

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.  
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

Збірник наукових праць  
За загальною редакцією М.І. Черновола  
Заснований у 1997 році

**В и п у с к 4(35)**

Кропивницький • 2021

---

ISSN 2664-262X

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Central Ukrainian National Technical University

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.  
TECHNICAL SCIENCES**

**Collected Works**  
Under the general editorship of M. Chernovol  
Founded in 1997

**Issue 4(35)**

Кропывнытскый • 2021

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, ІТ-технологій, роботизації, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.

Науковий вісник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень професорсько-викладацького складу, аспірантів, докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів, науково-дослідних інститутів НАНУ та промислових підприємств України.

Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ЗВО, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 26 квітня 2021 року № 9.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Черновол М.І.

Редакційна колегія: Аулін В.В., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Кузик О.В., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф. (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Белоцерковський М.А., д-р техн. наук, проф. (Білорусь); Боков В.М., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); Васильковський О.М., канд. техн. наук, проф.; Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Гриньків А.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Жорнік В.І., д-р техн. наук (Білорусь); Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Івашук В.В., д-р техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Немировський Я.Б., д-р техн. наук; Павленко І.І., д-р техн. наук, проф.; Панков А.О., д-р ф.-м. наук, доц.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф.; Смірнов С.А., канд. техн. наук; Солових Є.К., д-р техн. наук, проф.; Сторчак М.Г., д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,  
Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522) 390-472, +380 (522) 390-437, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://mapiea.kntu.kr.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Науковий вісник заснований у 1997 році.

Включений до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (доктора філософії) в галузі технічних наук (постанови Президії ВАК України від 9 червня 1999 року №1-05/7, від 14 жовтня 2009 року № 1-05/4; накази Міністерства освіти і науки України від 29 грудня 2014 року № 1528, від 07 листопада 2018 року № 1218, від 02 липня 2020 року № 886, від 24 вересня 2020 року № 1188).

Науковий вісник зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus*, *CrossRef*, *Open Ukrainian Citation Index*, *WorldCat*, *ResearchBib*, *Google Scholar*

Реєстраційне свідоцтво: серія KB № 23513-13353 ПР від 13.07.2018 р.

ISSN 2664-262X (p), 2707-9449 (o)

DOI: 10.32515/2664-262X

## КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.8/681.5

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).3-7](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).3-7)

**Р.М. Минайленко**, доц., канд. техн. наук, **Є.В. Мелешко**, доц., д-р техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна*  
e-mail: [aron70@ukr.net](mailto:aron70@ukr.net), [elismeleshko@gmail.com](mailto:elismeleshko@gmail.com)

## Проблеми розподілених обчислень та шляхи їх вирішення

В статті розглядаються проблеми розподілених обчислень та можливі шляхи їх вирішення. З початком розвитку обчислювальних мереж і появою Інтернету, з'явилась велика кількість віддалених сервісів які пропонують свої наявні обчислювальні ресурси. З одного боку, в результаті такої співпраці, можна вирішити проблему недостатності власних апаратних ресурсів, але, з другого боку, виникає ряд проблем, а саме: відсутність стандартів та алгоритмів розробки і моделювання як головних засобів побудови систем розподілених обчислень; відсутність універсальних і зручних інструментів розробки додатків; технічні проблеми та обмеження, які визначаються існуючими на даний час технічними рішеннями для побудови систем обробки даних з відносно високою продуктивністю; мала кількість і вузька направленість задач які б могли приносити прибуток. Означені проблеми потребують комплексного вирішення.

**розподілені обчислення, обчислювальні ресурси, алгоритми, моделювання**

**Постановка проблеми.** На теперішній час існує велика кількість часто використовуваних сервісів користувача пов'язаних з активними дослідженнями та розробками. Серед них можна виокремити найбільш важливі, які спонукають розвиток галузі розподілених обчислень. До таких відносять:

- паралельні обчислення;
- розподілені обчислення;
- бази даних і розподілені файлові системи;
- обчислювальні ферми або ферми майнінга.

Вказані вище сервіси забезпечують розвиток головних ознак розподілених обчислювальних систем. Такими ознаками є:

- організація обчислювального процесу;
- забезпечення обслуговування;
- можливість зберігання даних;
- відмовостійкість;
- забезпечення постійного доступу.

З початком розвитку обчислювальних мереж і появою Інтернету, з'явилась велика кількість віддалених сервісів які пропонують свої наявні обчислювальні ресурси. З одного боку, в результаті такої співпраці, можна вирішити проблему недостатності власних апаратних ресурсів, але, з другого боку, виникає ряд проблем, а саме:

- відсутність стандартів та алгоритмів розробки і моделювання як головних засобів побудови систем розподілених обчислень;
- відсутність універсальних і зручних інструментів розробки додатків;

– технічні проблеми та обмеження, які визначаються існуючими на даний час технічними рішеннями для побудови систем обробки даних з відносно високою продуктивністю;

– мала кількість і вузька направленість задач які б могли приносити прибуток і потребують комплексного вирішення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із способів вирішення складних обчислювальних задач з використанням певної кількості комп'ютерів об'єднаних в паралельну обчислювальну систему є застосування розподілених обчислень [1]. Прикладом такої системи є високопродуктивні кластерні пристрої, оснащені обчислювальними вузлами. Існує велика кількість задач, що потребують використання розподілених обчислень серед яких, в зв'язку з їх актуальністю, можна виокремити наступні:

– структурне та імітаційне моделювання об'єктів і проведення аналізу складних систем;

– числові розв'язки систем диференціальних рівнянь великої розмірності з багатьма змінними;

– керування складними технологічними процесами в режимі online в умовах невизначеності;

– обробка великих масивів інформації та інші [2].

В деяких галузях розподілені обчислення дозволили звичайним користувачам Інтернету досягнути потужностей які не можуть собі дозволити світові ІТ-компанії, що мають власні суперкомп'ютери [3].

На теперішній час існує декілька прикладних областей які використовують розподілені обчислення і пливають на їх розвиток:

– соціальні мережі;

– хмарні сервіси;

– пошукові системи;

– online-ігри [4];

– проекти “добровільних обчислень” [5,6].

**Постановка завдання.** Під час організації обчислень пов'язаних з обробкою даних, важливим питанням є раціональний розподіл даних з точки зору ефективного вирішення задачі. Звичайні користувачі цим не займаються, так як, частіше всього, вони використовують готові рішення для своїх задач.

Навіть при створенні нових розподілених систем професійними програмістами, специфіка прикладних областей повністю не враховується.

Тобто, створювані програмні продукти, не передбачають можливості адаптування до конкретних задач користувачів, хоча робота в цьому напрямку значно активізувалась [7,8].

Вирішення проблем універсальності застосування розподілених обчислень лежить у створенні методик розробки програмних продуктів і створенні узагальнених рішень які були б придатними для застосування в різних галузях досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** На теперішній час виділяють декілька напрямків вирішення проблеми універсальності розподілених обчислень:

– оптимізація архітектури та алгоритмів взаємодії з метою використання відкритого мереженого простору для обміну даними;

– створення і розвиток нових протоколів мережі обміну даними;

– налаштування швидкого доступу до даних в процесі обчислень;

– розробка нових універсальних методів моделювання і їх застосування в процесі розробки додатків для розподілених обчислень;

– створення універсальних програмно–апаратних засобів для побудови систем розподілених обчислень;

– узагальнення і інтеграція методів вирішення конкретних задач для створення передумов вирішення узагальненої задачі в межах розподілених обчислень.

– застосування модульної архітектури яка забезпечуватиме можливість гнучкості системи і її розвиток, що суттєво може спростити процес створення додатків і розширити коло користувачів.

Потрібно відмітити, що створення модульних систем потребує певних передумов, а саме:

– побудови гнучкої системи з масштабованою архітектурою;

– механізмів балансування навантаження, які б працювали автоматично;

– можливості використання прикладними програмістами та звичайними користувачами.

Засобами розробки додатків для розподілених обчислень є різноманітні бібліотеки (GLOBE [9]) та інтегровані середовища розробок такі як IDE, або спеціалізоване програмне забезпечення у вигляді платформ для обчислень (BIONIC [10]). В той же час відсутні універсальні інструменти яким була в властива простота та зручність з широким колом застосування розподілених обчислень. Більшість розробок починається з “чистого аркуша” і значна частина зусиль і ресурсів скеровується на реалізацію повної інфраструктури системи, замість того, щоб зосередитись на створенні конкретного алгоритму чи підсистеми. Тобто універсальність програмно–апаратних засобів побудови систем розподілених обчислень дозволить спростити і пришвидшити процес розробки додатків.

Однією із основних проблем розподілених обчислень є повільний розвиток високошвидкісного мереженого обладнання яке могло б конкурувати із внутрішніми з’єднаннями. Збільшення швидкості передачі даних з використанням застарілих технологій неможливе по ряду технологічних і фізичних причин [11]. Дослідження в галузі розробки нових протоколів передачі даних і їх оптимізація проводяться, але остаточного рішення поки не існує [12].

Процес розробки розподіленого програмного забезпечення потребує створення великої кількості елементів керування і взаємо зв’язків між ними. Тут можна виділити декілька основних проблем, а саме:

– спроможність забезпечення конфіденційності з’єднання і конфіденційності даних користувача;

– забезпечення захисту системи від несанкціонованого зовнішнього та внутрішнього впливу;

– підтримка цілісності та відмовостійкості системи.

Вирішення означених вище проблем потребує застосування різноманітних методів моделювання з визначеними стандартами та близьких до реальності, але таких методів на даний час не існує [13].

**Висновки.** В статті проведено огляд проблем розподілених обчислень та можливі шляхи їх вирішення. Показано, що такі фактори як: відсутність стандартів та алгоритмів розробки і моделювання як головних засобів побудови систем розподілених обчислень; відсутність універсальних і зручних інструментів розробки додатків; технічні проблеми та обмеження, які визначаються існуючими на даний час технічними рішеннями для побудови систем обробки даних з відносно високою продуктивністю; мала кількість і вузька направленість задач, значно впливають на розвиток технологій розподілених обчислень і потребують комплексного вирішення.

## Список літератури

1. Распределенные вычисления . Википедия – свободная энциклопедия: веб-сайт. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределенные\\_вычисления](https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределенные_вычисления) (дата звернення: 5.01.2021).
2. Распределенные и параллельные вычисления . Викиучебник: веб-сайт. URL: [https://ru.wikibooks.org/wiki/Распределенные\\_и\\_параллельные\\_вычисления](https://ru.wikibooks.org/wiki/Распределенные_и_параллельные_вычисления) (дата обращения: 5.01.2021).
3. Ализар А. Вычислительная мощь сети. Bitcoin 250 раз обошла все суперкомпьютеры мира вместе взятые. *Хакер*. 2013. URL: <https://xaker.ru/2013/11/29/61683> (дата звернення 3.09.2020).
4. Massively multiplayer online role-playing game . Википедия – свободная энциклопедия: веб-сайт. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Massively\\_multiplayer\\_online\\_role-playing\\_game](https://en.wikipedia.org/wiki/Massively_multiplayer_online_role-playing_game) (дата обращения: 15.09.2020).
5. Добровольные вычисления . Википедия – свободная энциклопедия: веб-сайт. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Добровольные\\_вычисления](https://ru.wikipedia.org/wiki/Добровольные_вычисления) (дата звернення: 15.06.2020).
6. Самые опасные распределенные вычисления . *Хакер*. 2008. URL: <https://xaker.ru/2008/01/14/41851/> (дата обращения: 15.09.2020).
7. Ильин П.Е. Организация территориально-распределенных вычислений с использованием декомпозиционных моделей . Научная электронная библиотека disserCat: веб-сайт. URL: <http://www.dissercat.com/content/organizatsiya-territorialno-raspredeleennykh-vychislenii-s-ispolzovaniem-dekompozitsionnykh-modelей> (дата обращения 11.09.2020).
8. Шамакина А.В. Обзор технологий распределенных вычислений. *Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика*. 2014. № 3. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnologiy-raspredeleennykh-vychisleniy> (дата обращения: 15.11.2020).
9. The Globe Project . URL: <http://www.cs.vu.nl/~philip/globe/> (дата звернення: 27.04.2020).
10. BOINC . Википедия – свободная энциклопедия: веб-сайт. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/BOINC> (дата обращения: 15.11.2020).
11. Лушакова А. Крах сети Интернет наступит через 8 лет – прогнозы специалистов по телекоммуникациям . *Новостной портал «The Jewish Times»*. URL: [http://jtimes.ru/news/nauka\\_i\\_tekhnika/14141-al-krah-internet](http://jtimes.ru/news/nauka_i_tekhnika/14141-al-krah-internet) (Last accessed: 11.09.2020).
12. Компьютер сгенерировал эффективные но непонятные человеку алгоритмы ускорения TCP . *Хабрахабр*. URL: <http://habrahabr.ru/post/187278/> (дата обращения 11.09.2020).
13. Распределенная система защиты облачных вычислений от сетевых атак /А.А. Талалаев, И.П. Тищенко, В.П. Фраленко, В.М. Хачумов. *Вестник СибГУТИ*. 2013. № 3. URL: [http://vestnik.sibstis.ru/uploads/1377745931\\_1452.pdf](http://vestnik.sibstis.ru/uploads/1377745931_1452.pdf) (дата обращения: 5.01.2021).

## References

1. Raspredeleennyye vychisleniya . Vikipedija – svobodnaja jenciklopedija: veb-sajt. [Distributed computing. Wikipedia - the free encyclopedia: website]. *ru.wikipedia.org*. Retrieved from [https://ru.wikipedia.org/wiki/Raspredeleennyye\\_vychisleniya](https://ru.wikipedia.org/wiki/Raspredeleennyye_vychisleniya) [in Russian].
2. Raspredeleennyye i parallel'nye vychisleniya. Vikiuchebnik. [Distributed and parallel computing. Wikibooks: website.]. *ru.wikibooks.org*. Retrieved from [https://ru.wikibooks.org/wiki/Raspredeleennyye\\_i\\_parallel'nye\\_vychisleniya](https://ru.wikibooks.org/wiki/Raspredeleennyye_i_parallel'nye_vychisleniya) [in Russian].
3. Alizar, A. (2013). Vychislitel'naja moshh' seti Bitcoin v 250 raz obognala vse superkomp'jutery mira vmeste vzjatye. Haker. [Computing power of the network. Bitcoin has surpassed all supercomputers in the world combined 250 times. Hacker.]. *xaker.ru*. Retrieved from <https://xaker.ru/2013/11/29/61683> [in Russian].
4. Massively multiplayer online role-playing game. Vikipedija – svobodnaja jenciklopedija [Massively multiplayer online role-playing game. Wikipedia is the free encyclopedia: website.]. *en.wikipedia.org*. Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Massively\\_multiplayer\\_online\\_role-playing\\_game](https://en.wikipedia.org/wiki/Massively_multiplayer_online_role-playing_game) [in Russian].
5. Dobrovol'nye vychisleniya. Vikipedija – svobodnaja jenciklopedija. [Voluntary computing. Wikipedia is the free encyclopedia: website]. *ru.wikipedia.org*. Retrieved from [https://ru.wikipedia.org/wiki/Dobrovol'nye\\_vychisleniya](https://ru.wikipedia.org/wiki/Dobrovol'nye_vychisleniya) [in Russian].
6. Samye opasnye raspredeleennyye vychisleniya. Haker [The most dangerous distributed computing. Hacker.]. (2008). *xaker.ru*. Retrieved from <https://xaker.ru/2008/01/14/41851/> [in Russian].
7. Il'in, P.E. Organizacija territorial'no-raspredeleennykh vychislenij s ispol'zovaniem dekompozitsionnyhmodelej [Organization of geographically distributed computing using decomposition models. Scientific electronic library disserCat: website.]. *www.dissercat.com*. Retrieved from

- <http://www.disserscat.com/content/organizatsiya-territorialno-raspredeleennykh-vychislenii-s-ispolzovaniem-dekompozitsionnykh-model> [in Russian].
8. Shamakina, A.V. (2014). Obzor tehnologij raspredeleennyh vychislenij [Overview of distributed computing technologies]. *Vestnik JuUrGU. Serija: Vychislitel'naja matematika i informatika – Bulletin of SUSU. Series: Computational Mathematics and Informatics.* 3. Retrieved from <http://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnologiy-raspredeleennyh-vychislenij> [in Russian].
  9. The Globe Project . *www.cs.vu.nl* . Retrieved from <http://www.cs.vu.nl/~philip/globe/> [in English].
  10. BOINC .Vikipedija svobodnaja jenciklopedija [BOINC. Wikipedia - the free encyclopedia: website]. *ru.wikipedia.org*. Retrieved from <https://ru.wikipedia.org/wiki/BOINC> [in Russian].
  11. Lushakova, A. Krah seti Internet nastupit cherez 8 let – prognozy specialistov po telekommunikacijam: [The collapse of the Internet will come in 8 years - forecasts of experts in telecommunications]. Novostnoj portal «The Jewish Times». *jtimes.ru*. Retrieved from <http://jtimes.ru/news/nauka-i-tehnika/14141-al-krah-internet> [in Russian].
  12. Komp'juter sgeneriroval jeffektivnye, no neponjatnye cheloveku algoritmy uskorenija TCP [The computer has generated efficient but human-incomprehensible TCP acceleration algorithms]. *Habrahabr. habrahabr.ru*. Retrieved from <http://habrahabr.ru/post/187278/> [in Russian].
  13. TalalaeV, A.A., Tishhenko, I.P., Fralenko, V.P. & Hachumov V.M. (2013). RaspredeJonnaja sistema zashhity oblachnyh vychislenij ot setevyh atak [Distributed security system for cloud protection from network attacks]. *Vestnik SibGUTI – Vestnik SibGUTI.* 3. Retrieved from [http://vestnik.sibsutis.ru/uploads/1377745931\\_1452.pdf](http://vestnik.sibsutis.ru/uploads/1377745931_1452.pdf) [in Russian].

**Roman Minailenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Elisaveta Meleshko**, Assoc. Prof., DSc.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Problems of Distributed Computing and Ways to Solve Them**

The article considers the problems of distributed computing and possible ways to solve them. With the beginning of the development of computer networks and the advent of the Internet, a large number of remote services have appeared that offer their available computing resources. On the one hand, as a result of such cooperation, it is possible to solve the problem of insufficiency of own hardware resources, but, on the other hand, there are a number of problems, namely: lack of standards and algorithms of development and modeling as the main means of building distributed computing systems; lack of universal and convenient application development tools; technical problems and limitations, which are determined by the currently existing technical solutions for the construction of data processing systems with relatively high performance; small number and narrow focus of tasks that could generate income and require a comprehensive solution.

One of the main problems with distributed computing is the slow development of high-speed network equipment that could compete with internal connections. Increasing the data transfer rate using outdated technologies is impossible for a number of technological and physical reasons. Research in the field of development of new data transmission protocols and their optimization is carried out, but the final decision does not yet exist

When organizing calculations related to data processing, an important issue is the rational distribution of data in terms of effective problem solving. Ordinary users do not do this, because most often they use ready-made solutions for their tasks. Even when creating new distributed systems by professional programmers, the specifics of application areas are not fully taken into account. That is, the created software products do not provide the ability to adapt to specific tasks of users, although work in this direction has significantly intensified. The solution to the problems of universality of the application of distributed computing lies in the creation of methods for software development and the creation of generalized solutions that would be universal and suitable for use in various fields of research.

