремо вказує, що вже під час досліджень ґрунтів та-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

кими приладами відзначена похибка, яка досягає 30–40 % і більше (у зв'язку з неточністю визначення обсягів і форми конуса відталого ґрунту, а також через анізотропію самих відкладів). Як було зазначено, вживання термопресіометрів тісно пов'язане з проблемами вивчення багатолітньомерзлих ґрунтів [1–3, 10–12, 14, 16–20]. Але і в Україні виникають проблеми під час робіт із мерзлим ґрунтом. Тут корисні й доречні дослідження Б. В. Моркляника й П. О. Проценка з вивчення морозного здимання ґрунтів у процесі використання теплових насосів, зокрема, із розподілення вологи в мерзлих ґрунтах і змінювання щільності та деяких властивостей ґрунтів (випинання ґрунту), що важливо й у випадку прикладання так званого «гарячого» привантаження до штампів, і під час вибору його габаритів [9].

З огляду на те, що серйозні проблеми випробування мерзлих ґрунтів у польових умовах ще й досі залишилися, можливе розширення меж уживання термопресіометрів.

Слід відзначити, що в Україні багатолітньомерзлі ґрунти як такі повністю відсутні, проте подібні дослідження цілком доречні під час виконання геотехнічного контролю в транспортному будівництві (зокрема, під час будівництва метро в Дніпрі та інших містах), а також у гідротехнічному будівництві, де використовують методи глибинного заморожування слабких ґрунтів. Наукова компетентність у цій галузі може виявитися корисною під час розширення поля діяльності українських проєктних та будівельних організацій і за межами країни.

Мета

З огляду на викладене мета роботи полягає в пошуку шляхів підвищення якості інженерно-геологічних випробувань та поліпшення визначення деформаційних властивостей мерзлих ґрунтів різних типів, із використанням досвіду проведення таких досліджень для оцінювання представленого варіанта термопресіометра.

Методика

У роботі використані такі аналітичні методи досліджень, як порівняльно-історичний та метод аналогії. Узагалі питання методології тісно

пов'язані з методами проведення випробувань та обробки інформації.

Головною відмінністю у проведенні дослідів із мерзлими ґрунтами за допомогою «гарячих» штампів є необхідність попереднього утворення під ними зони відталого ґрунту глибиною не менше ніж 0,5 діаметра штампа. Зі спорядженням для якісного проведення початкового етапу подібних випробувань і пов'язана більшість технічних проблем та правильне визначення глибини відталого ґрунту. Ураховуючи, що термопресіометри здебільшого використовують для визначення механічних властивостей мерзлих ґрунтів, а отримані дані залежать від льодистості й швидкості промерзання/відтавання ґрунту, дослідження морозного стану ґрунтів і суміжні з ними досі залишаються проблемними питаннями, зокрема щодо: наявності та ширини обігрівального кільця, глибини відтавання порід під ним, тиску, за якого відбувається відтавання ґрунту, а також способів обробки результатів та оцінювання величини осідання, які залежать від типів ґрунтів. За результатами досліджень була розроблена методика обробки даних, заснована вже на пружно-пластинчатому підході, що більш цілковито враховує особливості напружено-деформованого стану ґрунту навколо відталої свердловини. Для виконання термопресіометрії, як правило, рекомендують, проходячи гірничі виробки (котловани, шурфи, дудки та бурові свердловини), забезпечувати не порушену будову ґрунтів та уникати просякання поверхневими водами та опадами. Для досліджень обирають мінімальну товщину шару ґрунту (не менше ніж 1,5 довжини лопаті пресіометра), а зразки ґрунту відбирають не ближче ніж за 3 м від осі виробки. Сутність дослідів полягає в східчастому додаванні навантаження (по 0,01... 0,1 МПа); наконечник зі штоком тарують (площу лопаті обирають залежно від типу ґрунту). Наконечник установлюють методом вдавлювання, після чого вимірюють тиск; після кожного ступеня навантаження витримують час до умовної стабілізації деформації ґрунту. За критерій умовної стабілізації випробуваного обсягу ґрунту обирають переміщення лопаті-штампа. Для розрахунку коефіцієнтів стисливості a та відтавання A запропоновані залежності:

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

$$a = \frac{\frac{Ka\Delta U}{\Delta P} + (1-\nu)\left(\frac{R}{ro}\right)^2}{(1-\nu)\left(\frac{R^2}{ro^2} - 1\right)}; \quad (1)$$

$$A = \frac{KA \Delta V}{V - aPn}, \quad (2)$$

де ΔU – переміщення стінки свердловини під тиском ΔP ; ro і R – радіуси свердловини та відталої зони відповідно; ν – коефіцієнт Пуассона для відталого ґрунту; V і ΔV – початковий обсяг чаші відтавання і його приріст унаслідок відтавання відповідно; Pn – побутовий тиск у мерзлому ґрунті на відмітці випробувань; K_a та K_A – розрахункові коефіцієнти, які визначають під час розв’язання відповідних крайових задач (через міцнісні характеристики ґрунту і радіус чаші відтавання) [14].

Результати

Після багаторічної перерви в подібних дослідженнях запропонована відносно нова концептуальна модель приладу, яка позбавлена більшої частини недоліків пресіометрів, розроблених раніше.

Для проведення досліджень мерзлих ґрунтів слід конструктивно змінити базову модель термомпресіометра Л. С. Амаряна ЛПГ–42 (рис. 1).

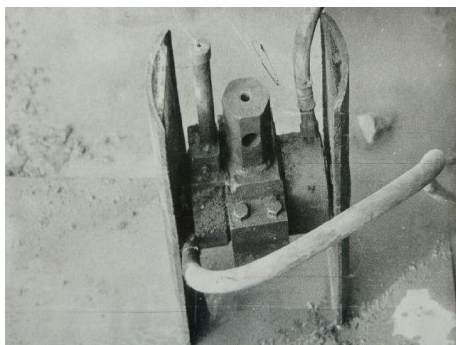


Рис. 1. Пресіометр ЛПГ–42 конструкції Л. С. Амаряна

Fig. 1. Blade pressiometer LPG–42 designed by L. S. Amarian

У новій моделі передбачена суттєво поліпшена система нагрівання лопаті, що може здійснюватися такими способами:

а) ТЕНОм, змонтованим в об’ємні маслонапоповнені лопаті-штампи, оснащені запобіжним клапаном, із живленням його струмом по кабелю

від малогабаритного бензинового агрегата-генератора на поверхні з тепло- й електроізоляцією для забезпечення мінімального нагрівання самого корпусу приладу (щоб запобігти «коксованню» масла в циліндрі гідросистеми);

б) теплим повітрям із поверхні від газового пальника із системою шлангів – за аналогією з гарячим штампом типу ШП5000Т конструкції АТ «ГЕОТЕСТ»;

в) за допомогою інших нагрівальних елементів, наприклад, розробки ТОВ «КрасГеоТехніка».