**distributed computing, computing resources, algorithms, modeling**

*Одержано (Received) 27.01.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.02.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

## КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.9

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).8-16](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).8-16)**В.В. Міхав**, асп., **Є.В. Мелешко**, доц., д-р техн. наук, **С.В. Шимко**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна  
e-mail: mihaw.wolodymyr@gmail.com, elismeleshko@gmail.com, shytko97@gmail.com*

## Методи та структури даних для реалізації бази даних рекомендаційної системи соціальної мережі

Метою даної роботи є дослідження та програмна реалізація методів і структур даних для побудови бази даних рекомендаційної системи, щоб порівняти ефективність їх використання за затратами часу та пам'яті. Наявність великої кількості різних методів реалізації баз даних викликає необхідність порівняльного аналізу та вибору оптимального методу і структури даних для зберігання інформації у рекомендаційних системах. Було проведено дослідження різних структур даних, які можна використати для створення бази даних рекомендаційної системи, зокрема, досліджені зв'язний список, розгорнутий зв'язний список, хеш-таблиця, В-дерево, В+-дерево та бінарна діаграма рішень. Також було проведено серію експериментів на програмній імітаційній моделі рекомендаційної системи з різною кількістю агентів, предметів та сесій. Відповідно до результатів проведених експериментів, розгорнутий список показав найкращі показники швидкодії та використання пам'яті. Структура В+-дерево показала результати, близькі до хеш-таблиці. Час доступу до окремого елемента в обох випадках сталий, але В+-дерево має певні переваги – елементи зберігаються відсортованими, а при зміні розміру немає необхідності розширювати область пам'яті. Найгірші результати показала структура даних бінарна діаграма рішень як за затратами часу, так і за затратами пам'яті. Профілювання показало, що 75% часу роботи тесту варіанту з розгорнутим списком зайняло генерування випадкових даних для програмного імітаційного моделювання агентів та предметів рекомендаційної системи, тож, саме сховище даних має високі показники ефективності. Профілювання варіанту із інвертованим списком показало, що доступ до випадкових блоків займає більше часу через неможливість закешувати їх, тож, за умов реального навантаження час вставки нових даних буде більшим, а відносна ефективність застосування інвертованого списку зростає. Для найбільш ефективного використання пам'яті розмір блоку зв'язного списку має бути адаптований таким чином, щоб блоки були максимально заповнені. Блоки малого розміру зменшують втрати пам'яті, але збільшують час обходу всіх елементів списку та збільшують накладні витрати пам'яті.

**рекомендаційні системи, бази даних, структури даних, програмна імітаційна модель**

**Постановка проблеми.** Рекомендаційні системи є важливою складовою соціальних мереж та значним чином впливають на те, яким користувачі сприймають інформаційний простір [1, 2]. Вибір методу представлення даних, якими оперує рекомендаційна система, має важливе значення, оскільки ефективний спосіб побудови бази даних для роботи такої системи може зменшити кількість потрібних ресурсів та збільшити кількість доступних алгоритмів для формування списків рекомендацій. Отже, вибір методів реалізації СУБД для зберігання даних рекомендаційної системи є важливою науково-практичною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наш час існує багато різних систем управління базами даних, крім реляційних баз даних широке застосування отримують бази даних типу NoSQL [3, 4]. СУБД типу NoSQL можуть бути реалізовані різними методами, зокрема, як Сховища типу «ключ-значення» (Key-value stores), Масштабовані розподілені сховища (Column Family (Bigtable) stores), графові СУБД (Graph Stores), документо-орієнтовані СУБД (Document Stores) тощо [3-5].



Спосіб зберігання даних рекомендаційної системи є важливим з точки зору якості її роботи, швидкості, можливостей масштабування, зручності виконання основних операцій з даними для формування рекомендацій.

Все частіше для зберігання даних рекомендаційних систем та інших додатків починають використовувати графові моделі [6-8], також графова форма представлення даних стає поширеною у програмному моделюванні складних систем та мереж [9-12], і це відбувається через ряд переваг графових моделей [8, 13]. Яскравим прикладом такого підходу являється побудова рекомендаційних систем з застосуванням графової СУБД Neo4j [14]. Графові моделі СУБД надають не лише зручний формат зберігання даних, а й зручний формат запитів. В документації до Neo4j є приклади реалізації алгоритмів формування рекомендацій запитом до цієї СУБД, що ілюструє її придатність для використання в рекомендаційних системах.

Наявність такої великої кількості різних методів реалізації баз даних та представлення інформації, що можна використати при побудові рекомендаційних систем, викликає необхідність порівняльного аналізу та вибору оптимального методу і структури даних для зберігання інформації рекомендаційних систем.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є дослідження та програмна реалізація методів і структур даних для реалізації бази даних рекомендаційної системи, щоб порівняти ефективність їх використання за затратами часу та пам'яті.

Для досягнення поставленої мети визначена програма дослідження, що складається з наступних завдань:

– Дослідження існуючих структур даних для зберігання інформації та методів їх реалізації.

– Програмна реалізація досліджених структур даних для створення бази даних рекомендаційної системи.

– Проведення серії експериментів для порівняння ефективності використання розглянутих структур даних за затратами часу та пам'яті.

*Об'єктом дослідження* є процес зберігання даних рекомендаційної системи.

*Предметом дослідження* є методи та структури даних для реалізації бази даних рекомендаційної системи.

*Методи дослідження* базуються на методах розробки програмного забезпечення, теорії побудови баз даних, теорії алгоритмів та теорії статистичної обробки даних.

**Виклад основного матеріалу.** В статті проведено дослідження різних структур даних, які можна використати для створення бази даних рекомендаційної системи [15-17]. Наведемо класифікацію структур даних, що були обрані для дослідження та підходять для рішення поставленого завдання.

**Зв'язний список (linked list)** – це структура даних, у якій кожен елемент має вказівник на наступний елемент. Основна перевага цієї структури полягає у сталому часі додавання нового елемента. Проте для кожного елемента потрібно виділяти новий блок пам'яті, через що менеджер пам'яті спричиняє значні затримки та накладні витрати пам'яті.

**Розгорнутий зв'язний список (unrolled list)** – це зв'язний список, кожен елемент якого містить масив логічних елементів. Це дозволяє об'єднати переваги масивів та зв'язних списків у випадку додавання елементів у кінець списку. Об'єднання блоків логічних елементів у список дозволяє додавати нові елементи без зміни розміру блоку пам'яті, економити пам'ять на вказівниках та ефективніше використовувати кеш процесора завдяки послідовному розташуванню елементів. При послідовному заповненні гарантується, що незаповненим лишиться не більше одного блоку

елементів.

**Хеш-таблиця (hash map)** – це структура даних, у якій пошук елемента здійснюється на основі його ключа. Хеш від ключа вказує, у якій комірці розташовується елемент. Якщо кілька елементів мають однаковий хеш, то виникає колізія. Існує два методи розв'язання колізій – закрита та відкрита адресації. При закритій адресації кожен елемент таблиці – це зв'язний список і усі елементи з однаковим хешем додаються до одного списку. Це найпростіший спосіб розв'язання колізій, але він використовує додаткову пам'ять для вказівників і не дозволяє використовувати переваги кешування при обході елементів хеш-таблиці. При відкритій адресації у випадку колізії обирається нова позиція елемента. Нова позиція може обиратися як за допомогою додаткової хеш-функції, так і шляхом зміщення позиції на декілька елементів. Пошук повторюється, доки не буде досягнуто порожнього елемента. Відкрита адресація використовує фіксований об'єм пам'яті і не потребує додаткових вказівників, але для ефективності операцій вставки і пошуку таблиця має бути заповнена не більш ніж на 50%, тож це спричиняє додаткові витрати пам'яті.

**В-дерево (b-tree)** – це структура даних представлена збалансованим, сильно розгалуженим деревом пошуку. Кожен вузол В-дерева, крім листків, є упорядкованим списком, у якому чергуються ключі і вказівники на потомків. Ключі вузла вказують інтервал, у якому знаходяться ключі потомку. **В+-дерево (B+-tree)** відрізняється тим, що воно зберігає усі значення у листових вузлах, а листові вузли мають посилання на сусіда, завдяки чому можна обійти усі значення без обходу всього дерева. Завдяки великій розгалуженості дерева підтримується мала висота дерева, що дозволяє переглядати невеликий об'єм даних за один прохід, а завдяки правилам побудови значення зберігаються у порядку зростання ключа.

**Бінарні діаграми рішень (BDD)** – це економна форма представлення булевих функцій у вигляді орієнтованого ациклічного графу. Вершини графу представляють аргументи функції, листки – її двійкові значення. Для додавання і вилучення ребер та зміни ваги ребер необхідно мати можливість редагувати дані графу. БДР дають можливість зберігати дані у стисненому вигляді та швидко отримувати значення функції за її параметрами, але редагування БДР вимагає складних обчислень. При представленні булевих функцій у формі БДР стало можливим розв'язувати багато проблем, які при традиційних представленнях структур нерозв'язні через значну розмірність таких представлень і складність операцій над ними. БДР можуть успішно застосовуватися фактично в кожній галузі, де потрібно обробляти дискретні структури даних.

Було проведено серію експериментів для порівняння ефективності використання розглянутих структур даних за затратами часу та пам'яті. Результати експериментів наведені у таблицях 1-2 та на рисунках 1-2.

Експерименти проводилися на комп'ютері з процесором AMD Ryzen 5 3600 та 32 Гб оперативної пам'яті. Для формування рекомендацій було використано колаборативну фільтрацію. З метою моделювання рекомендаційної системи розроблено програмну імітаційну модель, в якій було виділено три основні сутності – агент, сесія та предмет. На цій програмній моделі і проводилися експерименти.

Створена програмна імітаційна модель рекомендаційної системи для проведення експериментів працює за наступним принципом:

*Крок 1.* Ініціалізація рекомендаційної системи: задається кількість агентів, предметів та сесій, а також розмір сесії та максимальна кількість вподобань.

*Крок 2.* Для кожного агента випадковим чином генерується від 1 до  $n$  вподобань.

*Крок 3.* Створюється  $t$  сесій. До кожної сесії закріплюється випадковим чином обраний агент. Потім серед вподобань цього агента випадковим чином обирається від 1 до  $k$  вподобань, які копіюються до сесії.

*Крок 4.* Випадковим чином обирається контрольна сесія, для якої буде сформовано рекомендацію.

*Крок 5.* Визначаються усі предмети, які належать до контрольної сесії.

*Крок 6.* Здійснюється пошук усіх сесій, вподобання яких мають перетин із вподобаннями контрольної сесії. На цьому етапі є можливість відфільтрувати сесії за розміром перетину.

*Крок 7.* Визначаються предмети, які буде рекомендовано. Здійснюється пошук усіх предметів, які належать хоча б одній з відібраних сесій, але не належать до контрольної сесії. На цьому етапі є можливість відфільтрувати предмети за кількістю закріплених сесій.

Було проведено 4 серії експериментів. Нижче наведено параметри кожної серії.

*Параметри 1 серії експериментів:* кількість агентів 65536, кількість предметів 131072, кількість сесій 262144, розмір сесії 192, максимальна кількість вподобань 1536.

*Параметри 2 серії експериментів:* кількість агентів 131072, кількість предметів 262144, кількість сесій 524288, розмір сесії 256, максимальна кількість вподобань 2048.

*Параметри 3 серії експериментів:* кількість агентів 262144, кількість предметів 524288, кількість сесій 1048576, розмір сесії 256, максимальна кількість вподобань 2048.

*Параметри 4 серії експериментів:* кількість агентів 524288, кількість предметів 1048576, кількість сесій 2097152, розмір сесії 256, максимальна кількість вподобань 2048.

У таблиці 1 наведено результати серії експериментів, проведених для порівняння часу формування рекомендацій системою при використанні різних структур даних для реалізації бази даних.

Таблиця 1 – Результати серії експериментів для порівняння часу формування рекомендацій системою при використанні різних структур даних для реалізації бази даних

№ серії експ.	BDD, мс	Hash map, мс	Linked list, мс	B+ tree, мс	Unrolled list, мс	Unrolled list + inverted, мс
1	45766	316	23223	213	141	93
2	153045	2312	74346	720	412	277
3	313122	4248	146845	1357	808	563
4	643864	9153	-	2797	1602	855

**Примітка.** Прочерк у комірці таблиці показує, що не можливо було отримати результат через нестачу оперативної пам'яті.

*Джерело: розроблено автором*

На основі одержаних результатів з таблиці 1 було побудовано графік, наведений на рисунку 1. Як видно з таблиці та рисунку найкращі результати по часу формування рекомендацій показали наступні структури даних – звичайний розгорнутий список та інвертований розгорнутий список. Також непогані результати показала структура даних В+-дерево.

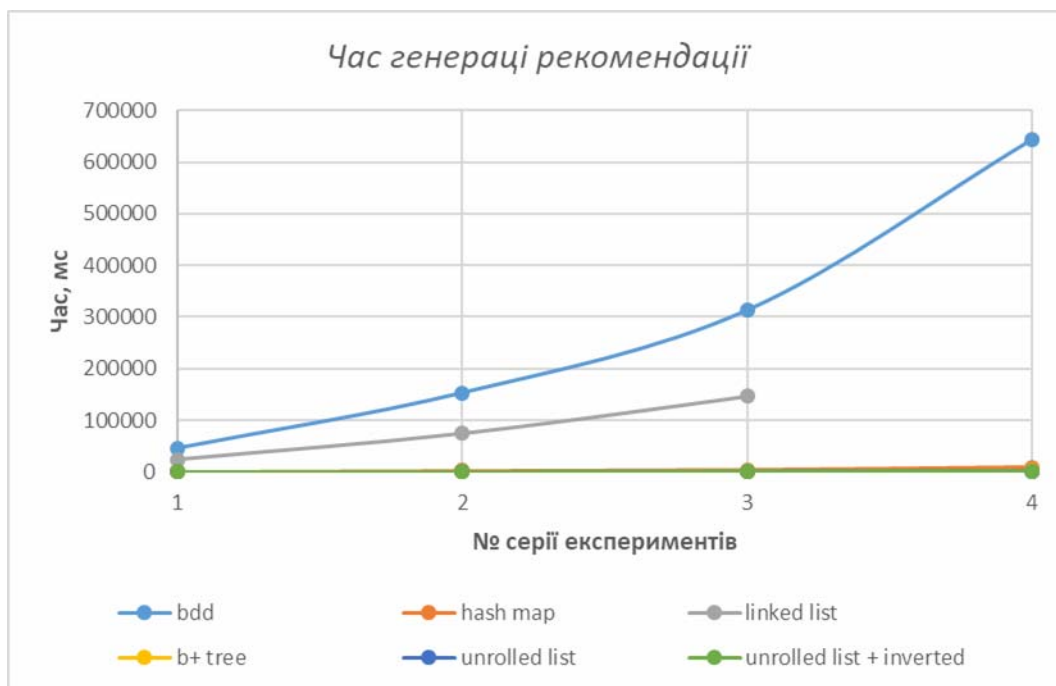


Рисунок 1 – Час генерації рекомендацій системою для кожної з розглянутих структур даних  
 Джерело: розроблено автором

У таблиці 2 наведено результати серії експериментів, проведених для порівняння кількості використаної пам'яті для формування рекомендацій системою при використанні різних структур даних для реалізації бази даних.

Таблиця 2 – Результати серії експериментів для порівняння кількості використаної пам'яті для формування рекомендацій системою при використанні різних структур даних для реалізації бази даних

№ серії експ.	BDD, Гб	Hash map, Гб	Linked list, Гб	B+ tree, Гб	Unrolled list, Гб	Unrolled list + inverted, Гб
1	1,3	2,2	4,5	2,1	0,578	0,767
2	3,6	6,4	12,1	5,6	1,2	1,9
3	7,2	12,8	24	11,2	2,4	3,9
4	14,4	25,5	-	22,3	4,8	7,8

**Примітка.** Прочерк у комірці таблиці показує, що не можливо було отримати результат через нестачу оперативної пам'яті.

Джерело: розроблено автором

На основі одержаних результатів з таблиці 2 було побудовано графік, наведений на рисунку 2. Як видно з таблиці та рисунку найкращі результати за використаною пам'яттю для формування рекомендацій аналогічно, як і з результатами за затратами часу, показали наступні структури даних – звичайний розгорнутий список, інвертований розгорнутий список та B+-дерево.

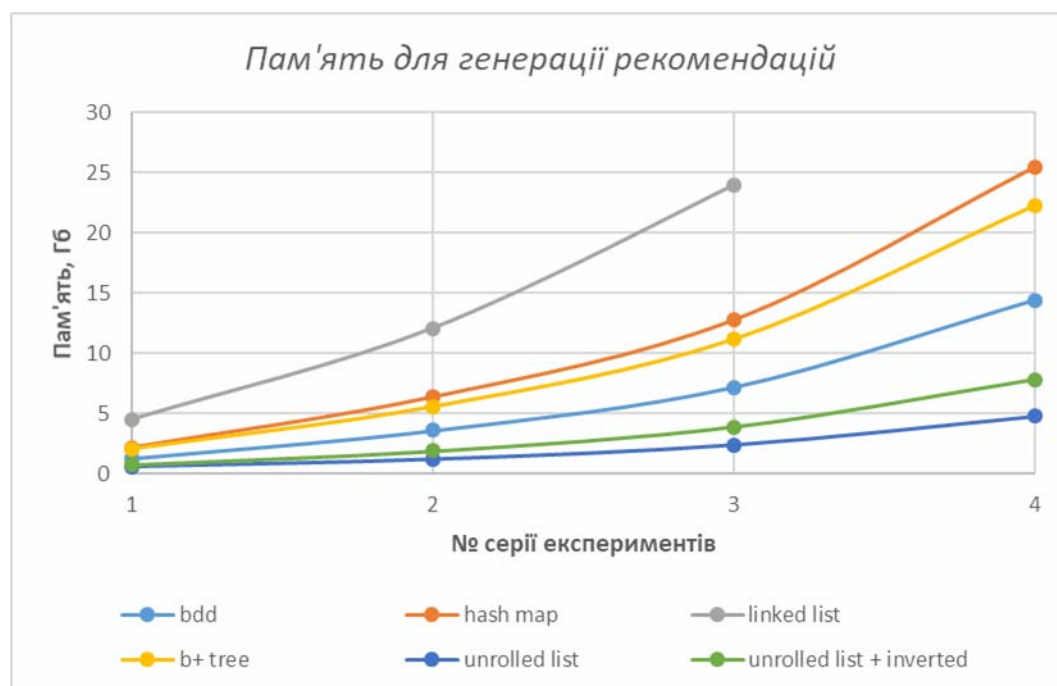


Рисунок 2 – Використана пам'ять для генерації рекомендацій системою для кожної з розглянутих структур даних

*Джерело: розроблено автором*

Профілювання тестового коду показало, що значна відмінність у часі генерації сесій у варіантів з та без інвертованого списку спричинена затримкою доступу до елементів інвертованого списку, оскільки доступ постійно здійснюється до різних елементів. З реальними даними рішення з розгорнутим списком працюватиме дещо повільніше, оскільки кешування буде менш ефективним.

Структура розгорнутого списку дуже проста, тож в подальшому це дасть можливість використовувати багатопотокову роботу без блокувань.

Структура B+ tree показала результати, близькі до хеш-таблиці. Час доступу до окремого елементу в обох випадках сталий, але B+ tree має певні переваги: елементи зберігаються відсортованими, а при зміні розміру немає необхідності розширювати область пам'яті.

Розмір блоку розгорнутого списку впливає на швидкість роботи і на об'єм використаної пам'яті. Зменшення розміру блоку дозволяє зменшити втрати пам'яті, але збільшує час доступу до елементів.

Для прискорення пошуку окремих елементів у розгорнутому списку після заповнення блоку можна відсортувати його елементи. Це дасть можливість використовувати бінарний пошук замість лінійного та перевіряти лише ті блоки, де шуканий елемент належить до інтервалу, утвореного найменшим та найбільшим елементами блоку.

Перевага розгорнутого списку над іншими розглянутими структурами даних у використанні пам'яті значною мірою за рахунок того, що зберігається лише факт вподобання, без параметрів. При використанні 4 байт на елемент для зберігання параметру витрати пам'яті наближаються до максимальних витрат бінарних діаграм рішень.

**Висновки.** Відповідно до результатів проведених експериментів, розгорнутий список показав найкращі показники швидкодії та використання пам'яті. Профілювання

показало, що 75% часу роботи тесту варіанту з розгорнутим списком зайняло генерування випадкових даних для програмного імітаційного моделювання агентів та предметів рекомендаційної системи, тож, саме сховище даних має високі показники ефективності. Профілювання варіанту із інвертованим списком показало, що доступ до випадкових блоків займає більше часу через неможливість закешувати їх, тож, за умов реального навантаження час вставки нових даних буде більшим, а відносна ефективність застосування інвертованого списку зростає. Для найбільш ефективного використання пам'яті розмір блоку зв'язного списку має бути адаптований таким чином, щоб блоки були максимально заповнені. Блоки малого розміру зменшують втрати пам'яті, але збільшують час обходу усіх елементів списку та збільшують накладні витрати пам'яті.

## Список літератури

1. Editors Ricci F., Rokach L., Shapira B., Kantor P. B. Recommender Systems Handbook. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2010. 842 p.
2. Valois B.Jr.C., Oliveira M.A. Recommender systems in social networks. *JISTEM J.Inf.Syst. Technol. Manag.* 2011. Vol.8 No.3. P. 681-716. URL: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1807-17752011000300009](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1807-17752011000300009) (Last accessed: 02.04.2021)
3. Фаулер М., Садаладж П. Дж. NoSQL: Новая методология разработки нереляционных баз данных. М.: Издательский дом «Вильямс». 2013. 192 с.
4. Meier A., Kaufmann M. SQL & NoSQL Databases. *Springer Vieweg, Wiesbaden*. 2019. P. 201-218. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.468.7089&rep=rep1&type=pdf> (Last accessed: 02.04.2021)
5. Cure O., Blin G. RDF Database Systems: Triples Storage and SPARQL Query Processing. *Elsevier Science*. 2014. 256 p.
6. Yi N., Li C., Feng X., Shi M. Design and implementation of movie recommender system based on graph database. *14th Web Information Systems and Applications Conference (WISA), IEEE*. 2017. P. 132-135.
7. Angles R. A comparison of current graph database models. *IEEE 28th International Conference on Data Engineering Workshops, IEEE*. 2012. P. 171-177.
8. Засядко Г.Е., Карпов А.В. Проблемы разработки графовых баз данных. *Инженерный вестник Дона*. 2017. №1(44). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-razrabotki-grafovyh-baz-dannyh> (дата обращения: 02.04.2021)
9. Мелков С., Мусатов Д., Савватеев А. Моделирование социальных сетей. 2013. URL: [https://kpfu.ru/docs/F117464271/MMS\\_socnet\\_cities.pdf](https://kpfu.ru/docs/F117464271/MMS_socnet_cities.pdf) (дата обращения: 02.04.2021)
10. Берновски М.М., Кузюрин Н.Н. Случайные графы, модели и генераторы безмасштабных графов. *Труды ИСП РАН*. 2012. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sluchaynye-grafy-modeli-i-generatory-bezmasshtabnyh-grafov> (дата обращения: 02.04.2021)
11. Райгородский А.М. Математические модели Интернета. "Квант". 2012. №4. С. 12-16. URL: [https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/431792](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431792) (дата обращения: 02.04.2021)
12. Meleshko Ye. Computer model of virtual social network with recommendation system. *Scientific journal Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, Kharkiv, NURE*. 2019. Issue 2(8). P. 80-84.
13. Робинсон Я., Вебер Д., Эфрем Э. Графовые базы данных: новые возможности для работы со связанными данными. М.: ДМК Пресс. 2016. 256 с.
14. Neo4j Documentation. 2020. URL: <https://neo4j.com/docs> (Last accessed: 02.04.2021)
15. Ахо А.В., Хопкрофт Д., Ульман Д.Д. Структуры данных и алгоритмы. М.: Вильямс, 2000. 384 с.
16. Minato S. Zero-suppressed BDDs and their applications. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*. 2001. №3.2. pp. 156-170.
17. Кнут Д.Э. Искусство программирования, Том 4А. Комбинаторные алгоритмы. Часть 1. М.: Вильямс. 2013. 960 с.

## Referencis

1. Editors Ricci, F., Rokach, L., Shapira, B. & Kantor, P.B. (2010). *Recommender Systems Handbook*. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc [in English].
2. Valois, B.Jr.C. & Oliveira, M.A. (2011). Recommender systems in social networks. *JISTEM J.Inf.Syst. Technol. Manag., Vol.8, No.3.* 681-716. Retrieved from [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1807-17752011000300009](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1807-17752011000300009) [in English].
3. Fauler, M., Sadaladzh, P. Dzh. (2013). *NoSQL: Novaja metodologija razrabotki nereljacionnyh baz dannyh* [NoSQL: A new methodology for the development of non-relational databases]. Williams Publishing House, Moscow. [in Russian].
4. Meier, A. & Kaufmann, M. (2019). SQL & NoSQL Databases. *Springer Vieweg, Wiesbaden.* 201-218. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.468.7089&rep=rep1&type=pdf> [in English].
5. Cure, O., Blin, G. (2014). RDF Database Systems: Triples Storage and SPARQL Query Processing. *Elsevier Science* [in English].
6. Yi, N., Li, C., Feng, X. & Shi, M. (2017). Design and implementation of movie recommender system based on graph database. *14th Web Information Systems and Applications Conference (WISA), IEEE.* 132-135[in English].
7. Angles, R. (2012). A comparison of current graph database models. *IEEE 28th International Conference on Data Engineering Workshops, IEEE,* 171-177 [in English].
8. Zaszjadko, G.E. & Karpov, A.V. (2017). Problemy razrabotki grafovyh baz dannyh [Problems in the development of graph databases]. *Inzhenernyj vestnik Dona – Engineering journal of Don. №1 (44).* Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-razrabotki-grafovyh-baz-dannyh> [in Russian].
9. Melkov, S., Musatov, D. & Savvateev, A. (2013) Modelirovanie social'nyh setej [Social networks' modeling]. Retrieved from [https://kpfu.ru/docs/F117464271/MMS\\_socnet\\_cities.pdf](https://kpfu.ru/docs/F117464271/MMS_socnet_cities.pdf) [in Russian].
10. Bernovski, M.M. & Kuzjurin, N.N. (2012). Sluchajnye grafy, modeli i generatory bezmasshtabnyh grafov [Random Graphs, Models, and Scaleless Graph Generators]. *Trudy ISP RAN – Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences.* 419-432. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/sluchajnye-grafy-modeli-i-generatory-bezmasshtabnyh-grafov> [in Russian].
11. Rajgorodskij, A.M. (2012). Matematicheskie modeli Interneta [Mathematical models of the Internet]. *“Kvant” – “Quantum”, No 4.* 12-16. Retrieved from [https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/431792](https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431792) [in Russian].
12. Meleshko, Ye. (2019). Computer model of virtual social network with recommendation system. *Scientific journal Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, Kharkiv: NURE, Issue 2(8).* 80-84 [in English].
13. Robinson, Ja., Veber, D., Jeifrem, Je. (2016). *Grafovyje bazy dannyh: novye vozmozhnosti dlja raboty so svjazannymi dannymi* [Graph databases: new possibilities for working with related data]. Moscow: DMK Press [in Russian].
14. Neo4j Documentation (2020). *neo4j.com*. Retrieved from <https://neo4j.com/docs> [in English].
15. Aho, A., Hopcroft, J., Ullman, J. (2000). *Struktury dannyh i algoritmy* [Data Structures and Algorithms]. Williams Publishing House, Moscow. [in Russian].
16. Minato, S. (2001). Zero-suppressed BDDs and their applications. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer, №3.2.* 156-170 [in English].
17. Knuth, D.E. (2013). *Iskusstvo programirovanija* [The art of programming], Tom 4A. Kombinatornye algoritmy. Chast' 1 [Art of Computer Programming, Volume 4A, The: Combinatorial Algorithms, Part 1]. Williams Publishing House, Moscow. [in Russian].

**Volodymyr Mikhav**, post-graduate, **Yelyzaveta Meleshko**, Assoc. Prof., DSc., **Serhii Shymko**, post-graduate  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Methods and Data Structures for Implementing a Database of Social Networks' Recommendation Systems**

The goal of this work is to research and program implementation of methods and data structures for building a database of a recommendation system in order to compare the efficiency of their use in terms of time and memory costs. The presence of a large number of different methods of database implementation necessitates a comparative analysis and selection of the optimal method and data structure for storing information in recommendation systems.

A research on various data structures that can be used to create a recommendation system database, in particular, the linked list, unrolled linked list, hash table, B-tree, B+-tree, and binary decision diagram were examined was conducted. A series of experiments on a software simulation model of a recommendation system with a different number of agents, items and sessions was also carried out.

The following research results were obtained. According to the results of the experiments, the unrolled linked list showed the best time and memory effectiveness. The B+-tree structure showed results close to a hash table. The access time to an individual element is stable in both cases, but the B+-tree has certain advantages – the elements are kept sorted, and when resizing, there is no need to expand the memory area. The worst results were shown by the data structure of the binary decision diagram, both in terms of time consumption and memory consumption. Profiling showed that 75% of the test run time for the option with an unrolled list was taken by generating random data for software simulation of agents and items of the recommendation system, therefore, the data warehouse itself has high performance indicators. Profiling of the variant with an inverted list showed that access to random blocks takes longer due to the inability to cache them, therefore, under real load conditions, the time for inserting new data will be longer, and the relative efficiency of using the inverted list will increase. For the most efficient use of memory, the block size of the linked list should be adapted so that the blocks are as full as possible. Small blocks reduce memory waste, but increase the time to traverse all the elements of the list and increase memory overhead.

**recommendation systems, databases, data structures, computer simulation model**

*Одержано (Received) 10.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 18.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**УДК 004.8/681.5**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).16-23](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).16-23)

**Р.М. Минайленко**, доц., канд. техн. наук, **О.Г. Собінов**, викл., **О.К. Коноплицька-Слободенюк**, викл., **К.О. Буравченко**, канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна  
e-mail: aron70@ukr.net, sagcob14@gmail.com*

## Архітектурні особливості систем розподілених обчислень

В статті проведено аналіз архітектурних особливостей систем розподілених обчислень Головним завданням, яке вирішують технології розподілених обчислень є забезпечення доступу до глобально розподілених ресурсів і вирішення задач, що потребують значних обчислювальних потужностей та не можуть бути реалізовані на звичайному комп'ютері. Складність реалізації глобальних задач обумовлена тим, що доступ до необхідних даних може відбуватись на різних комп'ютерах. Крім того, розподілені обчислювальні системи, які формуються із автономних ресурсів, можуть змінювати свою архітектуру динамічно. Керування такими розподіленими обчислювальними системами потребує пошуку нових моделей обчислення і пошуку архітектурних рішень для побудови нових систем які б відповідали сучасному рівню розвитку інформаційних технологій.

**комп'ютер, розподілені обчислення, інформаційні технології, архітектурні особливості**

**Постановка проблеми.** Останнім часом спостерігається все більше проникнення інформаційних технологій майже у всі галузі життєдіяльності людства. Розвиток інформаційних технологій пов'язаний з виникненням нових задач, що потребують значних обчислювальних ресурсів і не можуть бути вирішені на звичайному комп'ютері.

Великий об'єм обчислень потребує створення, так званих, суперкомп'ютерів, що реалізувати технічно не завжди можливо. Та існує і інший спосіб вирішення вказаної проблеми, коли складна задача розподіляється на певну кількість підзадач, що виконуються паралельно. І тут стають у пригоді системи розподіленого обчислення.



В загальному випадку, системою розподілених обчислень є віртуальний комп'ютер, який складається з декількох вузлів об'єднаних мережею. Тобто певна об'ємна задача розбивається на декілька простіших підзадач і встановлюються зв'язки між ними. Але така система буде працездатною тільки тоді, коли завдання між вузлами будуть розподілені коректно, а послідовність їх виконання відбуватиметься згідно з заданим алгоритмом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі архітектурні конфігурації розподілених обчислювальних систем можна класифікувати за різними ознаками:

- з огляду на будову алгоритму складових, які приймають участь в обчисленнях;
- моделей додатків;
- обмежень якості обслуговування та інших.

На верхньому рівні ієрархії – статичні та динамічні алгоритми планування ресурсів. Статичне планування та розрахунок вартісного оцінювання обчислень відбувається до виконання завдання, коли інформація відносно всіх ресурсів в розподіленому обчислювальному середовищі є відомою [1–3]. Головною перевагою статичної моделі є відносно не складна реалізація планувальника. Але вартісна оцінка, яка базується на статичній інформації, погано адаптується до ситуацій, пов'язаних з виходом із ладу одного з обчислювальних вузлів. Тому для вирішення проблеми використовуються механізми перепланування [4].

Динамічне планування частіше всього застосовується тоді, коли потрібно зробити оцінку обчислювальної вартості додатка, що надходить на виконання динамічно в режимі реального часу. Динамічне планування містить в собі два важливих компонента – оцінка стану системи та прийняття рішення про взаємодію завдання із черги з потрібним вибраним ресурсом [5–7].

Алгоритми динамічного планування представлені в роботі [8] присвячені випадку резервування ресурсів, що часто використовується в розподілених обчисленнях, для отримання деякої гарантії стабільності виробничих ресурсів. При використанні динамічних сценаріїв планування відповідальним за прийняття глобальних рішень може бути один централізований планувальник або декілька розподілених. Використання централізованого планувальника має перевагу за рахунок простоти реалізації, але є і недоліки: недостатнє масштабування та невисока відмовостійкість.

Субоптимальні алгоритми планування можна розділити на наближені, які використовують формальні обчислювальні моделі та евристичні алгоритми, які дають більш реальні дані про навантаження системи та виконання завдання.

Розподілені алгоритми планування, в залежності від того як працюють вузли, що використовуються в процесі планування незалежно чи сумісно, розділяють на зв'язні і незв'язні. У випадку незалежного планування локальний планувальник працює автономно і приймає рішення з урахуванням особливостей своїх функцій. У випадку сумісного планування кожен планувальник відповідає за виконання власної частини завдання, але всі планувальники працюють над виконанням спільного завдання [9].

Тобто архітектура тієї чи іншої системи розподілених обчислень залежить від того, які завдання вона повинна вирішувати.

**Постановка завдання.** На теперішній час для вдосконалення і спрощення процесу управління і організації систем розподілених обчислень існує велика кількість відкритих і комерційних програмних продуктів [9-15]. Але існує цілий ряд проблем які вирішені частково, або потребують певного вдосконалення [16-20]. До таких можна віднести:

1. Повнота інфраструктури системи.

2. Надання спрощеного розширення системи.
3. Автоматичне розгортання системи без вимкнення.
4. Можливість спрощеного способу доповнення систем.
5. Коректування навантаження системи в процесі використання.
6. Вдосконалення інфраструктури систем.

Тому аналіз існуючих методик і способів побудови систем розподілених обчислень і виявлення їх переваг та недоліків є актуальним завданням.

**Виклад основного матеріалу.** Особливістю систем з розподіленими обчисленнями, в порівнянні з суперкомп'ютерами, є можливість нарощування продуктивності. Такі системи можна класифікувати за наступними ознаками як:

- однорідність компонентів (однорідні, неоднорідні);
- рівень розв'язності компонентів (не дуже зв'язані, дуже зв'язані);
- організація (централізовані, децентралізовані, кластеризовані);

Проведемо аналіз архітектурних особливостей систем означених вище. На рис.1 представлено структурну схему централізованої системи розподілених обчислень:



Рисунок 1 – Структурна схема централізованої системи розподілених обчислень

Джерело: [1]

Централізовані системи розподілених обчислень складаються із головного вузла та другорядних вузлів. Головний вузол проводить розподіл задач між другорядними вузлами, контролює пріоритетність та процес виконання задачі. Крім того, головний вузол виконує функції приймання завдань та надає можливість зовнішнього впливу на систему. Розподілені системи з такою архітектурою добре пристосовані до нарощення продуктивності в процесі роботи і забезпечують якісний контроль процесу виконання завдання. При виникненні збоїв в роботі другорядного вузла, така система буде працездатною, хоча буде функціонувати з меншою продуктивністю. Виникненні збоїв у головному вузлі призведе до повної зупинки системи. Крім того, головний вузол контролює всю інформацію, що обробляється другорядними вузлами, що приводить до затримки її передачі. Тому такі системи розподілених обчислень доцільно застосовувати для вирішення завдань в яких час, витрачений на обмін інформацією не є пріоритетом.

Різновидом централізованої системи розподілених обчислень є кластеризовані системи де існує поняття кластеру, роль якого виконує певна частина централізованої системи розподілених обчислень, призначення для виконання обмеженої кількості завдань. Перевагою такої архітектури є раціональне використання доступних ресурсів.

Системам розподілу з кластеризованою архітектурою притаманна більша гнучкість, відмовостійкість та швидкість кінцевої відповіді в порівнянні із системами централізованого розподілу обчислень. Але такі системи потребують певного часу на пошук недозавантажених кластерів.