Удосконалення приладу можливе шляхом улаштування закритого циліндричного корпусу, звуженого по краях (овальної форми); застосування більш якісних матеріалів, стійких до корозії та спрацювання, зокрема й неметалевих; використання тільки однієї висувної лопаті-штампа секторного типу квадратної або округлої форми в плані й тільки однієї нагрівальної лопаті-штампа. Для вимірювання температур і контролю глибини чаші відтавання пропонуємо щуп із механічним/гідравлічним приводом датчика з термопарою (можливий і не один щуп, і з іншим його розміщенням, наприклад, у вигляді «вилки» – для зручності проведення вимірювань). Також пропонуємо впровадження електричної провідної системи, призначеної для відталих ґрунтів, зі штоком для вимірювань довжини висунування лопаті-штампа.

Можливі й більш складні (й витратні) варіанти контролю утворення чаші відтавання, наприклад:

а) під час розробки 2-х свердловин в одній із них (діаметром 273 мм) розташовують сам прилад, а в іншій (діаметром до 76 мм, на відстані не більше ніж 0,3 м від свердловини 273 мм) навпроти осі висунування лопаті-штампа розташовують саму термоду, призначену для вимірювання температур у межах нагрівальної лопаті-штампа;

б) радіохвильовими датчиками або датчиками, заснованими на ядерно і теплофізичних принципах (їх застосування потребує проведення спеціальних, більш дорогих досліджень, що впливає на вартість приладу);

в) для утворення й підтримування тиску можливе замінування гідравлічної (масляної) системи на електрогідравлічну або електричну.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Зазначимо, що проведення випробувань таким типом гарячого пресіометра, крім початкового етапу, не відрізняється від звичайної пресіометрії, але залежно від типів ґрунтів можуть бути внесені деякі зміни. Наприклад, для вільного стікання відталої води в місці торкання гарячої лопаті-штампа не потрібно розмішувати сам прилад на усті свердловини, його підвішують на штангах або тросі вище за забій і не менше ніж на 0,5 м (не виключено й використання висувного/нерухомого штока-обмежувача в днищі приладу). Ураховуючи можливість приладу, його рекомендують для досліджування ґрунтів без грубоуламкових включень (або з їх мінімальною кількістю), так само необхідно виключити випробування сильнольдистих ґрунтів (для запобігання катастрофічного опливання стінок свердловини) навіть у зимовий період, підбираючи режим нагрівання дослідним шляхом – залежно від температури ґрунту на відмітці випробувань, яку визначають в суміжній термосвердловині малого діаметра або на підставі теплофізичних розрахунків.

Для виключення примерзання приладу в зимовий період після етапу утворення чаші відтавання необхідно підтримувати плюсову температуру висувної лопаті пресіометра, а захисний кожух приладу (крім висувної лопаті), зокрема й неметалевий (за достатньої конструкційної міцності), у разі необхідності слід покривати синтетичним мастилом проти обледеніння.

Для постійного візуального контролю за станом стінок свердловини та запобігання їх обвалення, щоб уникнути заклинювання приладу в стволі, передбачено освітлювальне обладнання в самій свердловині (з розміщенням його на корпусі самого приладу).

Послідовність виконання випробувань обирають залежить від теплофізичних властивостей ґрунтів, отже, інтервал між ними в одній свердловині з урахуванням можливого порушення суцільності середовища повинен складати не менше ніж 2–3 м.

Зазначимо також, що сучасні вимоги до проведення робіт із використанням горючих матеріалів передбачають належну протипожежну безпеку (наявність додаткового міцного вогнегасника, окрім штатного на буровій установці).

Наукова новизна та практична значимість

Уперше запропоновано концептуальну модель удосконаленого термопресіометра, з поліпшеною формою корпусу з якісних корозієстійких матеріалів, зокрема й неметалевих; зі скороченням кількості його лопатей до однієї висувної секторної лопаті-штампа (квадратної або округлої) та використанням однієї нагрівальної лопаті-штампа; зі спеціальною конструкцією щупа з механічним/гідравлічним приводом датчика з термопарою; також рекомендовано впровадження електричної провідної системи. Передбачено розширення меж застосування приладу, оскільки він придатний не тільки для багатолітньомерзлих ґрунтів, а й для сезонномерзлих (що мають мінусову температуру та містять у своєму складі лід).

Відзначимо, що вдосконалення роботи термопресіометра, яке припускає контроль за утворенням чаші відтавання, по-новому ставить перед дослідниками питання вивчення напруженого стану не тільки багатолітньомерзлих, а й мерзлих ґрунтів, потребує уваги до ретельності вимірів ширини обігрівального кільця під час роботи приладів, визначення глибини відтавання і розрахункового тиску, за якого відбувається відтавання, що, своєю чергою, висвітлює численні дискусійні проблеми ґрунтознавства й механіки ґрунтів.

Упровадження цієї моделі приладу в практику геотехнічного контролю під час будівництва в ґрунтах, які потребують заморожування, а також у роботах з природними сезонномерзлими ґрунтами, узагалі застосування термопресіометрів у нашій країні сприяло би набуттю необхідної компетенції в цій галузі.

Висновки

У результаті досліджень та аналізу наявних розробок представлені шляхи розв'язання істотної інженерної проблеми в будівництві на мерзлих ґрунтах – поліпшення визначення їх деформаційних характеристик за допомогою термопресіометра. Запропонована модель приладу має сприяти отриманню вірогідних деформаційних характеристик (коефіцієнтів відтавання, стисливості, модуля деформації). Дискусійним

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

питанням залишається перспектива застосування термопресіометра для різних типів природних мерзлих ґрунтів, оскільки прилад первісно створений для випробувань багатолітньомерзлих, талих грубоуламкових ґрунтів. Представлені у статті пропозиції є ефективним досвідом пошуків та досліджень не тільки для будівництва на мерзлих ґрунтах. Рекомендовано застосовувати прилад у транспорт-