Структурна схема системи розподілених обчислень з кластеризованою архітектурою представлена на рис.2:

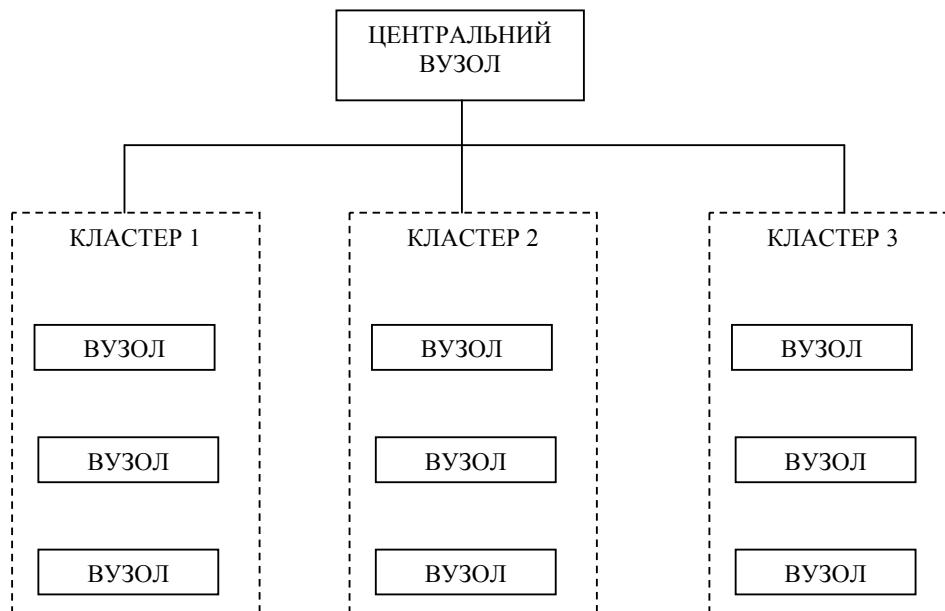


Рисунок 2 – Структурна схема системи розподілених обчислень кластеризованою архітектурою  
Джерело: [13]

В децентралізованих системах розподілених обчислень функцію приймання завдань та зв'язок із зовнішнім середовищем може виконувати будь-який вузол. На рис.3 представлено структурну схему децентралізованої системи розподілених обчислень:

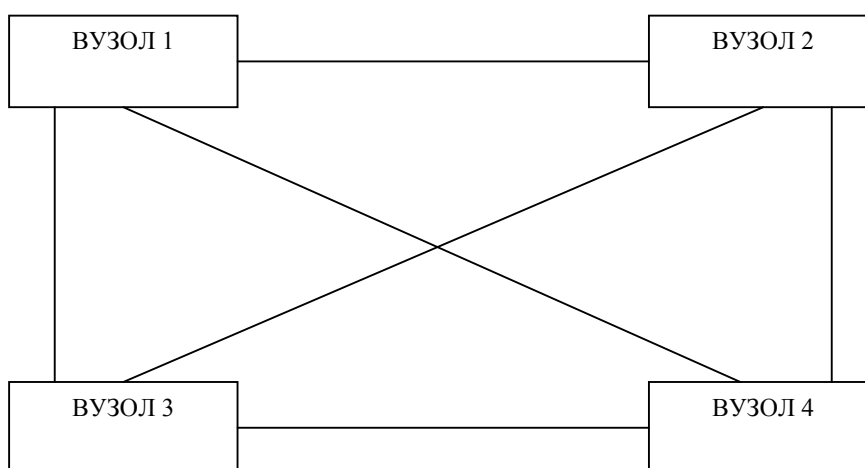


Рисунок 3 – Структурна схема децентралізованої системи розподілених обчислень  
Джерело: [18]

При надходженні завдання до певного вузла, відбувається розподіл на менші підзавдання між іншими вузлами. В результаті такого розподілу завдання, при

додаванні нових вузлів, виникають часові затримки пов'язані з ідентифікацією нового вузла сусідніми. В таких системах швидкість відповіді максимальна, а рівень зовнішнього контролю за ходом обчислень нижчий ніж у попередньої системи. Такі системи знайшли своє застосування при вирішенні певних однорідних задач з великим масивом даних де потрібна миттєва реакція на запит.

В розподілених системах із слабкими зв'язками кожен вузол є окремим незалежним компонентом і не використовує спільні ресурси, що значно впливає на надійність (відмовостійкість) системи і окремих вузлів.

В сильнозв'язаних системах вузли використовують спільні ресурси, що значно спрощує створення таких систем і зменшує час обробки завдань якщо їх небагато. Але користування спільними ресурсами знижує стабільність та відмовостійкість таких систем, а збільшення навантаження призводить до зменшення продуктивності, оскільки спільний ресурс не має змоги оперативно обслуговувати всі незалежні вузли.

Однорідні розподілені обчислювальні системи характеризуються тим, що всі вузли таких систем мають однорідні ресурси. Такі системи знаходять застосування у випадку, коли в одному завданні всі задачі використовують обмежену кількість алгоритмів ресурси яких однакові.

Неоднорідні системи складаються з вузлів різної конфігурації і доступ до ресурсів теж різний. Частіше всього такі системи є кластеризованими і кожен кластер спеціалізується на виконанні певних визначених задач. Основною перевагою неоднорідних розподілених систем є більш ефективне (в порівнянні з однорідними системами) використання ресурсів, оскільки для кожної вирішуваної задачі використовуються найбільш пристосовані, для задач певного типу, обчислювальні потужності. Основним недоліком таких обчислювальних систем є їх централізація.

**Висновки.** В статті проведено аналіз архітектурних особливостей систем розподілених обчислень Головним завданням, яке вирішують технології розподілених обчислень є забезпечення доступу до глобально розподілених ресурсів і вирішення задач, що потребують значних обчислювальних потужностей та не можуть бути реалізовані на звичайному комп'ютері. Складність реалізації глобальних задач обумовлена тим, що доступ до необхідних даних може відбуватись на різних комп'ютерах. Крім того, розподілені обчислювальні системи, які формуються із автономних ресурсів, можуть змінювати свою архітектуру динамічно. Керування такими розподіленими обчислювальними системами потребує пошуку нових моделей обчислення і пошуку архітектурних рішень для побудови нових систем які б відповідали сучасному рівню розвитку інформаційних технологій.

## Список літератури

1. Comparison of Eleven Static Heuristics for Mapping a Class of Independent Tasks onto Heterogeneous Distributed Computing Systems / R. Braun, H. Siegel et al. *Parallel and Distributed Computing*. 2001. Vol. 61, No. 6. P. 810–837.
2. Heuristics for Scheduling Parameter Sweep Applications in Grid Environments / H. Casanova, A. Legrand et al. *Heterogeneous Computing Workshop (HCW'00): Proceedings of the 9th Workshop (Cancun, Mexico, May 1, 2000)*. IEEE Computer Society, 2000. P. 349–363.
3. You, S.Y. Task Scheduling Algorithm in GRID Considering Heterogeneous Environment / S.Y. You, H.Y. Kim et al. *Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA '04): Proceedings of the International Conference (Nevada, USA, June 21–24, 2004)*. CSREA Press, 2004. Vol. 1. P. 240–245.
4. Cooper, K. New Grid Scheduling and Rescheduling Methods in the GrADS Project /Cooper, A. Dasgupta et al. *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'04): Proceedings of the 18th*

- International Symposium (Santa Fe, New Mexico USA, April 26–30, 2004). IEEE Computer Society, 2004. P. 199–206.
5. Improving Grid Level Throughput Using Job Migration And Rescheduling / K. Kurowski, B. Ludwiczak et al. *Scientific Programming*. 2004. Vol. 12, No. 4. P. 263–273.
  6. Takefusa, A. A Study of Deadline Scheduling for Client-Server Systems on the Computational Grid / A. Takefusa, S. Matsuoka et al. *High Performance Distributed Computing (HPDC-10)*: Proceedings of the 10th IEEE International Symposium (San Francisco, California, USA, August 7–9, 2001). IEEE Computer Society, 2001. P. 406–415.
  7. Chen, H., Maheswaran M. Distributed Dynamic Scheduling of Composite Tasks on Grid Computing Systems . *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2002)*: Proceedings of the 16th International Symposium (Fort Lauderdale, FL, USA, April 15-19, 2002). IEEE Computer Society, 2002. P. 88–97.
  8. Dynamic Job Grouping-Based Scheduling for Deploying Applications with Fine-Grained Tasks on Global Grids / N. Muthuvelu, J. Liu et al. *Grid Computing and e-Research (AusGrid 2005)*: Proceedings of the 3rd Australasian Workshop (Newcastle, NSW, Australia, January 30 – February 4, 2005). Australian Computer Society, 2005. P. 41–48.
  9. Scheduling in Heterogeneous Grid Environments: The Effects of Data Migration / H. Shan, L. Olikier et al. *Advanced Computing and Communication (ADCOM 2004)*: Proceedings of the 12th IEEE International Conference (Ahmedabad Gujarat, India, December 15–18, 2004). IEEE Computer Society, 2004. P. 1–8.
  10. Dong, F., Akl S.G. Scheduling algorithms for grid computing: State of the art and open problems. Technical Report No. 2006-504 . Queen’s University, Canada, 2006. P. 55.
  11. Distributed Job Scheduling on Computational Grids using Multiple Simultaneous Requests / V. Subramani, R. Kettimuthu et al. *High Performance Distributed Computing (HPDC 2002)*: Proceedings of 11th IEEE Symposium (Edinburgh, Scotland, July 23–26, 2002). IEEE Computer Society, 2002. P. 359–366.
  12. El-Rewini, H. Task Scheduling in Parallel and Distributed Systems / H. El-Rewini, T. Lewis, H. Ali — Prentice Hall, 2010. 290 p.
  13. Radulescu, A., Gemund A.J.C. On the Complexity of List Scheduling Algorithms for Distributed Memory Systems . *Supercomputing (SC’99)*: Proceedings of 13th International Conference (Portland, Oregon, USA, November 13–19, 1999). IEEE Computer Society, 1999. P. 68–75.
  14. Sakellariou, R., Zhao H. A Low-cost Rescheduling Policy for Efficient Mapping of Workflows on Grid Systems . *Scientific Programming*. 2017. Vol. 12, No. 4. P. 253–262.
  15. Darbha, S., Agrawal, D.P. Optimal Scheduling Algorithm for Distributed Memory Machines. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 1998. Vol. 9, No. 1. P. 87–95.
  16. Ranaweera, S., Agrawal D.P. A Task Duplication Based Scheduling Algorithm for Heterogeneous Systems. *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS’00)*: Proceedings of 14<sup>TH</sup> International Symposium (Cancun, Mexico, May 1–5, 2000). IEEE Computer Society, 2000. P. 445–450.
  17. Bajaj, R., Agrawal, D.P. Improving Scheduling of Tasks in A Heterogeneous Environment . *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2004. Vol. 15, No. 2. P. 107–118.
  18. Yang, T., Gerasoulis, A. DSC: Scheduling Parallel Tasks on an Unbounded Number of Processors. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 1994. Vol. 5, No. 9. P. 951–967.
  19. Liou, J., Palis, M.A. A Comparison of General Approaches to Multiprocessor Scheduling . *International Parallel Processing Symposium (IPPS ’97)*: Proceedings the 11th International Symposium (Geneva, Switzerland, April 1–5, 1997). IEEE Computer Society, 1996. P. 152–156.

## References

1. Braun R., Siegel H. et al. (2001). Comparison of Eleven Static Heuristics for Mapping a Class of Independent Tasks onto Heterogeneous Distributed Computing Systems .*Parallel and Distributed Computing*. Vol. 61, No. 6. P. 810–837[in English].

2. H. Casanova, A. Legrand et al. (2000). Heuristics for Scheduling Parameter Sweep Applications in Grid Environments. *Heterogeneous Computing Workshop (HCW'00): Proceedings of the 9th Workshop (Cancun, Mexico, May 1, 2000)*. IEEE Computer Society, P. 349–363 [in English].
3. You S.Y., Kim H.Y. et al. (2004). Task Scheduling Algorithm in GRID Considering Heterogeneous Environment. *Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA '04): Proceedings of the International Conference (Nevada, USA, June 21–24, 2004)*. CSREA Press. Vol. 1. P. 240–245 [in English].
4. Cooper, K., Dasgupta A. et al. (2004). New Grid Scheduling and Rescheduling Methods in the GrADS Project. *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'04): Proceedings of the 18th International Symposium (Santa Fe, New Mexico USA, April 26–30, 2004)*. IEEE Computer Society, P. 199–206 [in English].
5. Kurowski K., Ludwiczak B. et al. (2004). Improving Grid Level Throughput Using Job Migration And Rescheduling / *Scientific Programming. Vol. 12, No. 4*. P. 263–273 [in English].
6. Takefusa, A., Matsuoka S. et al. (2001). A Study of Deadline Scheduling for Client-Server Systems on the Computational Grid. *High Performance Distributed Computing (HPDC-10): Proceedings of the 10th IEEE International Symposium (San Francisco, California, USA, August 7–9, 2001)*. IEEE Computer Society, P. 406–415 [in English].
7. Chen, H. & Maheswaran, M. (2002). Distributed Dynamic Scheduling of Composite Tasks on Grid Computing Systems. *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2002): Proceedings of the 16th International Symposium (Fort Lauderdale, FL, USA, April 15-19, 2002)*. IEEE Computer Society, P. 88–97 [in English].
8. Muthuvelu, N., Liu, J. et al. (2005). Dynamic Job Grouping-Based Scheduling for Deploying Applications with Fine-Grained Tasks on Global Grids. *Grid Computing and e-Research (AusGrid 2005): Proceedings of the 3rd Australasian Workshop (Newcastle, NSW, Australia, January 30 – February 4, 2005)*. Australian Computer Society, P. 41–48 [in English].
9. Shan H., Olikar L. et al. (2004). Scheduling in Heterogeneous Grid Environments: The Effects of Data Migration. *Advanced Computing and Communication (ADCOM 2004): Proceedings of the 12th IEEE International Conference (Ahmedabad Gujarat, India, December 15–18, 2004)*. IEEE Computer Society, P. 1–8 [in English].
10. Dong, F. & Akl, S.G. (2006). Scheduling algorithms for grid computing: State of the art and open problems. Technical Report No. 2006-504. Queen's University, Canada, P. 55 [in English].
11. Subramani, V., Kettimuthu, R. et al. (2002). Distributed Job Scheduling on Computational Grids using Multiple Simultaneous Requests. *High Performance Distributed Computing (HPDC 2002): Proceedings of 11th IEEE Symposium (Edinburgh, Scotland, July 23–26, 2002)*. IEEE Computer Society, P. 359–366 [in English].
12. El-Rewini, H. & Lewis, T. (2010). Task Scheduling in Parallel and Distributed Systems. H. Ali - Prentice Hall, 290 p. [in English].
13. Radulescu, A. & Gemund, A.J.C. (1999). On the Complexity of List Scheduling Algorithms for Distributed Memory Systems. *Supercomputing (SC'99): Proceedings of 13th International Conference (Portland, Oregon, USA, November 13–19, 1999)*. IEEE Computer Society, P. 68–75 [in English].
14. Sakellariou, R. & Zhao, H. (2017). A Low-cost Rescheduling Policy for Efficient Mapping of Workflows on Grid Systems. *Scientific Programming. Vol. 12, No. 4*. P. 253–262 [in English].
15. Darbha, S. & Agrawal, D.P. (1998). Optimal Scheduling Algorithm for Distributed Memory Machines. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. Vol. 9, No. 1*. P. 87–95 [in English].
16. Ranaweera, S. & Agrawal, D.P. (2005). A Task Duplication Based Scheduling Algorithm for Heterogeneous Systems. *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'00): Proceedings of 14<sup>TH</sup> International Symposium (Cancun, Mexico, May 1–5, 2004)*. IEEE Computer Society, P. 445–450 [in English].
17. Bajaj, R. & Agrawal, D.P. (2004). Improving Scheduling of Tasks in A Heterogeneous Environment. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. Vol. 15, No. 2*. P. 107–118 [in English].
18. Yang, T. & Gerasoulis, A. (1994). DSC: Scheduling Parallel Tasks on an Unbounded Number of Processors. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. Vol. 5, No. 9*. P. 951–967 [in English].

19. Liou, J. & Palis, M.A. (1996). A Comparison of General Approaches to Multiprocessor Scheduling . *International Parallel Processing Symposium (IPPS '97)*: Proceedings the 11th International Symposium (Geneva, Switzerland, April 1–5, 1997). IEEE Computer Society, P. 152–156 [in English].

**Roman Minailenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandr Sobinov**, lecturer, **Oksana Konopliiska-Slobodenyuk**, lecturer, **Kostiantyn Buravchenko**, PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Architectural Features of Distributed Computing Systems**

Recently, there has been an increasing penetration of information technology in almost all areas of human life. The development of information technology is associated with the emergence of new tasks that require significant computing resources and can not be solved on a conventional computer.

A large amount of computing requires the creation of so-called supercomputers, which is not always technically possible. But there is another way to solve this problem, when a complex task is divided into a number of subtasks that run in parallel. And here come in handy distributed computing system. In general, a distributed computing system is a virtual machine that consists of several nodes connected by a network. That is, a certain three-dimensional problem is divided into several simple subtasks and connections are established between them. But such a system will be operational only when the tasks between the nodes are distributed correctly, and the sequence of their execution will take place according to a given algorithm.

The article analyzes the architectural features of distributed computing systems. The main task of distributed computing technologies is to provide access to globally distributed resources and solve problems that require significant computing power and can not be implemented on a conventional computer. The complexity of global tasks is due to the fact that the necessary data can be accessed on different computers. In addition, distributed computing systems, which are formed from autonomous resources, can change their architecture dynamically. Management of such distributed computer systems requires the search for new computational models and the search for architectural solutions to build new systems that would meet the current level of development of information technology.

**computer, distributed computing, information technology, architectural features**

*Одержано (Received) 27.01.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.02.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

## ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.891

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).24-33](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).24-33)**А.Г. Кравцов**, доц., канд. техн. наук*Харківський національний технічний університет сільського господарства ім .П. Василенка, м. Харків, Україна  
e-mail: [kravcov\\_84@ukr.net](mailto:kravcov_84@ukr.net)*

## Дослідження структури сервовитної плівки на поверхні тертя з фулереновими композиціями

У роботі представлені експериментальні результати дослідження поверхонь тертя без застосування і при застосуванні фулеренової композиції в мастильному матеріалі. Доведено, що параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості поверхонь тертя після застосування в мастильному матеріалі фулеренової композиції суттєво відрізняються. Наведено результати Фур'є-аналізу, які дозволяють стверджувати, що при застосуванні фулеренової композиції суттєво зростає рівень анізотропії субблоків структури, практично в 2 рази, що свідчить про перехід трибосистеми на новий, вищий рівень самоорганізації. Хімічний аналіз поверхонь тертя при застосуванні фулеренової композиції показав збільшенням процентного вмісту вуглецю при одночасному зменшенню процентного вмісту кисню.

**трибосистема, сервовитна плівка, фулеренові композиції, кластери, міцели, Фур'є-аналіз, вектор напруження, хімічний аналіз поверхонь тертя**

**Постановка проблеми.** За останні роки з'явилося багато публікацій присвячених застосуванню нанодобавок до мастильних матеріалів [1-3]. Виявлено, що модифіковані оливи наноматеріалами, утворюють дисперсні системи, підвищують зносостійкість робочих поверхонь різних типів трибосистем та знижують втрати на тертя. Дослідження формування оптимального складу трибологічних присадок до базової оливи показали можливість покращення характеристик змащувальних матеріалів. Було виявлено, що застосування наноматеріалів дає можливість формувати функціональні поверхневі шари, які забезпечують підвищення ресурсу трибосистем.

Наявність в змащувальному матеріалі дисперсної фази у вигляді кластерів і міцел на основі молекул фулерена, створюють на поверхні тертя "зшиті" структури, які сприймають і релаксують напруження на фактичних плямах контакту. Управління процесом створення таких структур дозволить підвищити зносостійкість і знизити втрати на тертя.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Авторами роботи [4] представлено огляд літератури по мастильним матеріалам з додаванням наночастинок. Проаналізовано вплив наночастинок на трибологічні характеристики оливо. У роботі відзначено, що використання нанодобавок до мастильних матеріалів призводить до підвищення в'язкості базового середовища, високої несучої здатності сполучення, зниження коефіцієнта тертя, підвищення зносостійкості.

В роботі [5] показано, що ефект введення вуглецевих наночастинок в пластичні мастила істотно залежить від типу мастила, і може як покращувати, так і погіршувати трибологічні показники мастил. У той же час на всіх досліджених типах мастил при введенні вуглецевих наночастинок отримано збільшення навантаження задира, незалежно від типу мастила-бази.



Авторами роботи [6] робиться висновок про перспективність використання наноматеріалів в мастильних матеріалах. Робота містить висновки, що характеристики мастильного матеріалу можна покращити застосуванням нанопридадків. Робота присвячена інформаційному огляду застосування нанодобавок до рідких мастильних матеріалів і перспективам їх використання при виробництві оливи.

Деякі важливі аспекти використання наночастинок наведені в роботі [7]. При модифікації мастильних матеріалів автори враховують такі чинники: розмір наночастинок, форму, структуру, модифікацію поверхні тертя, концентрацію частинок, фізичні і хімічні властивості поверхонь тертя. Було відмічено, що при додаванні нанодобавок до мастильних матеріалів, навіть при низьких концентраціях, значно знизилася коефіцієнти тертя і швидкість зношування. Крім того, вуглецеві нанотрубки і графен екологічно чисті і безпечні матеріали. На підставі проведених досліджень автори позитивно оцінюють перспективи використання зазначених наноматеріалів для модифікації мастильних матеріалів.

У роботах [8, 9] були виконані дослідження фулеренів високого ступеня очищення після їх додавання в базову оливу. Дослідження виконувалися на чотирьохкульковій машині тертя. Результати показали, що застосування фулеренів зменшує діаметр плями зносу. На поверхні тертя спостерігалася наявність плівки. Автори роботи рекомендують такі мастильні матеріали для підшипників ковзання, а також для твердих мастильних матеріалів. При цьому концентрації добавок в базовій оливі варіювали в інтервалі 0,5-2,0 мас. %.

Авторами роботи [10] досліджувалися як тверді мастильні матеріали з фулереновими добавками, включаючи графен (G), фулерен (C60) і вуглецеві нанотрубки (CNT), так і рідкі мастильні матеріали. Автори відзначають, що такі мастильні композиції викликають величезний інтерес завдяки своїм чудовим трибологічним характеристикам. У порівнянні з базовою оливою застосування фулеренів призводить до зниження коефіцієнта тертя на 90%, що забезпечує найкращі антифрикційні властивості. Автори висувають припущення, що на поверхні тертя утворюється блокова фізична захисна плівка, яка значно згладжує поверхню тертя.

Значне зниження коефіцієнта тертя в порівнянні зі швидкістю зношування відзначається в роботах [3, 11]. Досліджувалася малов'язка компресорна олива з додаванням фулеренів 0,1% об. В результаті коефіцієнт тертя зменшився на 90%, в порівнянні з базовою оливою. Перспективність застосування фулеренів в багатьох технічних областях відзначається в роботах [12-16].

Авторами роботи [17] експериментально встановлено, що шлях поліпшення трибологічних властивостей мастильних матеріалів введенням дрібнодисперсного порошку фулеренів в базові технічні оливи малоефективний. У вказаній роботі запропоновано варіант попереднього диспергування фулеренів в рослинних високоолеїнових оліях, наприклад ріпакової, а потім додавання даної композиції в технічні оливи. В роботі наведені експериментальні дослідження зі зміни коефіцієнта тертя, який зменшується на 86%.

Відповідно до висновків роботи [17] агрегати дисперсної фази, об'єднані зовнішніми електростатичними силами в суцільну сітку (каркас) на поверхні тертя, набувають властивостей "твердого тіла". Незначне зовнішнє навантаження утворює пружну деформацію каркасу. При досить високому навантаженні, каркас руйнується, а окремі агрегати роз'єднуються.

Виконаний аналіз літературних джерел по перспективам використання фулеренів, як добавок до мастильних матеріалів, дозволяє висунути робочу гіпотезу про формування на поверхні тертя "зшитий" структури з агрегатів, що містять молекули

фулеренів. Такі структури беруть участь в релаксації напружень на плямах фактичного контакту при роботі трибосистеми, тим самим знижують швидкість зношування і коефіцієнт тертя.

**Постановка завдання.** Метою роботи є підтвердити робочу гіпотезу про формування на поверхні тертя "зшитих просторових структур", які створюються за рахунок утворення і взаємодії між собою кластерів і міцел в полі дії електростатичних сил поверхонь тертя.

**Виклад основного матеріалу.** Мікроструктурний та хімічний аналіз поверхонь тертя проводили для конструкції трибосистеми: "сталь 40X + Бр.АЖ 9-4"; площа тертя рухомого трибоелемента  $F_{тр,р}=0,0003 \text{ м}^2$ , нерухомого  $F_{тр,н}=0,00015 \text{ м}^2$ ; навантаження на трибосистему  $N = 1000 \text{ Н}$ ; швидкість ковзання  $v_{ков} = 0,5 \text{ м/с}$ ; базова олива М-10Г<sub>2к</sub> ( $E_y=3,6 \cdot 10^{14} \text{ Дж/м}^3$ ); концентрація фулеренової композиції 100 г/кг [17]. Отримані результати порівнювали з поверхнями тертя аналогічної трибосистеми, де в моторній оливі не застосовувалася фулеренова композиція. Аналізу підлягали поверхні тертя сталевих та бронзових трибоелементів.

Шорсткість і профіль поверхні зразків визначали за допомогою профілометра-профілографа TR200 фірми JENOPTIK, відповідно стандартам ISO 4287-1997. Шорсткість оцінювали середнім арифметичним відхиленням точок профілю  $Ra$ , розмірність мкм, та середнім кроком нерівностей по середній лінії профілю  $Sm$ , розмірність, мм. Похибка вимірювання  $Ra$  та  $Sm$  не перевищувала 10%, відтворюваність становила  $\leq 5 \%$ .

Параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості поверхонь тертя представлено в таблиці 1 та таблиці 2.

Параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості поверхонь тертя після застосування в мастильному матеріалі фулеренової композиції суттєво відрізняються. Товщина мастильної плівки  $h$  залежить від великої кількості робочих, технологічних і конструктивних параметрів, які перераховані в роботі [18]. В кінцевому рахунку  $h$  впливає на величину робочої шорсткості  $Ra$  і  $Sm$  за рахунок утворення "зшитих структур" з міцел і кластерів, які утримуються на поверхні тертя силами електростатичної взаємодії. Такі структури "вирівнюють" поверхні тертя зменшуючи  $Ra$  і збільшуючи  $Sm$ .

Таблиця 1 – Середні значення мікрошорсткості бронзового зразка Бр.АЖ 9-4, після випробувань в моторній оливі та в моторній оливі з фулереновою композицією

Умови вимірювання	Моторна олива	Моторна олива з фулереновою композицією 100 гр/кг
Параметри	Величина	Величина
Мінімум профілю, мкм	0,205	0,18
Максимум профілю, мкм	0,227	0,190
$Ra$ , мкм	0,2	0,166
$Rmax$ , мкм	0,23	0,19
$Sm$ , мм	0,42	0,54

Джерело: розроблено автором

Таблиця 2 – Середні значення мікросорсткості сталевого зразка сталь 40X, після випробувань в моторній оливі та в моторній оливі з фулереновою композицією

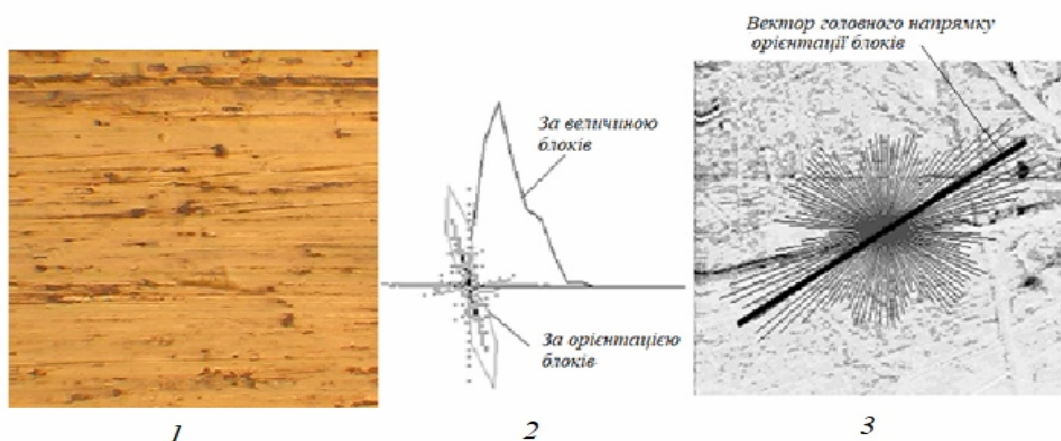
Умови вимірювання	Моторна олива	Моторна олива з фулереновою композицією 100 гр/кг
Параметри	Величина	Величина
Мінімум профілю, мкм	0,276	0,211
Максимум профілю, мкм	0,298	0,262
$Ra$ , мкм	0,23	0,195
$Rmax$ , мкм	0,27	0,21
$Sm$ , мм	0,40	0,50

Джерело: розроблено автором

Середнє арифметичне відхилення точок профілю  $Ra$ , розмірність мкм, при застосуванні фулеренових композицій, зменшується для бронзової поверхні тертя з величини  $Ra=0,2$  мкм, до величини  $Ra=0,166$  мкм, тобто на 17 %, похибка вимірювань 4,2 %. Для сталевий поверхні тертя з величини  $Ra=0,23$  мкм, до величини  $Ra=0,195$  мкм, тобто на 16 %, похибка вимірювань 5,4 %.

Середній крок нерівностей по середній лінії профілю  $Sm$ , розмірність, мм; при застосуванні фулеренових композицій, збільшується для бронзової поверхні тертя з величини  $Sm =0,42$  мм, до величини  $Sm =0,54$  мм, тобто на 28,5 %, похибка вимірювань 4,8 %. Для сталевий поверхні тертя з величини  $Sm =0,40$  мм, до величини  $Sm =0,50$  мм, тобто на 25 %, похибка вимірювань 5,8 %.

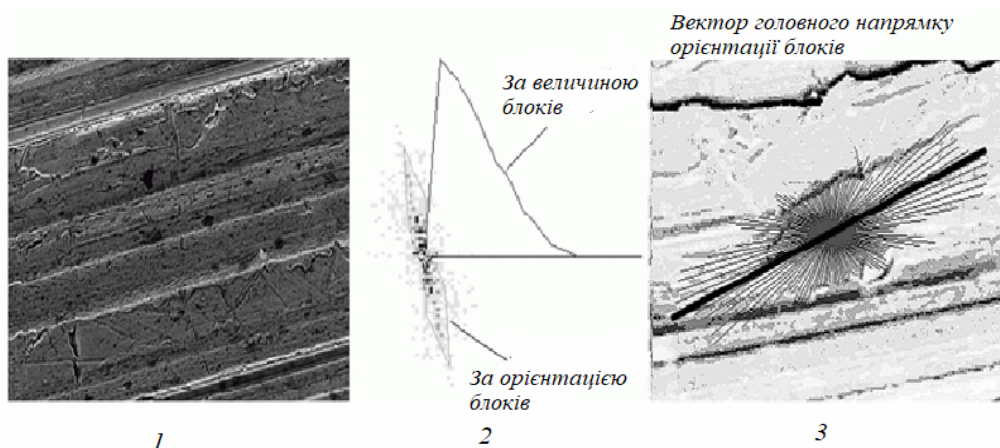
Результат проведеного Фур'є-аналізу, рис.1 – рис.4. дозволяють зробити наступні висновки, що застосування фулеренової композиції в мастильному матеріалі призводить до зниження головного вектора напруження як в сталевому, так і в бронзовому трибоелементах відповідно до вектора напрямку ковзання. При застосуванні фулеренової композиції суттєво зростає рівень анізотропії субблоків структури, практично в 2 рази, що свідчить про перехід трибосистеми на новий, вищий рівень самоорганізації.



1 – мікрофотографія поверхні тертя, x500; 2 – рівень різноманітності (структурна анізотропія); 3 – напрямок орієнтації блоків структури

Рисунок 1 – Фур'є-аналіз просторової орієнтації блоків структури поверхні тертя бронзового трибоелемента без застосування фулеренової композиції

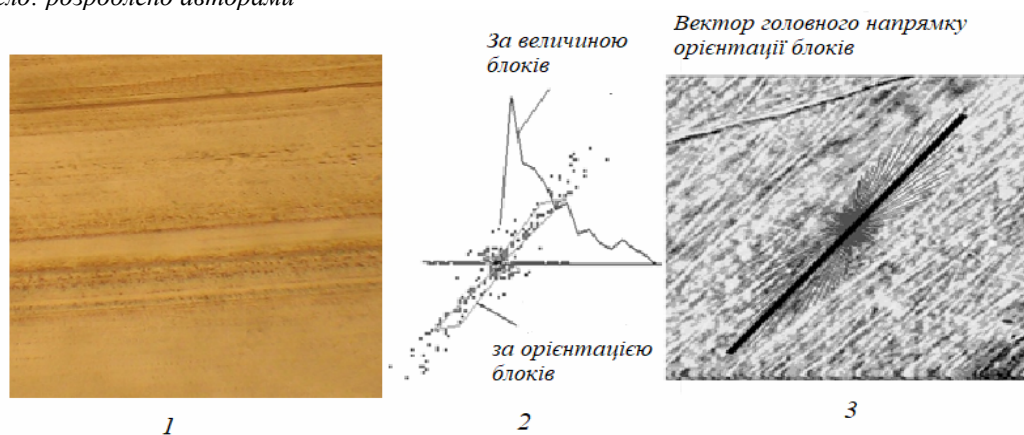
Джерело: розроблено авторами



1 – мікрофотографія поверхні тертя, x500; 2 – рівень різноманітності (структурна анізотропія);  
3 – напрямок орієнтації блоків структури

Рисунок 2 – Фур'є-аналіз просторової орієнтації блоків структури поверхні тертя сталевого трибоелемента без застосування фулеренової композиції

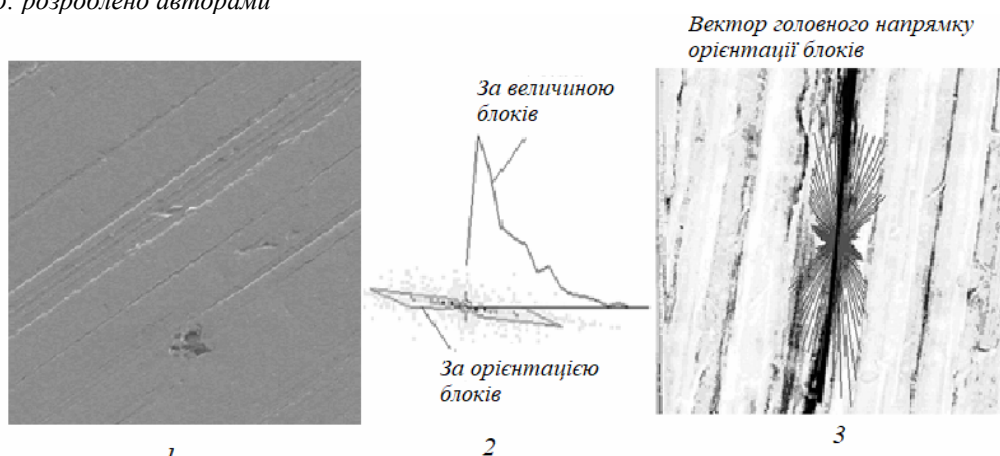
Джерело: розроблено авторами



1 – мікрофотографія поверхні тертя, x500; 2 – рівень різноманітності (структурна анізотропія);  
3 – напрямок орієнтації блоків структури

Рисунок 3 – Фур'є-аналіз просторової орієнтації блоків структури поверхні тертя бронзового трибоелемента при застосуванні фулеренової композиції

Джерело: розроблено авторами



1 – мікрофотографія поверхні тертя, x500; 2 – рівень різноманітності (структурна анізотропія);  
3 – напрямок орієнтації блоків структури

Рисунок 4 – Фур'є-аналіз просторової орієнтації блоків структури поверхні тертя сталевого трибоелемента при застосуванні фулеренової композиції

Джерело: розроблено авторами

Наступним кроком металографічних досліджень стало проведення хімічного аналізу сервовитної плівки, яка утворилася в результаті взаємодії електростатичного поля поверхонь тертя та кластерами і міцелами змашувального середовища з фулереновими композиціями.

Хімічний аналіз поверхонь тертя проводили на комплексі РЕММА 106И. Досліджувались дві пари зразків трибосистеми сталь 40X + Бр. Аж 9-4. На одній парі поверхонь тертя (сталевий та бронзовий трибоелементи), була сформована структура поверхневих шарів при роботі трибосистеми в мастильному середовищі М-10Г<sub>2к</sub> без фулеренової композиції. На другий парі поверхонь тертя була сформована структура поверхневих шарів при роботі трибосистеми в мастильному середовищі М-10Г<sub>2к</sub> при наявності фулеренової композиції концентрації 100 г/кг.

Провівши хімічний аналіз було встановлено, що на поверхні тертя бронзового трибоелемента без застосування фулеренової композиції, рис. 1, присутні такі хімічні елементи: Al = 10,2 %; Fe = 3,8 %; Cu = 72,55 %; O<sub>2</sub> = 12,3 %; Cl = 0,4 %; S = 0,2 %; Ca = 0,15 %; C = 0,4 %. Процентне співвідношення хімічних елементів пояснюється наступним чином. Оскільки основу поверхні тертя становить бронза, то звичайно присутність Cu = 72,55 % і Fe = 3,8 % є цілком природна, а оскільки до моторної оливи входить комплексна присадка, то на поверхні тертя присутні Cl = 0,4 %; S = 0,2 %; Ca = 0,15 %. Малий процентний вміст вуглецю, C = 0,4 % і великий вміст кисню, O<sub>2</sub> = 12,3 %, що цілком природно та відповідає результатам досліджень інших дослідників.

На поверхні тертя сталевого трибоелемента без застосування фулеренової композиції, рис. 2, присутні такі хімічні елементи: Fe = 77,55 %; Cu = 0,3 %; O<sub>2</sub> = 18,4 %; Cr = 1,0 %; Mn = 0,8 %; Si = 0,5 %; Cl = 0,4 %; Ni = 0,3 %; S = 0,2 %; Ca = 0,15 %; C = 0,4 %. Процентне співвідношення хімічних елементів пояснюється таким чином. Оскільки основу поверхні тертя становить залізо, то звичайно присутність Fe = 77,55 %; і Cr = 1,0 %; є цілком природна. Наявність інших хімічних елементів пояснюється комплексною присадкою в моторній оливі. Тому на поверхні тертя присутні Cl = 0,4 %; S = 0,2 %; Ca = 0,15 %. Малий процентний вміст вуглецю, C = 0,4 % і великий вміст кисню, O<sub>2</sub> = 18,4 %.

Хімічний аналіз поверхні тертя бронзового трибоелемента при застосуванні фулеренової композиції, рис. 3, суттєво відрізняється. На поверхні тертя значно збільшується присутність вуглецю: C = 29,2 %. Одночасно зменшується наявність кисню O<sub>2</sub> = 9,1 %. Останні хімічні елементи майже залишаються не змінними. Такий результат дозволяє зробити висновок, що на поверхні тертя сформовано структуру, у складі якої присутній хімічний елемент вуглець, співвідношення якого значно перевищує інші хімічні елементи.