ному й гідротехнічному будівництві для глибинного заморожування слабких і нестійких ґрунтів, щоб сприяти скороченню трудовитрат та часу проведення випробувань перед початком будівництва або у випадках перебудови, аварій та інших незапланованих дій, у тому числі й на залізницях – усюди, де проводять випробування мерзлих порід у зимовий період.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алейников А. С., Петрова А. Г. Численное решение задачи протаивания мерзлого грунта с учетом инфильтрации осадков. *Известия Алтайского Государственного Университета*. № 4 (96). 2017. С.72–77. DOI: [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2017\)4-12](https://doi.org/10.14258/izvasu(2017)4-12)
2. Амарян Л. С. Лопастная прессиометрия и ее применимость в инженерной геологии. *Технология и техника полевых испытаний грунтов. Сб. науч. трудов ПНИИИС*. 1986. С. 14–20.
3. Амарян Л. С., Васильев А. В., Цинский Б. В. *Руководство по испытанию грунтов лопастными прессиометрами и прессиометрами-сдвигомерами*. ПНИИИС, 1981. 42 с.
4. *ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости*. Москва : Стандарт-информ, 2013. С. 10–13.
5. Ефимов В. М., Кравцова О. Н., Степанов А. В., Тимофеев А. В., Васильчук Ю. К., Таппырова Н. И. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на прочность мерзлых грунтов криолитозоны Республики Саха (Якутия). *Арктика и Антарктика*. 2017. № 4. С. 80–85. DOI: <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.4.25035>
6. Ефимов В. М., Степанов А. В., Таппырова Н. И., Кравцова О. Н., Степанов А. А. Влияние циклов промерзания – протаивания на тепло-массообменные свойства техногенных криогенных грунтов северо-восточных районов криолитозоны. *Арктика и Антарктика*. 2017. № 4. С. 73–79. DOI: <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.4.25027>
7. Исаев В. С., Тюрин А. И., Сергеев Д. О., Горшков Е. И., Волков Н. Г., Стефанов С. М. Новые методы и подходы в полевых геокриологических исследованиях в рамках Дня науки и инноваций. *Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология*. 2016. № 1. С. 98–102. DOI: <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-1-98-102>
8. Минкин М. А. *Методика и методы инженерно-геокриологических изысканий*. Ухта : Ин-т управ. информ. и бизнесом, 2005. 252 с.
9. Моркляник Б. В., Проценко П. О. Вплив морозного здмання ґрунтів на фундаменти споруд за експлуатації теплових насосів. *Вісник ЛНАУ*. 2018. № 19. С. 74–78. DOI: <https://doi.org/10.31734/architecture2018.19.074>
10. Нерадовский Л. Г. К вопросу изучения мерзлых грунтов в условиях экранирующего влияния первичного поля высокочастотного магнитного диполя. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № 4. С. 139–148. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-4-0-139-148>
11. *Способ испытания оттаивающих грунтов и прессиометр для его осуществления* : пат. 1446236 СССР. № 4243684/31-33 ; заявл. 11.05.1987 ; опубл. 23.12.88, Бюл. № 47. 3 с.
12. *Способ испытания оттаивающих грунтов прессиометром* : пат. 1573088 СССР. № 4463705/23-33 ; заявл. 19.07.1988 ; опубл. 23.06.90, Бюл. № 23. 3 с.
13. Тарасов Б. Л., Лушников В. В., Павлов В. В. *Отчёт о научно-исследовательской работе по теме № 02487 «Исследование и внедрение рационального устройства оснований и фундаментов в слабых водонасыщенных грунтах»*. Свердловск, 1976. Ч. 1–2. 210 с.
14. Ульянов В. Ю. Возможная конструкция прессиометра для испытаний мёрзлых песчано-глинистых грунтов. *Наука як рушійна антикризова сила* : зб. стат. за матеріалами VII міжнародної науково-практичної конференції. 2020. С. 5–10.
15. Юшков Б. С., Третьякова О. В. Влияние анизотропии глинистых грунтовых массивов на напряженно-деформированное состояние транспортных тоннелей. *Транспортные сооружения*. 2014. Т. 1, № 3. С. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.15862/01ts314>

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

16. Li G., Yu Q., Ma W., Mu Y., Li X., Chen Z. Laboratory testing on heat transfer of frozen soil blocks used as backfills of pile foundation in permafrost along Qinghai-Tibet electrical trans-mission line. *Arabian Journal of Geosciences*. 2014. Vol. 8. P. 2527–2535. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1432-9>
17. Schwarz H., Bertermann D. Mediate relation between electrical and thermal conductivity of soil. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* 2020. Vol. 6. Iss. 50. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40948-020-00173-x>
18. Still B., Yang Z., Ge X. *Sampling, Machining and Testing of Naturally Frozen Soils*. Mechanical Properties of Frozen Soil / ed. H. Zubeck and Z. Yang. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2013. P. 49–61. DOI: <https://doi.org/10.1520/STP156820130003>
19. Still B., Proskin S., Zubeck H., Yang Z. *Frozen-Soil Classification With Index Testing*. Mechanical Properties of Frozen Soil / ed. H. Zubeck and Z. Yang. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2013. P. 169–179. DOI: <https://DOI:org/10.1520/STP156820130017>
20. Zhengchao T., Tusheng R., Joshua L., Heitman R. Horton Estimating thermal conductivity of frozen soils from air-filled porosity. *Soil Science Society of America Journal*. 2020. Vol. 84. Iss. 5. P. 1650–1657. DOI: <https://DOI:org/10.1002/saj2.20102>

V. Y. ULYANOV^{1*}

^{1*}Dep. «Engineering Geology and Geotechnics», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 33 43, e-mail egig@pgasa.dp.ua,
ORCID 0000-0002-9028-3408

Ways to Increase the Efficiency of Thermopressiometry

Purpose. The purpose of the work is to identify the ways to increase the efficiency of engineering research, based on the significant amount of exploration work required in the creation of modern man-made objects, taking into account the shortcomings of existing instruments and equipment used to measure soil stress, and in relation to the need to improve the design of thermopressimeters, which are aimed to facilitate the study of frozen soils. **Methodology.** The ways to improve the blade thermopressimeter for the study of frozen soils with different aggregates were selected by the comparative-analytical method and the method of analogy. Thawing depth, absolute soil sediment, deformation modulus etc. were determined by thermal-technical calculations. **Findings.** The application issues of concern of the existing thermopressimeters (limited research of soils of a certain type, complexity and insufficient accuracy of readings) identified can be overcome by the proposed improved design of a blade thermopressimeter for testing frozen sandy-clay soils. It is based on the improved heating circuit, the application of quality materials and changing the form of the blades and body. The device is intended for use on permafrost and natural frozen soils of the world, including Ukraine. **Originality.** For the first time we offered a model of an advanced thermopressimeter with an improved body shape made of high-quality corrosion-resistant materials, including non-metallic ones. It has the reduced number of blades to one retractable sector blade-stamp (square or round) and one heating blade-stamp. A special probe design with mechanical/hydraulic sensor drive with a thermocouple (or with two fork probes to improve the measurements) was proposed. It was also recommended to introduce an electric conductive system designed for thawed soils, with a rod for measuring the retractable blade-stamp. The possibility of using a thermopressimeter during the study of seasonally frozen soils is established. **Practical value.** Improving the device model should facilitate its application in engineering and geological research for various types of construction, including transport, hydraulic engineering, which use the methods of deep freezing of weak and unstable soils.

Keywords: blades-stamps; thermopressimeter; deformation properties; thawing bowl; hot stamping method

REFERENCES

1. Aleinikov, A. S., & Petrova, A. G. (2017). Numerical Analysis of Frozen Soil Thawing under the Influence of Rainwater Infiltration. *Izvestiya of Altai State University*, 4(96), 72–77. DOI: [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2017\)4–12](https://doi.org/10.14258/izvasu(2017)4–12) (in Russian)
2. Amaryan, L. C. (1986). *Lopastnaya pressiometriya i ee primenimost v inzhenernoy geologii. Tekhnologiya i tekhnika polevykh ispytaniy gruntov: sbornik nauchnykh trudov PNIIS*, 14–20. (in Russian)
3. Amaryan, L. S., Vasilev, A. B., & Tsinskiy, B. V. (1981). *Rukovodstvo po ispytaniyu gruntov lopasnymi pressiometrami i pressiometrami-sdvigomerami*. PNIIS. (in Russian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