Аналогічні висновки можна зробити по результатам хімічного аналізу поверхні тертя сталевого трибоелементу, рис. 4. На поверхні тертя значно збільшується присутність вуглецю: C = 24,3 %. Одночасно зменшується наявність кисню O<sub>2</sub> = 7,4 %. Останні хімічні елементи майже залишаються не змінними. Такий результат дозволяє зробити висновок, що на поверхні тертя сталевого трибоелементу сформовано структуру, у складі якої присутній хімічний елемент вуглець.

**Обговорення результатів досліджень.** Як впливає з отриманих результатів, застосування фулеренових композицій в складі розчинників в базових мастильних рідких матеріалах буде зменшувати *Ra* і збільшувати *Sm*, що спричинить збільшення діаметра фактичної плями контакту сполучених поверхонь тертя і зниження напружень на фактичній плямі контакту. Зміна вказаних параметрів позитивно впливає на зміну величини об'ємної швидкості зношування, та коефіцієнт тертя, зменшуючи ці показники.

Провівши хімічний аналіз поверхонь тертя при застосуванні фулеренової композиції встановлено, що на поверхні тертя присутня структура з великим вмістом вуглецю. Можна зробити припущення, що це є "зшита" структура, де ядром міцели виступає молекула, або декілька молекул фулерену, до яких приєднані молекули олеїнової кислоти розчинника. Така структура утримується на поверхні тертя силами електростатичної взаємодії. Наявність таких сил пояснюється значно більшим дипольним моментом у сформованих міцел. Такий висновок підтверджується збільшенням процентного вмісту вуглецю  $C = 24,3...29,2 \%$ , при одночасному зменшенні процентного вмісту кисню з  $18,4 \%$  до  $7,4 \%$ . На основі проведених досліджень можна стверджувати, що формування зшитих структур призводить до зниження втрат на тертя, а зменшення окислювальної здатності поверхонь тертя – до зменшення швидкості зношування.

**Висновки.** Експериментальними дослідженнями встановлено, що параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості поверхонь тертя після застосування в мастильному матеріалі фулеренової композиції суттєво відрізняються. Товщина мастильної плівки впливає на величину робочої шорсткості  $Ra$  і  $Sm$  за рахунок утворення "зшитих структур" з міцел і кластерів, які утримуються на поверхні тертя силами електростатичної взаємодії. Такі структури "вирівнюють" поверхні тертя зменшуючи середнє арифметичне відхилення точок профілю  $Ra$  і збільшуючи середній крок нерівностей по середній лінії профілю  $Sm$ .

Результат проведеного Фур'є-аналізу дозволяє стверджувати, що застосування фулеренової композиції в мастильному матеріалі призводить до зниження головного вектора напруження як в сталевому, так і в бронзовому трибоелементах відповідно до вектора напряму ковзання. При застосуванні фулеренової композиції суттєво зростає рівень анізотропії субблоків структури, практично в 2 рази, що свідчить про перехід трибосистеми на новий, вищий рівень самоорганізації.

Провівши хімічний аналіз поверхонь тертя при застосуванні фулеренової композиції встановлено, що на поверхні тертя присутня структура з великим вмістом вуглецю. Такий результат підтверджує робочу гіпотезу, що це є "зшита" структура з міцел, де ядром міцели виступає молекула, або декілька молекул фулерену, до яких приєднані молекули олеїнової кислоти розчинника. Така структура утримується на поверхні тертя силами електростатичної взаємодії. Наявність таких сил пояснюється значно більшим дипольним моментом у сформованих міцел. Такий висновок підтверджується збільшенням процентного вмісту вуглецю з  $C = 0,4 \%$  до  $C = 24,3...29,2 \%$ , при одночасному зменшенні процентного вмісту кисню з  $18,4 \%$  до  $7,4 \%$ .

## Список літератури

1. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах. Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2014. 369 с.
2. Триботехнология восстановления деталей мобильной с.-х. и транспортной техники модификацией моторного масла фуллеренсодержащим составом / Аулин В.В., Деркач А.Д., Буря А.И. и др. *Тракторы и сельхозмашины*. 2014. № 4. С. 26-29.
3. Аулін В.В., Деркач О.Д., Лисенко С.В., Гриньків А.В. Вплив фулереновмісних оливок на фізико-механічні властивості поверхні тертя спряжень деталей. *Проблеми трибології*. 2018. №4. С. 60-64.
4. Anurag Singh, Prashant Chauhan, Mamatha T. G. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives // *Materials today: proceedings*, 2020, Volume 25, Part 4, pages 586-591 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.245>
5. Mungse H.P., Khatri O.P. Chemically Functionalized Reduced Graphene Oxide as Novel Material for Reduction of Friction and Wear // *Phys. Chem. C*, 2014, 118 (26), p. 14394–14402. DOI: 10.1021/jp5033614.

6. Sheida Shahnazar, Samira Bagheri, Sharifah Bee Abd Hamid. Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015, V. 41, Issue 4, p. 3153-3170 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.040>
7. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova et al. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers // *Journal of Molecular Liquids*. 2019, V. 279, p. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113>
8. Yanli Yao, Xiaomin Wang, Junjie Guo, et al. Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive // *Materials Letters*. 2007, V. 62, Issue 16, p. 2524-2527. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.056>
9. Rapoport L., Feldman Y., Homyonfer M., et al. Tenne Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship // *Wear*. 1999. V. 225–229, Part 2, p. 975-982 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00040-X)
10. Yunusov F. A., Breki A. D., Vasilyeva E. S., et al. The influence of nano additives on tribological properties of lubricant oil // *Materials today: proceedings*. 2020. Available online 14 February <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447>
11. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, et al. Insights into friction dependence of carbon nanoparticles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface // *Carbon*. 2019. V. 150, p. 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>
12. Jaekeun Lee, Sangwon Cho, Yujin Hwang et al. Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces // *Tribology International*. 2009. V. 42. Issue 3, p. 440-447.
13. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova, et al. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers. *Journal of Molecular Liquids*, 2019. V. 279, p. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113>
14. Аулін В., Бабак Р., Забазний О. Механізм утворення вакансій, дислокацій та руйнування залізо-вуглецевих сплавів на основі фулеренової моделі вуглецю. *Наука виробництва-2004: зб. наук. праць за матеріалами доповідей XXXVIII наук. конф. студентів, магістрантів та аспірантів*. Кіровоград: КНТУ, 2004. С. 104-105.
15. Аулін В.В., Барановський Д.М. Отримання фулеренів в зоні лазерного опромінення графіту. *Наука виробництва-2004. Зб. наук. праць за матеріалами доповідей XXXVIII наук. конф. студентів, магістрантів та аспірантів*. Кіровоград: КНТУ, 2004. С. 119-121.
16. Аулін В.В., Кропівний В.М., Кузик О.В., Кропівна А.В. Вплив зміни концентрації фулеренів у залізovуглецевих матеріалах при хіміко-термічній обробці на рівень надійності деталей. *Крамаровські читання. Зб. тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції, 21-22 лют. 2019 р., м. Київ / НУБіП. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2019. – С. 192-195.*
17. Vojtov V. A., Kravcov A. G., and Tsymbal B. M. Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant // *FRICITION AND WEAR*, 2020, Vol. 41, No. 6, 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197
18. Kravtsov A., Gradiskiy Y., Tsymbal B., Borak K. Simulation of the oil film thickness on a friction surface in the presence of fullerene compositions in the lubricant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1021(1), 012040. doi:10.1088/1757-899X/1021/1/012040

## References

1. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems]*. Kirovohrad: Lysenko V.F. [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Derkach, A.D., Burya, A.I. et al. (2014). Tribotehnologiya vosstanovleniya detaley mobilnoy s.-h. i transportnoy tehniky modifikatsiey motornogo masla fullerensoderzhaschim sostavom [Tribotechnology for restoring parts of a mobile agricultural and transport equipment by modifying the motor oil with a fullerene-containing composition]. *Traktory i selhozmashiny - Tractors and agricultural machinery. № 4.* 26-29 [in Russian].
3. Aulin, V.V., Derkach, O.D., Lysenko, S.V. & Hrynkiv, A.V. (2018). Vplyv fullerenovmisnykh olyv na fizyko-mekhanichni vlastyosti poverkhni tertia spriazhen detalei [Influence of fullerene-containing oils on physical and mechanical properties of the friction surface of conjugations of parts]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology. №4.* 60-64 [in Ukrainian].
4. Anurag Singh, Prashant Chauhan, Mamatha T. G. (2020). A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Materials today: proceedings.* 25 (4), 586-591. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.245> [in English].
5. Mungse, H.P., Khatri, O.P. (2014). Chemically Functionalized Reduced Graphene Oxide as Novel

- Material for Reduction of Friction and Wear. *Phys. Chem. C.* 118 (26). 14394–14402. DOI: 10.1021/jp5033614 [in English].
6. Sheida Shahnazar, Samira Bagheri, Sharifah Bee Abd Hamid. (2015). Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International Journal of Hydrogen Energy.* 41 (4). 3153-3170. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.040> [in English].
  7. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova et al. (2019). Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers. *Journal of Molecular Liquids.* 279. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113> [in English].
  8. Yanli Yao, Xiaomin Wang, Junjie Guo, et al. (2007). Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive // *Materials Letters.* 62 (16). 2524-2527. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.056> [in English].
  9. Rapoport L., Feldman Y., Homyonfer M., et al. (1999). Tenne Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship. *Wear.* 225–229 (2). 975-982. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00040-X) [in English].
  10. Yunusov F. A., Breki A. D., Vasilyeva E. S., et al. (2020). The influence of nano additives on tribological properties of lubricant oil. *Materials today: proceedings*, Available online 14 February <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447> [in English].
  11. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, et al. (2019). Insights into friction dependence of carbon nanoparticles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface. *Carbon*, 150, 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050> [in English].
  12. Jaekeun Lee, Sangwon Cho, Yujin Hwang et al. (2009). Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces. *Tribology International.* 42 (3), 440-447. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.08.003> [in English].
  13. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova, et al. (2019). Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers, *Journal of Molecular Liquids.* 279. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113> [in English].
  14. Aulin, V., Babak, R. & Zabaznyi, O. (2004). Mekhanizm utvorennia vakansii, dyslokatsii ta ruinuvannia zalizo-vuhletsevykh splaviv na osnovi fulerenovoi modeli vuhletsu [Mechanism of establishing vacancies, dislocation and formation of hard-carbon alloys on the basis of fullerene model in carbon]. *Science virobnistvu-2004: Zb. nauk. prats za materialamy dopovidei XXXVIII nauk. konf. studentiv, mahistrantiv ta aspirantiv - Zb. sciences. Prats for materials of additional studies of XXXVIII sciences. conf. students, masters and postgraduates.* Kirovohrad: KNTU, S. 104-105 [in Ukrainian].
  15. Aulin, V.V. & Baranovskyi, D.M. (2004). Otrymannia fulereniv v zoni lazernoho oprominennia hrafitu. [Otrivation of fullerenes in the zone of laser optimization of graphite]. *Science virobnistvu-2004: Zb. nauk. prats za materialamy dopovidei XXXVIII nauk. konf. studentiv, mahistrantiv ta aspirantiv - Zb. sciences. Prats for materials of additional studies of XXXVIII sciences. conf. students, masters and postgraduates.* Kirovohrad: KNTU, S. 119-121 [in Ukrainian].
  16. Aulin, V.V., Kropivnyi V.M., Kuzyk O.V., Kropivna A.V. (2019). Vplyv zminy kontsentratsii fulereniv u zalizovuhletsevykh materialakh pry khimiko-termichnii obrobtsi na riven nadiinosti detalei [The effect of changes in the concentration of fullerenes in ferroc carbon materials during chemical heat treatment on the level of reliability of parts]. *Kramarovski chytannia. Zb. tez dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii - Coll. abstracts of the VI International Scientific and Technical Conference.* K.: Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy, 2019. S. 192-195 [in Ukrainian].
  17. Vojtov, V. A., Kravcov, A. G., & Tsymbal, B. M. (2020). Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant. *FRICITION AND WEAR.* 41(6). 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197 [in English].
  18. Kravtsov A., Gradiskiy Y., Tsymbal B., Borak K. (2021). Simulation of the oil film thickness on a friction surface in the presence of fullerene compositions in the lubricant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 1021(1). 012040. doi:10.1088/1757-899X/1021/1/012040 [in English].

**Andrii Kravtsov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine*

### **Investigation of the Structure of a Servotic Film on the Surface of Friction with Fullerene Compositions**

The paper presents the experimental results of the study of friction surfaces without the use and when using a fullerene composition in a lubricant. It is shown that the parameters of the microrelief profile and the roughness of the friction surfaces after application of the fullerene composition in the lubricant differ significantly. The thickness of the lubricating film affects the amount of working roughness  $Ra$  and  $Sm$  due to the formation of "cross-linked structures" of micelles and clusters, which are held on the friction surface by



electrostatic interaction. Such structures "align" the friction surface by reducing the arithmetic mean deviation of the profile points  $Ra$  and increasing the average pitch of the inequalities along the midline of the profile  $Sm$ .

The results of the Fourier analysis, which allow us to state that the use of a fullerene composition leads to a decrease in the main stress vector in both steel and bronze triboelements in accordance with the vector of the sliding direction. When using the fullerene composition, the level of anisotropy of the subblocks of the structure increases significantly, almost 2 times, which indicates the transition of the tribosystem to a new, higher level of self-organization.

After chemical analysis of the friction surfaces using a fullerene composition, it was found that on the friction surface there is a structure with a high carbon content. This result confirms the working hypothesis that it is a "crosslinked" structure of micelles, where the nucleus of the micelle is a molecule, or several molecules of fullerene, to which are attached molecules of oleic acid solvent. This conclusion is confirmed by the increase in the percentage of carbon  $C = 24,3...29,2$  %, while reducing the percentage of oxygen from 18,4 % to 7,4 %. The latter chemical elements remain almost unchanged. This result allows us to conclude that a structure is formed on the friction surface, which contains the chemical element carbon, the ratio of which significantly exceeds other chemical elements..

**tribosystem, servite film, fullerene compositions, clusters, micelles, Fourier analysis, stress vector, chemical analysis of friction surfaces**

*Одержано (Received) 06.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 12.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**UDC 62-82:631.3:621.659**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).33-43](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).33-43)

**Serhiy Shargorodskiy**, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Volodymyr Rutkevych**, Assoc. Prof., Phd tech. sci., **Vadym Zakrevskiy**, assistant

*Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine*

*e-mail: sergey20@vsau.vin.ua, v\_rut@ukr.net, vadimzakreva@gmail.com*

## Modeling of Working Processes of an Adjustable APN Type PVC 1.85 Taking Into Account Parametric Oscillations

The paper presents the calculation results of the two mathematical models of the variable displacement axial piston pumps PVC 1.85. In the first mathematical model of the pistons averaged force was used, the application point of which corresponds to the offset of the swash plate's swivel axis. In the second mathematical model the parametric change of the pistons consolidated force magnitude and the coordinates of its application point was taken into account.

**variable displacement axial piston pump, flow rate characteristics, the swash plate swivel axis, moment of pistons consolidated force, pressure pulsation**

**Statement of the problem.** Energy saving and the increasing of the economic efficiency are the fundamental trends in the development of modern multipurpose mobile machines, including agricultural, constructional, road-building, etc. This is done with the help of energy supply activation to the working parts' driving units, productivity and operating speeds enhancement, extension of machines' technological capabilities, minimization of the number and the power of the drive engines. These tasks are most efficiently solved by using hydraulic power for the operating units' drives [1].

**Analysis of recent research and publications.** Currently, the load-sensitive LS-hydraulic systems are widely used in order to improve the efficiency of the hydraulic systems and mobile machines, in process of using of the hydraulic drives of the working parts. These hydraulic systems are capable for a flexible providing of the working fluid to the several executive hydraulic engines according to their needs with a single pump [2, 3]. In the most cases, the level of the technical characteristics of the LS-hydraulic systems is determined by the quality indicators of the hydraulic equipment components, first of all, by the variable displacement pumps that provide the appropriate supply of the working fluid to each hydraulic motors of the LS-hydraulic system. Variable displacement axial piston pumps are frequently used, as pumping units of the LS-hydraulic systems. In this case, adjustable axial rotary piston pumps with a swash plate enjoy the priority usage [1]. The pumps of this design are relatively simple compared to the other types of the pumps, while the range of the control of the working fluid supply fully satisfies the consumers.

These factors determine the interest of the world leading firms such as Bosch Rexroth, Danfoss, Parker Hannifin, Eaton and others to develop the production and improve the design of the pumps of this type [4-6]. Currently, the enterprises of Ukraine pay the considerable attention to the development in this area. PrJSCHydrosila APM has achieved the most notable results. The company pays considerable attention to the reducing of the level of the volumetric and mechanical losses, the reducing of the ripple of the flow rate and pressure, the improving of the quality of the static and dynamic characteristics [7].

At present time, the manufacturers of the hydraulic machines of this type pay the considerable attention to the increasing of the nominal pressure, the expanding of the working temperature range, the improving of the quality of the static and dynamic characteristics. Successful solution of these problems requires many efforts in such scientific fields as the material science, the developing of the design and the engineering technologies of the implementing hydraulic machines, the future developing of a scientific approach in the selection of the parameters of the hydraulic machines. Therefore, the development of the scientifically based methods for the selecting of the rational values of the variable displacement axial piston pumps parameters is a task of a current interest.

**Statement of the problem.** The purpose of this work is to study the static characteristics of the variable displacement axial piston pump PVC 1 type and to develop the methods to improve the pump.

**Main material.** One of the most important characteristics of the variable displacement axial piston pumps used in the construction of the LS-hydraulic actuators is the relationship between the pump flow rate and the load (pressure) at the pump output. According to the modern requirements, the change in the pump flow rate during the increasing of the pressure from zero to the nominal value should not exceed  $\pm 4\%$  of the nominal flow rate.

PVC 1 series pumps are available in several sizes from PVC 1.18 with a displacement of  $18\text{ cm}^3$  to PVC 1.85 with a displacement of  $85\text{ cm}^3$ . Along with it, pumps of all sizes are equipped with the LS-regulators of the PVN 45 type, with different diameters of the control hydraulic cylinders.

According to the design scheme (Fig. 1), the pump consists of the cylinder block 1 in which the pistons 2 are installed, a swash plate 3, a drive shaft 7. The pistons have a spherical heads, which engage in the slippers 8 which fit against the sliding surface of the swash plate. The pump flow control system consists of the LS-regulator 4, which includes two spool valves – a control valve and a shut-off valve; a hydraulic cylinder 5, a tilting of the swash plate 3, and a spring 6 for pressing the swash plate.