4. *Soils. Field methods for determining the strength and strain characteristics*, 10-13 GOST 20276-2012. (2013). (in Russian)
5. Yefimov, V. M., Kravtsova, O. N., Stepanov, A. V., Timofeev, A. V., Vasilchuk, Yu. K., & Tappyrova, N. I. (2017). Issledovanie vliyaniya poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na prochnost merzlykh gruntov kriolitozony Respubliki Sakha (Yakutiya). *Arctic and Antarctica*, 4, 80-85.
DOI: <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.4.25035> (in Russian)
6. Yefimov, V. M., Stepanov, A. V., Tappyrova, N. I., Kravtsova, O. N., & Stepanov, A. A. (2017). Vliyanie tsiklov promerzaniya – protaivaniya na teplo-massobmennye svoystva tekhnogennykh kriogennykh gruntov severo-vostochnykh rayonov kriolitozony. *Arctic and Antarctica*, 4, 73-79.
DOI: <https://doi.org/10.7256 / 2453-8922.2017.4.25027> (in Russian)
7. Isaev, V. S., Tyurin, A. I., Sergeev, D. O., Gorshkov, E. I., Volkov, N. G., & Stefanov, S. M. (2016). The day of science and innovation: new methods and ways of field geocryological researches. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*, 1, 98-102. DOI: <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-1-98-102> (in Russian)
8. Minkin, M. A. (2005). *Metodika i metody inzhenerno-geokriologicheskikh izyskaniy*. Ukhta: Institut upravleniya informatsiy i biznesom. (in Russian)
9. Morklianyk, B., & Protsenko, P. (2018). The effect of greenhousing of soils on the building foundations function in the use of heat pumps. *Visnik L'vivs'kogo Nacional'nogo Agrarnogo Universitetu. Arhitektura i Sil's'kogospodars'ke Budivnictvo*, 19, 74-78. DOI: <https://doi.org/10.31734/architecture2018.19.074> (in Ukrainian)
10. Neradovskiy, L. G. (2018). Investigation of frozen soil under screening effect of the primary field of the high-frequency vertical magnetic dipole. *Mining informational and analytical bulletin*, 4, 139-148.
DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-4-0-139-148> (in Russian)
11. Deryabin, G. N., Mareninov, I. A., Dubikov, G. I., Belov, V. S., & Moisey, O. N. (1988). *USSR Patent № 1446236 A method for testing thawing soils and a pressiometer for its implementation* (in Russian)
12. Deryabin, G. N., Martynov, A. I., Moses, O. N., Pozhidaeva, I. V., & Pronyaeva, Y. I. (1990). *USSR Patent № 1573088 Testing method of the thawing soil Pressimetra* (in Russian)
13. Tarasov, B. L., Lushnikov, V. V., & Pavlov, V. V. (1976). *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote po teme № 02487 «Issledovanie i vnedrenie ratsionalnogo ustroystva osnovaniy i fundamentov v slabykh vodonasyschennykh gruntakh»* (Vol. 1-2). Sverdlovsk. (in Russian)
14. Ulyanov, V. Yu. (2020). Possible pressiometer design for tests of frozen sandy-clayey soils. *Nauka yak rushijna antykrizova syla: zbirnyk statej za materialamy VII mizhnarodnoyi naukovy-praktychnoyi konferenciyi* (pp. 5-10). (in Russian)
15. Yushkov, B., & Tretyakova, O. (2014). Anisotropy effect of the clay soil masses on the stress-strain state of transport tunnels. *Russian Journal of Transport Engineering*, 1(3), 1-10.
DOI: <https://doi.org/10.15862/01ts314> (in Russian)
16. Li, G., Yu, Q., Ma, W., Mu, Y., Li, X., & Chen, Z. (2014). Laboratory testing on heat transfer of frozen soil blocks used as backfills of pile foundation in permafrost along Qinghai-Tibet electrical transmission line. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5), 2527-2535. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1432-9> (in English)
17. Schwarz, H., & Bertermann, D. (2020). Mediate relation between electrical and thermal conductivity of soil. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour*, 6(50), 1-16.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40948-020-00173-x> (in English)
18. Still, B., Yang, Z., & Ge X. (2013). *Sampling, Machining and Testing of Naturally Frozen Soils*. In *Mechanical Properties of Frozen Soil* (H. Zubeck, Z. Yang, Eds., pp. 49-61). West Conshohocken, PA: ASTM International. DOI: <https://DOI.org/10.1520/STP156820130003> (in English)
19. Still B., Proskin S., Zubeck H., & Yang Z. (2013). *Frozen-Soil Classification With Index Testing*. In *Mechanical Properties of Frozen Soil* (H. Zubeck, Z. Yang, Eds., pp. 169-179). West Conshohocken, PA: ASTM International. DOI: <https://DOI.org/10.1520/STP156820130017>
20. Zhengchao T., Tusheng R., Joshua L., & Heitman R. (2020). Horton Estimating thermal conductivity of frozen soils from air-filled porosity. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1650-1657.
DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20102>

Надійшла до редколегії: 09.11.2020

Прийнята до друку: 09.03.2021

УДК 625.81:624.131

В. Г. ШАПОВАЛ^{1*}, Г. П. ІВАНОВА^{2*}, Р. М. ТЕРЕЩУК^{3*}, О. В. НЕСТЕРОВА^{4*}

^{1*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (095) 471 81 92, ел. пошта shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311

^{2*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 45 29 945, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

^{3*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38-(095) 751 25 26, ел. пошта Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

^{4*}Каф. «Водопостачання, водовідведення та гідраліка», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 756 34 74, ел. пошта nesterova.olena@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-1035-6572

Осідання дорожнього полотна на складених зі слабких ґрунтів основах

Мета. Основною метою цієї роботи є побудова точних аналітичних залежностей осідання основи дорожнього полотна від його координат і прикладеного до верхньої межі основи трапецієподібного зовнішнього навантаження. Це дозволить розрахувати профіль осідання основи в межах і за межами насипу з використанням методу поширеного підсумовування. **Методика.** Для досягнення мети використано теоретичні дослідження геомеханічних процесів із використанням аналітичних і чисельних математичних методів. Аналіз і узагальнення результатів теоретичних досліджень. **Результати.** У рамках моделі основи у вигляді лінійно-пружного ізотропного середовища й розрахункової схеми плоскої деформації отримано аналітичні залежності вертикальних і горизонтальних нормальних деформацій від координат півплощини, до верхньої межі якої прикладене навантаження у вигляді трапеції. На цій базі розроблено алгоритм побудови профілю осідання дорожнього полотна, складеного з ґрунтових матеріалів. **Наукова новизна.** Отримано аналітичні залежності вертикальних нормальних деформацій в основі дорожнього полотна з трапецієподібним профілем від його координат. **Практична значимість.** Викладені в цій роботі результати досліджень дозволяють побудувати проєктний профіль дорожнього полотна з ґрунтових матеріалів з урахуванням сильної стискальної деформації ґрунту. Крім того, отримані результати можуть бути використані для визначення нижньої межі товщі основ, що стискаються, до верхньої межі яких прикладене розподілене навантаження трикутної або трапецієподібної форми.

Ключові слова: дорожнє полотно з ґрунтового матеріалу; плоска задача теорії пружності; нормальні вертикальні напруження в основі; розподілене навантаження трикутної і трапецієподібної форми; стан плоскої деформації

Вступ

Сьогодні під час проєктування дорожнього полотна на основах, що складені зі слабких ґрунтів, виникають такі проблеми:

1. Іноді осідання дорожнього полотна мають один порядок із його висотою [1, 8, 13]. У цьому випадку треба знати осідання основи полотна не тільки в його центрі, а й осідання характерних точок за всією площею підосви. Це важливо для досягнення відповідності профілю полотна його проєктному положенню з урахуванням деформацій земної поверхні.

2. Профіль дорожнього полотна зазвичай має трапецієподібну форму [3, 6, 7]. У такому

випадку навантаження на основу відрізняється від прямокутного.

Також у роботі [2] коефіцієнт згасання додаткових напружень за глибиною (з його використанням розраховують вертикальні нормальні напруження за глибиною й осідання основи) наведений у табличній формі лише для навантаження, що має форму прямокутника (в аналітичній формі в нормативних документах ці дані також не представлені).

3. У чинних сьогодні на території України й ряду інших країн будівельних нормах щодо врахування зазначених факторів наявні досить загальні та приблизні вказівки [1–3, 6–8].

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Аналогічно спостерігаємо і в присвяченій цій проблемі науковій і технічній літературі [10, 12].

Зазначене дозволяє зробити висновок, що використання чинних на території України норм призводить до недостатньо точного врахування прикладеного до ґрунтової основи навантаження від ваги дорожнього полотна.

4. Останнім часом широкого використання для прогнозування напружено-деформованого стану ґрунтових основ набув метод скінченних елементів [5, 11]. Однак у цьому випадку на результати розрахунку істотно впливають розміри розрахункової області основи.

Оскільки в нормативних документах України відсутні будь-які вказівки щодо визначення розмірів розрахункової області, отримані в ході прогнозування напружено-деформованого стану основ дорожнього полотна дані потребують перевірки і, у разі потреби, коригування.

У наш час для визначення осідань основи дорожнього полотна використовують наближені формули, у яких не враховано вплив на це осідання горизонтальних нормальних напружень та геометрії поперечного профілю полотна.

Мета

У цій статті поставлено за мету знайти вирішення зазначених проблем шляхом побудови точних аналітичних залежностей осідань основи дорожнього полотна від координат і прикладеного до верхньої межі основи трапецієподібного зовнішнього навантаження.

Це дозволить розрахувати профіль осідань основи в межах і за межами насипу з використанням методу поширеного підсумовування.

Методика

За вихідні дані дослідження взято такі:

1. Розглядаємо найнесприятливіший випадок напружено-деформованого стану основи – дорожню з ґрунтового матеріалу, довжина якої значно більша за її ширину й висоту (рис. 1).

2. Поперечний профіль насипу має вигляд трапеції.

3. Тиск від ваги насипу на основу дорівнює добутку питомої ваги її матеріалу на висоту – відстань від підшви насипу до денної поверхні насипу по вертикалі.

Для вирішення поставлених завдань необхідно:

1. У рамках моделі лінійного пружного ізотропного середовища, за умови плоскої деформації та навантаження (рис. 1), отримати точні аналітичні рішення, необхідні для визначення осідань основи ґрунтових насипів.

2. Розробити алгоритм, що дозволяє враховувати під час визначення осідань ґрунтових насипів неоднорідність будови ґрунтової товщі.

3. Розробити алгоритм, що дозволяє одночасно враховувати викладені в п. 1 і 2 чинники.

Результати

На першому етапі задача дослідження була сформульована так. До основи прикладене трапецієподібне вертикальне навантаження. У довільній точці основи потрібно визначити напруження, що обумовлені цим навантаженням.

Для розв'язання задачі була застосована схема профілю насипу (рис. 1), з використанням якої трикутна епюра контактних тисків може бути перетворена в трапецієподібне навантаження.

Подано параметри контуру насипу таким чином:

1. Координата будь-якої точки трикутника mnk може бути розрахована з використанням формули:

$$Z_{mnk}(x) = H \cdot \left\{ \left(1 + \frac{x}{a} \right) \left[\begin{matrix} U(x+a) - \\ -U(x) \end{matrix} \right] + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{x}{d} \right) \left[\begin{matrix} U(x) - \\ -U(x-d) \end{matrix} \right] \right\}, \quad (1)$$

де H , a і d – див. схему на рис. 1, $U(x)$ – ступінчаста функція Хевісайда [4].

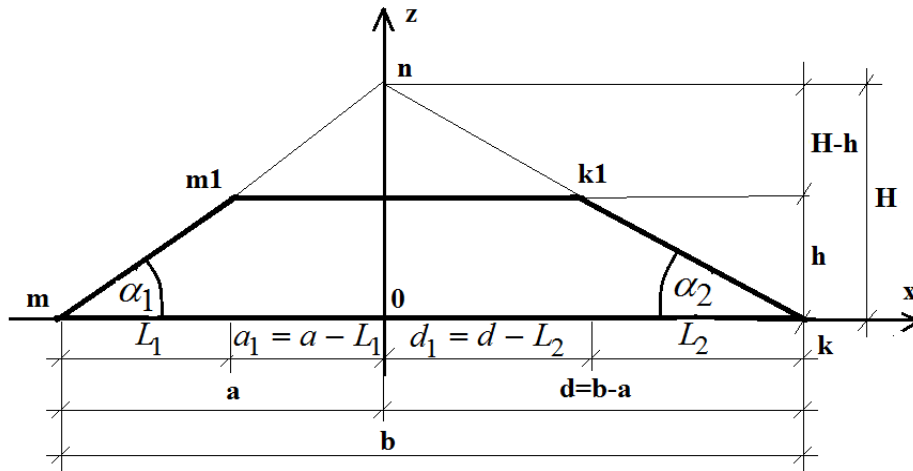


Рис. 1. Визначення геометричних розмірів ґрунтового насипу та навантаження на основу, яке залежить від його ваги, де:

h – висота насипу, b – ширина основи насипу; b_1 – ширина гребеня насипу;

α_1 та α_2 – кути закладення лівого та правого укосів насипу відповідно

Примітки: жирними лініями позначений контур насипу, а тонкими – допоміжні лінії

Fig. 1. Determination of the geometric dimensions of the soil embankment and the load on the base, which depends on its weight, where:

h – height of the embankment, b – width of the embankment base; b_1 – width of the embankment crest;

α_1 and α_2 – left and right slope angles of the embankment, respectively

Notes: bold lines indicate the contour of the embankment, and thin – auxiliary lines

2. Координата будь-якої точки трикутника m_1nk_1 на інтервалі висот $z \in (0, H - h)$ може бути розрахована з використанням формули:

$$Z_{m_1nk_1}(x) = (H - h) \cdot \left\{ \left(1 + \frac{x}{a_1} \right) \left[\begin{matrix} U(x + a_1) - \\ -U(x) \end{matrix} \right] + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{x}{d_1} \right) \left[\begin{matrix} U(x) - \\ -U(x - d_1) \end{matrix} \right] \right\}, \quad (2)$$

де H , h , a_1 і d_1 – див. схему на рис. 1.