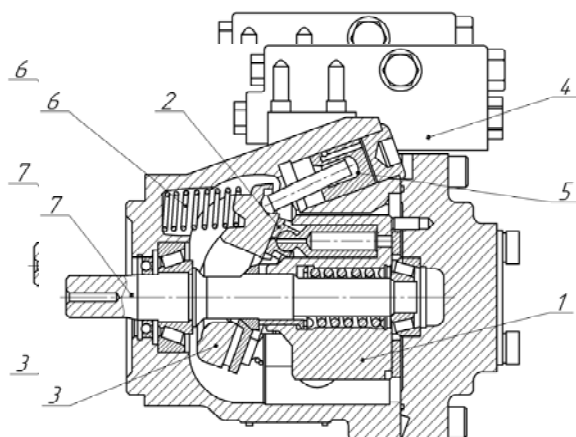


Figure 1 – The design of the variable displacement axial piston pump PVC 1.85  
 Source: developed by the author [7]

The design feature of the pump is the location of the swash plate is the offset  $\varepsilon$  of the swash plate swivel axis relatively to the cylinder block rotation axis (offset), shown on a calculating scheme (Fig. 2), which is used in the research. As a result, the pistons exercise a force on the swash plate, aimed to turn the swash plate in the direction of increasing of the inclination angle  $\varphi$  from the vertical axis and increasing of the pump flow rate appropriately.

On the basis of the calculating scheme (Fig. 2), a mathematical model was drawn up describing the work process of the pump as part of the LS-hydro power drive, with taking into the account the signal from the hydraulic motor to the LS-regulator [8]. The significant influence of the spool pairs clearance of the LS-regulator on static characteristics quality of the pump unit had been shown and was taken into the account by the manufacturer, and the arrangements to stabilize the radial clearance in spool pairs between 0,004 mm and 0,006 mm were implemented.

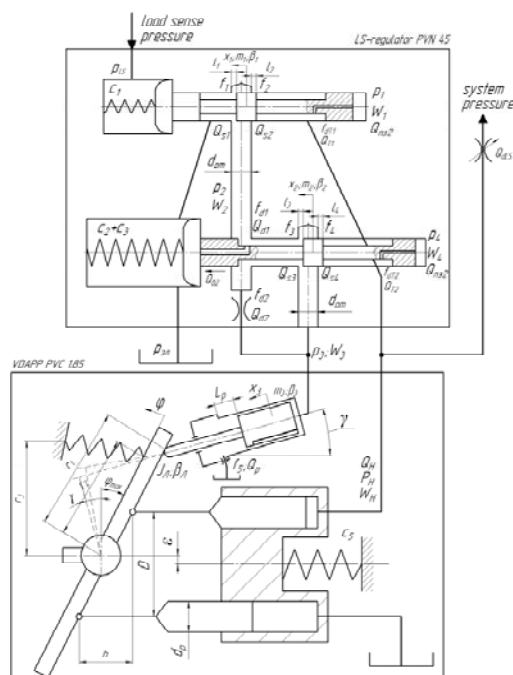


Figure 2 – The calculating scheme of the variable displacement axial piston pump PVC 1.85  
 Source: obtained by authors

At the same time, it is important to clarify the nature of the pump parameters' influence on its static characteristics. It should be noted, that there is no method for the choosing of the offset value, based on the results of the pump static characteristics research. The offset value significantly influences the operation of the pump flow rate control mechanism, determining the torque value, which action is directed on increasing the swash plate inclination angle  $\gamma$  and the pump flow rate respectively. As it was already noted, the decreasing of the flow rate is provided by the action of the control hydraulic cylinder piston 5 (Fig. 1) on the swash plate 3.

The Fig. 3 shows the static characteristics that represent the dependences of the pump flow rate on the outlet pressure  $p_{LS}$  of the LS throttle, connected to the input of the corresponding hydropower drive, calculated for the pump PVC 1.85 with the displacement of  $85 \text{ cm}^3$  and the nominal pressure  $p_{nom} = 210 \text{ bar}$  under the condition of the using of the LS- throttle in accordance with: the pump shaft rotational speed  $n = 1500 \text{ rpm}$ , the volume of the hydraulic line connecting the pump output to the LS throttle  $W = 40 \text{ cm}^3$ , the hole diameter in the LS throttle  $d_{LS} = 6 \text{ mm}$ , the initial swash plate inclination angle  $\varphi = 18^\circ$ , spools diameter  $d_s = 7 \text{ mm}$ , the spool pairs radial clearance  $\delta = 0,004 \text{ mm}$ , the moment of the inertia reduced to the pump shaft  $I = 13,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , the overlapping of the working windows of the LS-regulator spools  $l_2 = l_4 = 1,4 \text{ mm}$ , the diameter of the control hydraulic cylinder  $d_c = 24,72 \text{ mm}$ , the working fluid viscosity  $\nu = 19,3 \text{ cSt}$ , which corresponds to the viscosity of the hydraulic oil HM 46 at the temperature of  $60^\circ\text{C}$ .

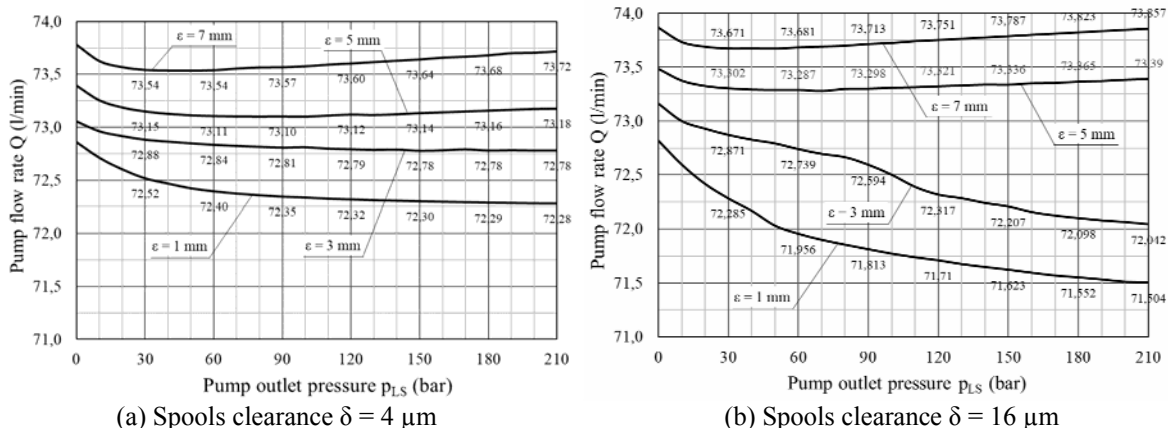


Figure 3 – The static characteristics curves of the pump PVC 1.85 for different offset values  
 Source: obtained by authors

The static characteristics have been calculated at the various offset  $\epsilon$  values that were equal to 1 mm, 3 mm, 5 mm and 7 mm respectively.

The value of the offset  $\epsilon$  significantly changes the nature of the pistons force action to the swash plate [9]. The value of the arising moment, that is aimed to increase the swash plate inclination angle, rises accordingly to the offset  $\epsilon$  value increasing. In the process of this static characteristic calculating we have assumed that the consolidated action force of the cylinder block pistons was constant and applied at the offset  $\epsilon$  level.

The starting point of the static characteristics at the pressure value  $p_{LS} = 0 \text{ bar}$  corresponds to the work of the executive hydraulic motor without a load. At the same time, the LS-hydraulic power drive operational principle provides the 20 bar of a pressure difference in the LS-throttle. The difference between the pump flow rate values at the initial pressure is correspondingly determined by the different force effects exerted by the pistons of the cylinder block acting on the swash plate; by the various torques aimed to increase the pump flow rate at the different offset  $\epsilon$  values.

The maximum value of the pump flow rate  $Q = 73,78$  l/min has been obtained at the offset  $\varepsilon = 7$  mm. The minimum value of the pump flow rate  $Q = 72,86$  l/min corresponds to the offset  $\varepsilon = 1$  mm. Mismatch of the pump flow rates at the pointed offsets reaches 1,25 %. Wherein the static characteristics have been calculated for the offsets  $\varepsilon$  equal to 5 mm and 7 mm were practically stable over the entire range of the pressure variation. Along with it, at the offsets  $\varepsilon$  equal to 1 mm and 3 mm, the pump flow rate decreases as the pressure  $p_{LS}$  increases at the output of the LS-throttle. At the pump outlet nominal pressure, the pump flow rate decreasing at the offset  $\varepsilon = 1$  mm reaches 2 % compared to the pump flow value at the offset  $\varepsilon = 7$  mm. Note, that this result has been obtained when there was a minimum clearance in the spool pairs of the LS-regulator, equal to  $\delta = 0,004$  mm.

In the case of the increasing of the LS-regulator spool pairs radial clearance to  $\delta = 0,016$  mm, which is close to the existing technical conditions for the spool pairs production, the static characteristics have the form shown in the Fig. 3, b. In this case, at the offset  $\varepsilon$  values equal to 5 mm and 7 mm, the pump flow rate is stable over the entire range of the pressure variation  $p_{LS}$ . Along with it, at the offset  $\varepsilon = 1$  mm, the drop in the pump flow rate at the nominal pressure at the outlet of the pump reaches 3,5 %, which approaches to the maximum permissible values.

Analysis of the pump flow control system operation revealed the peculiarities of the force effect of the cylinder block pistons to the swash plate during the pump flow rate changing process. The parametric dependence of the clamp by the consolidate force of the cylinder block pistons of the swash plate was studied by Bashta and al. [9]. The refined nature of this relationship was studied in article [10](Fig. 4). The authors have also identified the variable position of the application point of the consolidate force of the swash plate clamping, which changes during the cylinder block rotation. As a result, the value of the moment oscillation amplitude of the swash plate reversal in the direction of the pump flow rate increasing, caused by the action of the pistons consolidate force, for the pump PVC 1.85 reaches 325 N·m. It has been shown that the minimum and maximum reversal moment values of the swash plate substantially depend on the offset  $\varepsilon$  value. At the offset  $\varepsilon < 5$  mm, negative values of the consolidated force moment may appear, that are directed towards the decreasing of the swash plate inclination angle, i.e. the reverse of the swash plate is replaced by its obverse (Fig. 4) [9].

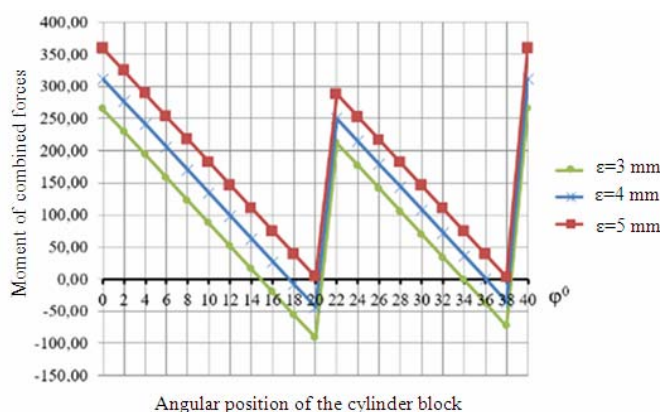


Figure 4 – Correlation between angular position of the cylinder block and the consolidate force moment that works on the swash plate

Source: obtained by authors

In the pump PVC 1.85 static characteristics calculations (Fig. 3), the averaged value of the piston consolidated force moment on the swash plate has been taken into the account, the application point of which according to [9] was also constant and was at the offset level. It is as well obvious that significant amplitude fluctuations in the moment of pistons reduced force

(the fluctuations frequency is 450 Hz at a cylinder block nominal speed  $n = 1500$  rpm) cause corresponding swash plate oscillations. Along with it, as it is shown in Fig. 4, at the small offset  $\epsilon$  values, a periodic moment change of the piston consolidated force on the swash plate causes the opposite effect. The indicated moment changes the sign and thus coincides in the direction with the moment created by the control hydraulic cylinder, which can cause the opposite effect. This fact makes it necessary to study the influence of the parametric dependence of the moment of the pistons consolidated force action on the swash plate on the cylinder block angular position on this type pumps characteristics.

The static characteristics of the PVC 1.85 pump have been calculated using the mathematical model, described in article [8], taking into account the parametric dependence of the moment of the pistons consolidate force to the swash plate on the cylinder block angular position, described in [10].

The Fig. 5 shows the static characteristics of the pump PVC 1.85, calculated with the regard on the parametric dependence of the piston consolidated force moment on the swash plate on the angular position of the cylinder block at different offset values.

The Fig. 5, a, shows the static characteristics have been calculated with the offset  $\epsilon$  equal to 1 mm, 3 mm, 5 mm and 7 mm. The parameters of the considered pump correspond to those pointed above for the Fig. 3. The radial clearance in the spool pairs is 0,004 mm.

It has been shown above that regarding the pistons consolidated force moment on the swash plate in the form of average value for a given value of the radial clearance, the static characteristics have significant stability. Along with it, consideration of the parametric dependence of the pistons consolidated force moment causes significant differences in the pump PVC 1.85 static characteristics.

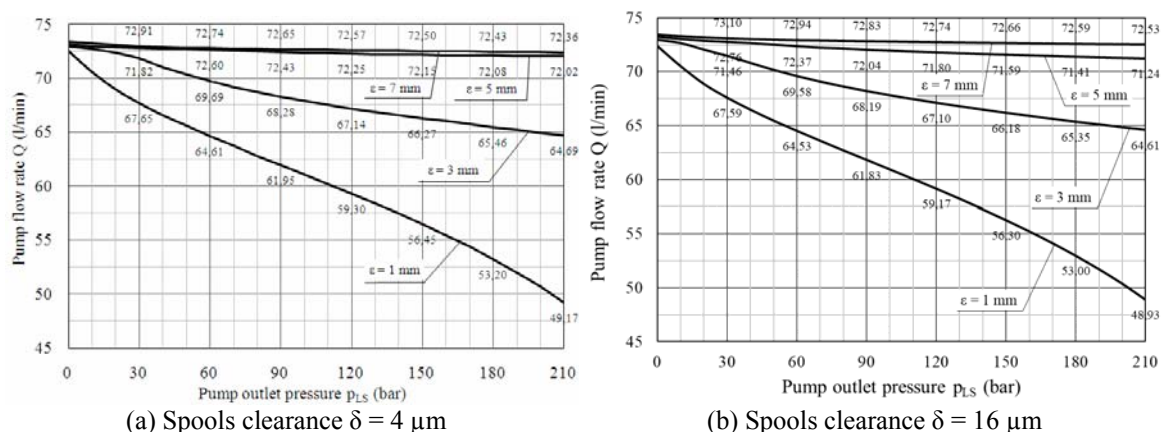


Figure 5 – The static characteristics curves of the pump PVC 1.85 for different offset values, with the regard of the moment pulsation of the pistons consolidate force

Source: obtained by authors

At the offset  $\epsilon$  values equal to 5 mm and 7 mm, the flow rate reduction does not exceed 1,5 % with the pressure  $p_{LS}$  increasing from the minimum value to the nominal one. At the same time, the significant pump flow rate reduction occurs when the pump outlet pressure increases at the offset 1 mm and 3 mm. In the case, when the offset  $\epsilon = 3$  mm, the pump flow reduction reaches 11,3 %, and at the offset  $\epsilon = 1$  mm the decreasing of the pump flow reaches 32,7 %. These values of the pump flow rate reducing indicate to non-compliance with pump specifications at the assigned offset values. Taking this into the account, the manufacturer of these pumps stopped using the previously assigned offset equal to 4 mm and set the offset equal to 5 mm into the swash plate design.

The Fig. 5, b, shows the static characteristics of the pump PVC 1.85, calculated with regard on the parametric dependence of the pistons consolidated force moment on the swash plate with the offset  $\varepsilon$  values 1 mm, 3 mm, 5 mm and 7 mm. In this case, it has been assumed that the radial clearances in the LS-regulator were  $\delta = 0,016$  mm. The remaining pump parameters have the values as defined above.

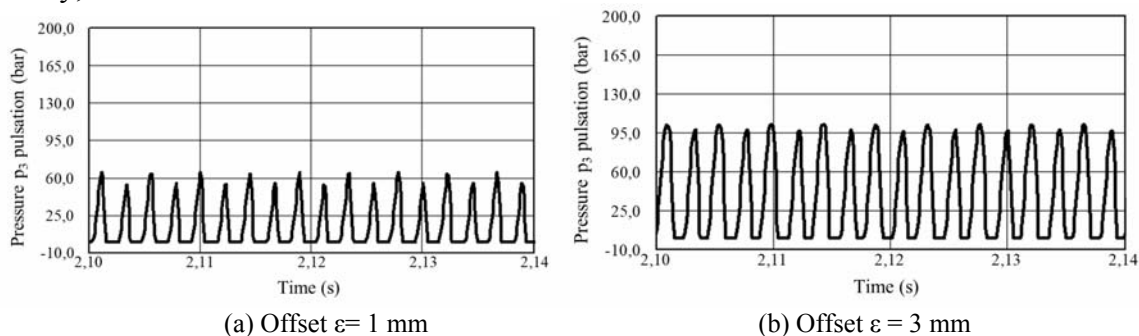
The static characteristics of the pump PVC 1.85 in this case have changed slightly. The smallest change in the pump flow rate with the pressure  $p_{LS}$  increasing corresponds to the offset  $\varepsilon$  value equal 7 mm. The pump flow rate drop does not exceed 0,6 %. At the offset  $\varepsilon$  value equal 5 mm, the flow rate reduction is at 1,6 % while the output pressure is increased to the nominal value ( $p_{LS} = 210$  bar). In the both cases, the static characteristics level indicates their insignificant deterioration compared with the static characteristics shown in the Fig. 5, a, at the spool pairs radial clearance  $\delta = 0,004$  mm.

It should be noted that in this case, the nature of the static characteristics that have been calculated at the offset values equal to 1 mm and 3 mm, closely coincides with those shown in the Fig. 5, a, and the differences between them do not exceed 1,5 %. The static characteristic quality of the pump PVC 1.85 at the offset  $\varepsilon$  value 1 mm and 3 mm, with this combination of parameters, does not meet the regulatory requirements, which determines the inoperability of the pump in this case.

The consideration of the parametric dependence of the pistons consolidated force on the swash plate has showed a significant effect of the offset  $\varepsilon$  value on the calculation results of the static characteristics of PVC 1.85 pumps. There is a significant discrepancy between the results of the static characteristics calculation, considering the moment of the pistons consolidated force on the swash plate, averaged over the value and independent of the cylinder block rotation angle, and regarding this moment in the form of a parametric dependence. This difference allows noting the need to use the characteristics of variable displacement axial piston pump methods taking into account their features as accurately as possible in the characteristics calculations. The results of the of static characteristics calculation are corresponding to the existing experience in this size pumps production at PrJSCHydrosila APM (Kropyvnytskyi, Ukraine).

The research results show that the pump flow rate stability is enhanced when offset value increases according to the corresponding static characteristics in the entire operating outlet pressure range. In this case, a high stability of the pump flow rate should be expected at the offset values 5 mm and 7 mm. It should be noted, that increasing of the offset from 5 mm to 7 mm does not give a significant effect, since the calculated accuracy values of the static characteristics are actually close to the ideal values in this case. Along with it, it should be noted, that the increasing of the offset leads to the increasing of the pressure in the cavity of the servo-piston.

The Fig. 6 shows the oscillograms of the pressure fluctuations in the control cylinder cavity, have been calculated for the different offset  $\varepsilon$  values.