3. Використавши схему на рис. 1 та формули (1) і (2), знайдемо координату будь-якої точки трапеції mm_1k_1k . Отримаємо:

$$Z_{mm_1k_1k}(x) = Z_{mnk}(x) - Z_{m_1nk_1}(x) =$$

$$= H \cdot \left\{ \left(1 + \frac{x}{a} \right) \left[U(x + a) - U(x) \right] + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{x}{d} \right) \left[U(x) - U(x - d) \right] \right\} - \\ - (H - h) \cdot \left\{ \left(1 + \frac{x}{a_1} \right) \left[\begin{matrix} U(x + a_1) - \\ -U(x) \end{matrix} \right] + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{x}{d_1} \right) \left[\begin{matrix} U(x) - \\ -U(x - d_1) \end{matrix} \right] \right\}. \quad (3)$$

4. Для того, щоб визначити навантаження на основу від одного метра довжини ґрунтового насипу, множимо координату, отриману з формули (3), на питому вагу матеріалу насипу $\gamma_{пл}$ й 1 метр, тоді:

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

$$\begin{aligned}
 q(x) &= \gamma_{\text{пл}} \cdot [Z_{mnk}(x) - Z_{m_1nk_1}(x)] = \\
 &= \gamma_{\text{пл}} \cdot H \cdot \left\{ \left(1 + \frac{x}{a}\right) [U(x+a) - U(x)] + \right. \\
 &\quad \left. + \left(1 - \frac{x}{d}\right) [U(x) - U(x-d)] \right\} - \\
 &- \gamma_{\text{пл}} \cdot (H-h) \cdot \left\{ \left(1 + \frac{x}{a_1}\right) \left[\begin{matrix} U(x+a_1) - \\ -U(x) \end{matrix} \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \left(1 - \frac{x}{d_1}\right) \left[\begin{matrix} U(x) - \\ -U(x-d_1) \end{matrix} \right] \right\}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Для визначення залежності напружень, що діють в основі насипу від координат, використовуємо відоме фундаментальне рішення Фламана про вертикальну зосереджену силу, прикладену до горизонтальної верхньої границі півплощини, і принцип суперпозиції. Згідно з [9] маємо:

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_z(x, z) &= \frac{2 \cdot z^3}{\pi} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \frac{q(\xi) \cdot d\xi}{r(x, z, \xi)^4}; \\
 \sigma_x(x, z) &= \frac{2 \cdot z}{\pi} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \frac{q(\xi) \cdot (x - \xi)^2 \cdot d\xi}{r(x, z, \xi)^4}; \\
 \tau_{xz}(x, z) &= \frac{2 \cdot z^2}{\pi} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \frac{q(\xi) \cdot (x - \xi) \cdot d\xi}{r(x, z, \xi)^4}; \\
 r &= \sqrt{(x - \xi)^2 + z^2}
 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де $\sigma_x(x, z)$ і $\sigma_z(x, z)$ – нормальні напруження, що діють в напрямку осей Ox і Oz відповідно; $\tau_{xz}(x, z)$ – дотичне напруження в площині Oxz ; $q(x)$ – прикладене до денної поверхні основи навантаження.

Знайдемо розподіл вертикальних нормальних напружень $\sigma_{z,mnk}(x, z)$ в точці основи з координатами (x, y) від представленого на рис. 1 навантаження, розподіленого по трикутнику mnk .

Для цього у формулі (1) замінимо змінну x на змінну ξ , підставимо отриманий вираз у формулу (5), виконаємо процедуру інтегру-

вання на інтервалі від $x_1 = -a$ до $x_2 = d$, помножимо отриманий таким чином вираз на γ , й отримаємо:

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{z,mnk}(x, z) &= \gamma \cdot H \cdot \left\{ \begin{aligned} &\eta_1 \cdot \arctg(\chi_1) + \\ &+ \eta_2 \cdot \arctg(\chi_2) - \\ &- \eta_3 \cdot x \cdot \arctg(\chi_0) \end{aligned} \right\}; \\
 \eta_1 &= (-x + d)/(\pi \cdot d); \\
 \eta_2 &= (x + a)/(\pi \cdot a); \\
 \eta_3 &= (d + a)/(\pi \cdot a \cdot d); \\
 \chi_0 &= x/z; \\
 \chi_1 &= (-x + d)/z; \\
 \chi_2 &= (x + a)/z; \\
 d &= b - a
 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Далі знайдемо розподіл вертикальних нормальних напружень $\sigma_{z,m_1nk_1}(x, z)$ в точці основи з координатами (x, y) від представленого на рис. 1 навантаження, розподіленого по трикутнику m_1nk_1 .

Для цього у формулі (2) замінимо змінну x на змінну ξ , підставимо отриманий вираз у формулу (5), виконаємо процедуру інтегрування на інтервалі від $x_1 = -a_1$ до $x_2 = d_1$, помножимо отриманий таким чином вираз на γ , й отримаємо:

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{z,m_1nk_1} &= \gamma \cdot (H - h) \cdot \left\{ \begin{aligned} &\eta_4 \cdot \arctg(\chi_3) + \\ &+ \eta_5 \cdot \arctg(\chi_4) - \\ &- \eta_6 \cdot x \cdot \arctg(\chi_0) \end{aligned} \right\}; \\
 \eta_4 &= (-x + d_1)/(\pi \cdot d_1); \\
 \eta_5 &= (x + a_1)/(\pi \cdot a_1); \\
 \eta_6 &= (d_1 + a_1)/(\pi \cdot a_1 \cdot d_1); \\
 \chi_3 &= (-x + d_1)/z; \\
 \chi_4 &= (x + a_1)/z; d = b - a
 \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Залежність вертикального нормального напруження $\sigma_z(x, z)$ від координат знайдемо як різницю напружень $\sigma_{z,mnk}(x, z)$ і $\sigma_{z,m_1nk_1}(x, z)$. Маємо:

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

$$\sigma_z(x, z) = \sigma_{z, mnk}(x, z) - \sigma_{z, m_1 n k_1}(x, z) =$$

$$= \gamma \cdot H \cdot \left[\begin{array}{l} \eta_1 \cdot \arctg(\chi_1) + \\ + \eta_2 \cdot \arctg(\chi_2) - \\ - \eta_3 \cdot x \cdot \arctg(\chi_0) \end{array} \right] -$$

$$- \gamma \cdot (H - h) \left[\begin{array}{l} \eta_4 \cdot \arctg(\chi_3) + \\ + \eta_5 \cdot \arctg(\chi_4) - \\ - \eta_6 \cdot x \cdot \arctg(\chi_0) \end{array} \right], \quad (8)$$

де $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \chi_0, \chi_1, \chi_2, \chi_3$ і χ_4 – див. формули (5) і (6).

Аналогічним способом знайдемо горизонтальне нормальне напруження $\sigma_x(x, z)$. Отримаємо:

$$\sigma_x(x, z) =$$

$$= \gamma \cdot H \cdot \left[\begin{array}{l} -\eta_7 \cdot \ln(\chi_5) - \\ -\eta_8 \cdot \ln(\chi_6) + \\ + \eta_3 \cdot z \cdot \ln(\chi_7) + \\ + \eta_1 \cdot x \cdot \arctg(\chi_1) + \\ + \eta_2 \cdot \arctg(\chi_2) - \\ - \eta_3 \cdot x \cdot \arctg(\chi_0) \end{array} \right] -$$

$$- \gamma \cdot (H - h) \left[\begin{array}{l} -\eta_9 \cdot \ln(\chi_8) - \\ -\eta_{10} \cdot \ln(\chi_9) + \\ + \eta_6 \cdot z \cdot \ln(\chi_7) + \\ + \eta_4 \cdot x \cdot \arctg(\chi_3) + \\ + \eta_5 \cdot \arctg(\chi_4) - \\ - \eta_6 \cdot x \cdot \arctg(\chi_0) \end{array} \right]; \quad (9)$$

$$\eta_5 = (x + a_1) / (\pi \cdot a_1);$$

$$\eta_6 = (d_1 + a_1) / (\pi \cdot a_1 \cdot d_1);$$

$$\eta_7 = z / (\pi \cdot d); \eta_8 = z / (\pi \cdot a);$$

$$\eta_9 = z / (\pi \cdot d); \eta_{10} = z / (\pi \cdot a);$$

$$\chi_5 = z^2 + (-x + d)^2; \chi_6 = z^2 + (x + a)^2;$$

$$\chi_7 = x^2 + z^2;$$

$$\chi_8 = z^2 + (-x + d_1)^2;$$

$$\chi_9 = z^2 + (x + a_1)^2;$$

$$d = b - a; d_1 = b_1 - a_1.$$

де $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \chi_0, \chi_1, \chi_2, \chi_3$ і χ_4 – див. формули (5) і (6).

Значення напружень $\sigma_z(x, z)$ і $\sigma_x(x, z)$ та використання методу пошарового підсумовування дозволяють визначити осідання основи на розрахунковій вертикалі $x = x^*$. Для цього необхідно:

1. Із використанням наведеної в роботі [2] методики знайти нижню межу товщі H , що стискається.

2. Після цього отримуємо:

$$S(x^*) = \sum_{i=1}^n \left[\varepsilon_z(x^*, z_i) + \varepsilon_z(x^*, z_{i+1}) \right] \times$$

$$\left. \begin{array}{l} \times (z_i + z_{i+1}) / 2; \\ \varepsilon_z(x^*, z_i) = \frac{1}{E_i} \cdot \left[\begin{array}{l} (1 - \nu_i)^2 \cdot \sigma_z(x^*, z_i) - \\ - \nu_i (1 + \nu_i) \cdot \sigma_x(x^*, z_i) \end{array} \right] \end{array} \right\},$$

де $S(x^*)$ – осідання основи на розрахунковій вертикалі; E_i і ν_i – модуль загальної деформації й коефіцієнт Пуассона на розрахунковій глибині; z_i і n – кількість елементарних шарів, на які розділена товща насипу, що стискається, на інтервалі глибин $z \in (0, H)$.

Наукова новизна та практична значимість

Отримано аналітичні залежності вертикальних нормальних деформацій в основі дорожнього полотна з трапецієподібним профілем від координат. Викладені в роботі результати досліджень дозволяють побудувати проектний профіль дорожнього полотна з ґрунтових матеріалів з урахуванням сильної стискальної деформації ґрунту. Крім того, ці результати можуть бути використані для визначення нижньої межі товщі основ, що стискаються, до верхньої межі яких прикладене розподілене навантаження трикутної або трапецієподібної форми.

Висновки

У дослідження такі результати:

1. У рамках моделі основи у вигляді лінійного пружного ізотропного середовища й розрахункової схеми плоскої деформації отримано аналітичні залежності вертикальних і горизон-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тальних нормальних деформацій від координат півплощини, до верхньої межі якої прикладене навантаження у вигляді трапеції.

2. Ці дані необхідні для розрахунку за другою групою граничних станів основ насипів із

грунтових матеріалів, насипів залізничних, автомобільних доріг та інших лінійних споруд із трапецеїдальним перерізом, які розташовані на основах, що складені зі слабких ґрунтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ахметова К. Ю., Сирияченко Л. В., Меньшикова Н. В., Краснов Е. С. Опыт проектирования и строительства земляного полотна на слабых грунтах в пермском крае. *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2017. № 2. С. 29–40.
2. ДБН В.2.1-10-2018. *Основи і фундаменти будівель та споруд*. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 36 с.
3. ДСТУ-Н Б В.2.3-32:2016. *Настанова з улаштування земляного полотна автомобільних доріг*. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 99 с.
4. Корн Г. *Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы*. Москва : Книга по Требованию, 2014. 832 с.
5. Ромашкина М. А., Титок В. П. *Программный комплекс ЛИРА-САПР®. Руководство пользователя. Обучающие примеры*. Электронное издание, 2018. 254 с.
6. РСН 09-85. *Расчет дорожных насыпей на болотных грунтах*. Минск, 1985.
URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293802/4293802419.htm> (дата звернення: 15.04.2021).
7. СП 45.13330.2017. *Земляные сооружения, основания и фундаменты*. Москва : Стандартинформ, 2019.
8. *Справочная энциклопедия дорожника. Проектирование автомобильных дорог* / под ред. Федотова Г. А. и Поспелова П. И. Москва, 2007. Т. V. 1466 с.
URL: <http://www.amac.md/Biblioteca/data/26/02/Vasiliev/Tom-5.pdf> (дата звернення: 15.04.2021).
9. Шаповал В. Г., Шаповал А. В., Моркляник Б. В., Андреев В. С. *Механика грунтов*. Днепропетровск : Пороги, 2010. 168 с.
10. Babets D. V., Kovrov O. S., Moldabayev S. K., Tereschuk R. M., Sosna D. O. Impact of water saturation effect on sedimentary rocks strength properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. № 4. P. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/076>
11. Calvarano L. S., Leonardi G., Palamara R. Finite Element Modelling of Unpaved Road Reinforced with Geosynthetics. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 188. P. 99–104.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.017>
12. Junhui Z., Junhui P., Ling Z., Jue L., Feng L. Rapid estimation of resilient modulus of subgrade soils using performance-related soil properties. *International Journal of Pavement Engineering*. 2021. Vol. 22. Iss. 6. P. 732–739. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1643022>
13. Maltseva T. V., Trefilina E. R., Saltanova, T. V. Deformed state of the bases buildings and structures from weak viscoelastic soils. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 95. Iss. 3. P. 119–130.
DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.95.11>

V. H. SHAPOVAL^{1*}, H. P. IVANOVA^{2*}, R. M. TERESHCHUK^{3*}, O. V. NESTEROVA^{4*}

^{1*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 471 81 92, e-mail shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311

^{2*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 452 99 45, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

^{3*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 751 2526, e-mail Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

^{4*}Dep. «Water Supply, Water Diversion and Hydraulics», Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38(097) 290 98 55, e-mail nesterova.olena@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-1035-6572

Roadbed Sedimentation on Folded Bases with Weak Soils

Purpose. The main purpose of the work is to construct accurate analytical dependences of the sedimentation of the roadbed base on its coordinates and the trapezoidal external load applied to the upper limit of the base. This will allow the foundation settlement profile to be calculated within and outside the embankment using the layer-by-layer stacking method. **Methodology.** Theoretical studies of geomechanical processes using analytical and numerical mathematical methods were applied to achieve the purpose, as well as analysis and generalization of the results of theoretical research. **Findings.** Analytical dependences of vertical and horizontal normal deformations on the half-plane coordinates to the upper limit of which the trapezoidal load is applied were obtained within the framework of the base model in the form of a linear elastic isotropic medium and the calculated scheme of planar deformation. On this basis, an algorithm for constructing a profile of a roadbed sedimentation made of soil materials has been developed. **Originality.** Analytical dependences of vertical normal deformations in the roadbed base with a trapezoidal profile on its coordinates are obtained. **Practical value.** The research materials presented in this work make it possible to construct the design profile of the roadbed of soil materials, taking into account the strong compressibility of the soil. In addition, the results obtained can be used to determine the lower limit of the compressible strata of the bases, to the upper limit of which a distributed load of either a triangular or a trapezoidal form is applied.

Keywords: roadbed of soil material; plane problem of elasticity theory; normal vertical stresses in the base; distributed load of triangular and trapezoidal form; planar deformation state

REFERENCES

1. Akhmetova, K. Yu., Siryachenko, L. V., Menshikova, N. V., & Krasnov, Ye. S. (2017). Experience of design and construction of the earth leave on weak primes in the perm region. *About this journal transport. Transport facilities. Ecology*, 2, 29-40. (in Russian)
2. *Osnovy i fundamenti budivelj ta sporud*, 36 DBN V.2.1-10-2018 (2016). (in Ukraine)
3. *Nastanova z ulashtuvannja zemljanogho polotna avtomobiljnykh dorog*, 99 DSTU-N B V.2.3-32:2016. (2016). (in Ukraine)
4. Korn, G. (2014). *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Opredeleniya, teoremy, formuly*. Moscow: Kniga po Trebovaniyu. (in Russian)
5. Romashkina, M. A., & Titok, V. P. *Programmnyy kompleks LIRA-SAPR®. Rukovodstvo polzovatelya. Obuchayushchie primery*. Elektronnoe izdanie. (in Russian)
6. *Raschet dorozhnykh nasypey na bolotnykh gruntakh*, RSN 09-85. (1985). Retrieved from <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293802/4293802419.htm> (in Russian)
7. *Zemlyanye sooruzheniya, osnovaniya i fundamenti*, SP 45.13330.2017. (2019). (in Russian)
8. Fedotov, G. A., & Pospelov, P. I. (Eds.). (2007). *Spravochnaya entsiklopediya dorozhnika*. In *Proektirovanie avtomobilnykh dorog* (Vol. V). Moscow. Retrieved from <http://www.amac.md/Biblioteka/data/26/02/Vasiliev/Tom-5.pdf> (in Russian)
9. Shapoval, V. G., Shapoval, A. V., Morklyanik, B. V., & Andreev, V. S. (2010). *Mekhanika gruntov*. Dnipropetrovsk: Porogi. (in Russian)
10. Babets, D. V., Kovrov, O. S., Moldabayev, S. K., Tereschuk, R. M., & Sosna, D. O. (2020). Impact of water saturation effect on sedimentary rocks strength properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 76-81. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/076> (in English)
11. Calvarano, L. S., Leonardi, G., & Palamara, R. (2017). Finite Element Modelling of Unpaved Road Reinforced with Geosynthetics. *Procedia Engineering*, 188, 99-104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.017> (in English)
12. Junhui, Z., Junhui, P., Ling, Z., Jue, L., & Feng, L. (2021). Rapid estimation of resilient modulus of subgrade soils using performance-related soil properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(6), 732-739. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1643022> (in English)
13. Maltseva, T. V., Trefilina, E. R., & Saltanova, T. V. (2020). Deformed state of the bases buildings and structures from weak viscoelastic soils. *Magazine of Civil Engineering*, 95(3), 119-130. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.95.11> (in English)

Надійшла до редколегії: 13.11.2020

Прийнята до друку: 12.03.2021

ЗМІСТ

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Є. В. НАГОРНИЙ, І. Є. ІВАНОВ

Структура корисності обслуговування населення
пасажирським транспортом..... 5

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В. О. ХАВРУК, О. О. ПАРХОМЕНКО

Критерії оцінки й вибору рухомого складу АТП 17

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

**М. О. КОСТІН, А. М. МУХА, О. Г. ШЕЙКІНА,
О. Я. КУРІЛЕНКО**

Визначення енергетичної та електричної ємностей
бортового суперконденсаторного накопичувача енергії
регенерації..... 29

Т. М. МІЩЕНКО

Методологія та моделі комбінованого моделювання
електромагнітних процесів у системах електричної
тяги 40

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

В. В. СКАЛОЗУБ, В. М. ГОРЯЧКІН, О. В. МУРАШОВ

Комплексні моделі впорядкування мультипослідовностей
із нечіткими параметрами..... 50

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**І. О. ВАКУЛЕНКО, Д. М. БОЛОТОВА,
С. В. ПРОЙДАК, Б. КУРТ, А. Е. ЕРДОГДУ,
Г. О. ЧАЙКОВСЬКА, Х. АСКЕРОВ**

Деформаційне зміцнення низьковуглецевої сталі в області
переривчастої течії 65

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

А. О. ІЧЕТОВКІН

Методика оцінки параметрів у механізмі вибору
організаційно-технологічних рішень..... 76

В. Ю. УЛЬЯНОВ

Шляхи підвищення ефективності термопресіометрії..... 84

**В. Г. ШАПОВАЛ, Г. П. ІВАНОВА,
Р. М. ТЕРЕЩУК, О. В. НЕСТЕРОВА**

Осідання дорожнього полотна на складених зі слабких
грунтів основах 92

CONTENTS

ECONOMICS AND MANAGEMENT

Y. V. NAHORNYI, I. Y. IVANOV

Structure of Passenger Transport Service Utility for
Population 5

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

V. O. KHAVRUK, O. O. PARKHOMENKO

Criteria for Selection and Evaluation of Rolling Stock of
Motor Transport Enterprises..... 17

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

**M. O. KOSTIN, A. M. MUKHA, O. H. SHEIKINA,
O. Y. KURYLENKO**

Determination of Energy and Electric Capacity of On-Board
Supercapacitor Regenerative Energy Storage..... 29

T. M. MISHCHENKO

Methodology and Models of Combined Modeling
of Electromagnetic Processes in Electric Traction
Systems 40

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

**V. V. SKALOZUB, V. M. HORIACHKIN,
O. V. MURACHOV**

Complex Models of Ordering Multi-Sequences with Fuzzy
Parameters 50

MATERIAL SCIENCE

**I. O. VAKULENKO, D. M. BOLOTOVA,
S. V. PROIDAK, B. KURT, A. E. ERDOGDU,
H. O. CHAIKOVSKA, K. ASGAROV**

Strain Hardening of Low-Carbon Steel in the Area of Jerky
Flow 65

TRANSPORT CONSTRUCTION

A. A. ICHETOVKIN

Methodology of Estimation of Parameters in the Mechanism
of Selecting Organizational and Technological Solutions 76

V. Y. ULYANOV

Ways to Increase the Efficiency of Thermopressiometry 84

**V. H. SHAPOVAL, H. P. IVANOVA,
R. M. TERESHCHUK, O. V. NESTEROVA**

Roadbed Sedimentation on Folded Bases with Weak
Soils..... 92

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 A4, 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 статтею 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:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

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

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 2 (92) 2021

(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. 11,86. Тираж 100 пр. Зам. №02/02

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна
Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: kolesnykova@diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60
Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 2 (92) 2021

(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 11,86. Circulation 100. Order no. 02/02

Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan
Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine
Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: kolesnykova@diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Printing

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