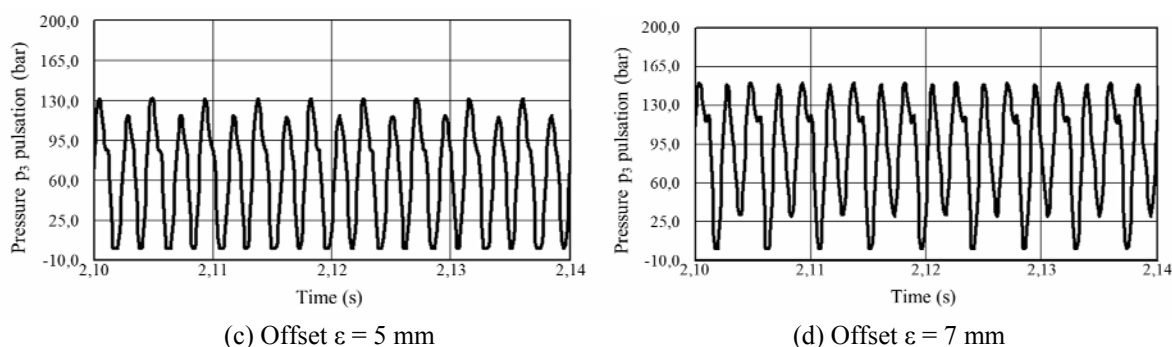


Figure 6 – Pulsations of the pressure  $p_3$  in the control cylinder cavity

Source: obtained by authors

The oscillogram in the Fig. 6, a, corresponds to the pressure fluctuations in the control hydraulic cylinder cavity at the offset  $\varepsilon$  value equal 1 mm. The pressure oscillations in the control hydraulic cylinder cavity have a frequency of 450 Hz, which corresponds to the frequency of the moment oscillations of the pistons consolidated force on the swash plate. The maximum pressure does not exceed 66,2 bar. However, it should be noted, that there is a pressure periodic drop in the control hydraulic cylinder cavity to the zero value in this case. In the used model, it has been taken into account that the working fluid does not work in the tension. Thus, the appearance of the zero pressure values may indicate the appearance of a vacuum in the cylinder cavity, which may cause the development of the cavitation processes.

Fig. 6, b, shows an oscillogram of the pressure fluctuations in the control hydraulic cylinder cavity, calculated with the offset  $\varepsilon$  value 3 mm. The increasing of the offset value causes the increasing of the maximum pressure in the cylinder cavity to 102,6 bar. The frequency of the pressure fluctuations remained unchanged and corresponding to the frequency of the oscillations of the moment of the pistons consolidated force to the swash plate. However, in this case, there is a periodic pressure drop to the zero value, which may mean the possibility of cavitation. The value of the average pressure is 51,3 bar.

With the offset  $\varepsilon$  equal to 5 mm, the average value of the pressure fluctuations in the control hydraulic cylinder cavity increases to 66 bar (Fig. 6, c). However, there is no pressure drop to the zero value, which indicates the elimination of the possibility of the cavitation processes during the control hydraulic cylinder operation.

Increasing of the offset  $\varepsilon$  value up to 7 mm, the average value of the pressure oscillations in the control hydraulic cylinder cavity (Fig. 6, d) increases to 75 bar. In this case, the maximum pressure also increases to 150 bar. Thus, increasing of the offset  $\varepsilon$  of the swash plate swivel axis to 7 mm does not cause a noticeable increasing of the static characteristics quality. Along with it, pressure increasing in the control hydraulic cylinder cavity causes the increasing of the volumetric losses during the operation of the LS regulator. It should be noted, that in the modern analogues of the PVC 1.85 pump, the volumetric losses in the pump supply control system should not exceed 2,5 – 3,5 l/min.

**Conclusions.** The simulation results indicate a significant effect of the variable displacement axial piston pumps PVC 1.85 parameters, such as the clearance in the spool pairs of the LS-regulator and the swash plate swivel axis offset corresponding to the cylinder block rotation axis on the static characteristics quality that determine the dependence of the working fluid supply on the pump outlet pressure.

The manufacture specifications for the spool pairs set the permissible values at which the clearance in the pairs can exceed 0,02 mm. In this work, the effect of these clearance dimensions on the stability of the static characteristics has been examined. The requirements for these clearance values do not allow fluctuations beyond  $\pm 4\%$ . It is recommended to set



the allowable clearance in the spool pairs in the range of 0,004-0,006 mm with a purpose to ensure the stability of the pump flow rate.

This research investigates the influence of the offset value of the swash plate swivel axis corresponding to the cylinder block rotation axis on the stability of the pump flow rate. The static characteristics of the pump have been calculated with the offset values of the swash plate swivel axis equal to 1 mm, 3 mm, 5 mm and 7 mm. The offset value incrementing of the swash plate swivel axis increased the stability of the pump flow rate, depending on the executive hydraulic actuator load. At the offset of the swash plate swivel axis corresponding to the cylinder block rotation axis equal to 5 mm and 7 mm, the deviation of the pump flow rate from the given one does not exceed 1,5 %. Along with it, as the offset value decreases to 1 mm and 3 mm, in the case of the pump PVC 1.85, the quality of the static characteristics deteriorates. The deviation of the pump static characteristics from the set values increases with the decreasing of the offset of the swash plate swivel axis and with the offset of 1 mm it can amount up to 30 %, which indicates the unsuitability of this design solution.

In the process of modeling of the variable displacement axial piston pump operation a comparative studying of the static characteristics, calculated by the different models describing the mechanism of the pistons consolidated force action formation to a swash plate, has been performed. In this research the authors used the models of the averaged forces of pistons, the point of application of which corresponds to the established offset of the swash plate swivel axis. In the second case, the authors consider a parametric changing of the magnitude of the pistons consolidated force and the coordinates of its application point. The comparison of the calculation results indicates a significant difference. So, if the offset values of the swash plate swivel axis are in the range of 5-7 mm, the results of the static characteristics calculations, considering different models of the action of the pistons consolidated force, was hardly distinguishable, then for the small values of the swash plate swivel axis offsets the differences were significant. For the offset of the swivel axis of 1 mm the pump flow rate deviation is about 3,5 % in the first model. Along with it, for the calculation taking into account the parametric changing of the pistons consolidated force the deviation of the static characteristic from the given one, approaches to the value of 30 % and it is close enough to the actual characteristics of the pump. According to this, the authors consider relevant to take into account the changes of the parametric dependences of the pump parameters when performing calculations on the choice of the variable displacement axial piston pumps parameters.

## Список літератури

1. Іванов М.І., Шаргородський С.А., Руткевич В.С. Підвищення експлуатаційної ефективності блочно-порційного вивантажувача консервованих кормів шляхом гідрофікації привода робочих органів. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2013. №1(39). С. 91–96.
2. Ivanov M.I., Rutkevych V.S., Kolisnyk O.M., Lisovoy I.O. Research of the influence of the parameters of the block-portion separator on the adjustment range of speed of operating elements. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57/1. P. 37–44.
3. Руткевич В.С. Адаптивний гідравлічний привод блочно-порційного відокремлювача консервованого корму. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. №4(99). С. 108–113.
4. Андренко П.Н., Лурье З.Я. Направления развития объемного гидропривода. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2016. №2(52). С.3–14.
5. Бондарь В.А. Принципы LS и LUDV в гидросистемах открытого контура. *Вісник СумДУ*. 2004. №12(58). С.41–45.
6. Галухин Н.А. Исследование влияния насыщения потока насоса на к.п.д. flow sharing гидропривода. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2014. №1(43). С. 55–63.
7. *Насосы аксиально-поршневые регулируемые для открытых гидросистем с LS-системой управления серии C1: Гидросила*. URL: <https://www.hydrasila.com/products/piston-engines/nasosu-aks-porshn.html>. (дата звернення: 1.03.2021).

8. Іванов М.І., Переяславський О.М., Шаргородський С.А. Статичні характеристики насосів типу PVC 1. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2018. №1(59). С. 79–92.
9. Башта Т.М., Зайченко І.З., Ермаков В.В., Хаймович Е.М. Объемные гидравлические приводы. Москва: Машиностроение, 1968. 628 с.
10. Іванов М.І., Переяславський О.М., Шаргородський С.А. Удосконалення системи керування нахилом люльки аксіального роторно-поршневого насоса типу PVC 1.63. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2015. №4(50). С. 68–73.

## References

1. Ivanov, M.I., Sharhorodskiy, S.A., & Rutkevych, V.S. (2013). Pidvyshchennia efektyvnosti blochno-portsiinoho vyvantazhuvacha konservovanykh kormiv shliakhom hidrofikatsii pryvoda robochikh orhaniv [Improving the operational efficiency of the block-batch unloader of canned fodder by hydration of the drive of working bodies.]. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka – Industrial hydraulics and pneumatics*. №1(39). 91-96 [in Ukrainian].
2. Ivanov, M.I., Rutkevych, V.S., Kolisnyk, O.M. & Lisovoy, I.O. (2019). Research of the influence of the parameters of the block-portion separator on the adjustment range of speed of operating elements. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Vol. 57/1. 37-44[in Romania].
3. Rutkevych, V.S. (2017). Adaptivnyi hidravlichnyi pryvod blochno-portsiinoho vidokremliuvacha konservovanoho kormu [Adaptive hydraulic drive block-portable of canned forage block-batch separator] *Vsukrainskyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – All-Ukrainian Scientific and Technical Journal. Engineering, power engineering, transport of agroindustrial complexes*. Vol. №4(99). 108–113 [in Ukraine].
4. Andrenko, P.N., & Lurie, Z.Ya. (2016). Napravleniia rozvittie obemnoho hidroprivoda [Directions of development of a volumetric hydraulic drive] *Promyslova hidravlika i pnevmatyka – Industrial hydraulics and pneumatics*. №2(52). 3-14 [in Ukrainian].
5. Bondar, V.A. (2004). Pryntsyipy LS i LUDV v hidrosistemakh otkrytoho kontura [LS and LUDV principles in open circuit hydraulic systems]. *Visnyk SumDU – Bulletin of Sumy State University*. №12(58), 41- 45[in Ukrainian].
6. Halukhin, N.A. (2014). Issledovanie vliianiie nasyshcheniia potoka nasosa na K.P.D. flow sharing hidroprivoda [Study of the effect of pump flow saturation on efficiency. flow sharing hydraulic drive] *Promyslova hidravlika i pnevmatyka – Industrial hydraulics and pneumatics*. №1(43). 55-63 [in Ukrainian].
7. Nasosy aksialno-porshnevye rehuriruemye dlia otkrytykh hidrosistem s LS-sistemoi upravleniia serii S1: Hidrosila. [www.hydrosila.com](https://www.hydrosila.com) Retrieved from <https://www.hydrosila.com/products/piston-engines/nasosu-aks-porshn.html> [in Ukrainian].
8. Ivanov, M.I., Pereiaslavskii, O.M. & Sharhorodskii, S.A. (2018). Statychni kharakterystyky nasosiv typu PVC 1 [Static characteristics of pumps in type PVC 1]. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka – Industrial hydraulics and pneumatics*. №1(59). 79-92 [in Ukrainian].
9. Bashta, T.M., Zaichenko, I.Z., Ermakov, V.V. & Khaimovych, E.M. (1968). *Obemnye hudravlicheskie privody [Volumetric hydraulic drives]*. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
10. Ivanov, M.I. Pereiaslavskii, O.M. & Sharhorodskii, S.A. (2015). Udoskonalennia systemy keruvannia nakhylom liulky aksialnoho rotornop-rshnevoho nasosa typu PVC 1.63. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka – Industrial hydraulics and pneumatics*. №4(50). 68-73 [in Ukrainian].

**С. А. Шаргородський**, доц., канд. техн. наук, **В. С. Руткевич**, доц., канд. техн. наук, **В. П. Закревський**, асист.

*Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна*

### **Моделювання робочих процесів регульованого АПН типу PVC 1.85 з урахуванням параметричних коливань**

В роботі представлені результати розрахунку двох математичних моделей регульованого аксіального роторно-поршневого насоса PVC 1.85. У перші математичні моделі використовувалося усереднене усиллення поршнів, точка прикладання якого відповідає зсуву осі повороту похилого диска. У другі математичні моделі враховувалися параметричні зміни величини зведеної сили поршнів і координати точки її застосування.

Порівняння результатів розрахунку в двох моделях показали їх істотне розходження. Так, якщо при зсувах осі повороту похилого диска на 5-7 мм результати розрахунку статичних характеристик з урахуванням різних моделей дії зведеної сили мало відрізняються, то для малих значень зміщення осі повороту похилого диска відмінності значні. Якщо для зміщення осі повороту в 1 мм по першій моделі

отримуємо похибку подачі насоса близько 3,5 %, то для розрахунку з урахуванням параметричної зміни зведеної сили поршнів відхилення статичної характеристики від заданої наближається до 30 %, що досить близько до реальних характеристик насоса. Тому, доцільно при виконанні розрахунків по вибору параметрів регульованих аксіальних роторно-поршневих насосів враховувати параметричні залежності зміни параметрів насоса.

Результати моделювання свідчать про істотний вплив таких параметрів регульованих аксіальних роторно-поршневих насосів типу PVC 1.85, як зазори в золотникових парах LS – регулятора і зміщення осі нахилу похилого диска щодо осі обертання блоку циліндрів на якість статичних характеристик, що визначають залежність подачі робочої рідини від тиску на виході насоса.

Технічними умовами на виготовлення золотникових пар встановлені допуски, при яких зазори в парах можуть перевищувати 0,02 мм. Виконано дослідження впливу величини зазначених зазорів на стабільність статичних характеристик. Рекомендовано для забезпечення стабільності подачі насоса встановити допустимі зазори в золотникових парах в межах 0,004-0,006 мм.

Досліджено вплив величини зміщення осі повороту похилого диска щодо осі обертання блоку циліндрів на стабільність подачі насоса. Проаналізовані статичні характеристики насоса розраховані при величинах зсуву осі повороту похилого диска на 1 мм, 3 мм, 5 мм і 7 мм. Встановлено, що збільшення зсуву осі повороту похилого диска підвищує стабільність подачі насоса в залежності від навантаження виконавчого гідродвигуна. При зсувах осі повороту похилого диска щодо осі обертання блоку циліндрів на 5 мм і 7 мм відхилення величини подачі насоса від заданої не перевищує 1,5 %. У той же час при зменшенні величини зміщення до значень 1 мм і 3 мм істотно в разі використання насоса PVC 1.85 погіршується якість статичних характеристик. Відхилення статичних характеристик насоса від заданих зростає при зменшенні зміщення осі повороту похилого диска і при зміщенні на 1 мм може досягати 30 %, що свідчить про непридатність даного конструктивного рішення.

**регульований аксіальний роторно-поршневий насос, статична характеристика, вісь повороту похилого диска, момент зведеної сили тиску поршнів, коливання тиску**

*Одержано (Received) 02.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 15.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).44-53](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).44-53)

**Ю.В. Кулешков**, проф., докт. техн. наук, **М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **Т.В. Руденко**, доц., канд. техн. наук, **Р.А. Осін**, доц., канд. техн. наук, **В. Д. Крошка**, магістрант

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: krasotamv@ukr.net*

## Зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів мікродуговим оксидуванням

У статті наведено результати аналізу можливості використання нового способу зміцнення робочих поверхонь деталей – мікродугового оксидування для підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей, виготовлених з алюмінієвих сплавів, зокрема корпусів шестеренних насосів типу НШ. У роботі викладена сутність процесу зміцнення деталей мікродуговим оксидуванням, представлені основні фізико-механічні характеристики зміцнюючого покриття. Відзначено, що міцність зчеплення і механічні властивості покриття багато в чому залежать від стану зміцнюючої поверхні, зокрема від методу попередньої обробки. При цьому встановлено, що зміцнюючі покриття металу після пластичного деформування мають більшу міцність зчеплення, більшу товщину і твердість. Представлені основні відомості про мікродугове оксидування, які на думку авторів будуть сприяти освоєнню маловивченого способу зміцнення в ремонтному виробництві.

**мікродугове оксидування, зміцнення алюмінієвих сплавів, пластичне деформування, міцність зчеплення, зносостійкість, мікротвердість покриття, металокераміка**

**Постановка проблеми.** Одним з найбільш розповсюджених насосів гідросистем, що знайшли своє використання на самій різноманітній техніці є шестеренний насос. Шестеренний насос відрізняється низькою собівартістю виготовлення та забезпечує необхідні технічні характеристики.

Шестеренні насоси працюють в умовах підвищеної запиленості, різких коливаннях температури повітря, високих тисків робочих рідин, що призводить до інтенсивного зношування деталей, зокрема, виготовлених з алюмінієвих сплавів. А тому відновлення і зміцнення деталей шестеренних насосів, виготовлених з алюмінієвих сплавів, є вельми актуальним задачею.

Відомо, що середній ресурс відремонтованих шестеренних насосів становить не більше 50% ресурсу нового насоса. А отже пошук нових технологічних рішень для відновлення і зміцнення зношених поверхонь шляхом підвищення зносостійкості з'єднань деталей насосів за рахунок поліпшення їх фізико-механічних властивостей є актуальною задачею ремонтного виробництва.

Ресурс шестеренних насосів значно менше міжремонтного ресурсу інших агрегатів гідросистеми через низьку зносостійкість робочих поверхонь деталей, що утворюють прецизійні пари тертя.

Однак, застосовувані в даний час технологічні процеси відновлення деталей, не завжди задовольняють сучасним вимогам, зокрема, багато хто з них не дозволяють зміцнювати робочі поверхні, що негативно позначається на ресурсі деталей.

Нами пропонується перспективний спосіб відновлення і зміцнення деталей з алюмінію і його сплавів, а саме мікродугове оксидування. Мікродугове оксидування доцільно використовувати в ремонтному виробництві, воно дозволяє отримувати зносостійкі покриття.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Корпус шестеренного насоса виготовляють з алюмінієвого сплаву АЛ 9. Зносостійкість корпусу бажає бути кращою, що є однією з причин недостатньої надійності шестеренного насоса. В процесі ремонту є можливість усунути цей недолік.

Існують декілька напрямків відновлення корпусів шестеренних насосів. Серед них наступні.

Відновлення корпусів шестеренних насосів типу методом збільшених ремонтних розмірів. Сам корпус відновлюється надзвичайно просто - розточуванням його до виведення слідів зношування під збільшений ремонтний розмір. Але зазначений спосіб потребує виготовлення шестерень і втулок ремонтного розміру, що нанівець зведе економічну доцільність способу

Відновлення корпусів шестеренних насосів методом нанесення полімерних матеріалів дозволяє знизити трудомісткість відновлення деталей на 20...30%, а собівартість ремонту - на 15...20%.

Низька теплопровідність полімерних композицій обмежують область їх застосування в ремонтному виробництві.

Основна перевага це:

- він є відносно простим і дешевим.

Основні недоліки:

- невисока механічна властивість, особливо при підвищених температурах;
- низька адгезія;
- схильність до втомному викришування;
- низька теплопровідність.

Відновлення корпусів шестеренних насосів постановою алюмінієвих або чавунних гільз полягає в наступному. Внутрішню поверхню колодязів розточують під збільшений розмір. На знежирені поверхні гільзи і корпусу наносять епоксидний клейовий склад і запресовують гільзу. Потім протягом 2 годин корпус висушують у сушильній шафі при температурі 180 ... 220°C. Основним недоліком даного способу є те, що він не доцільний при малому зношуванні деталі.

Основні недоліки способу:

- висока трудомісткість способу;
- поява двох кордонів на шляху відведення тепла з робочої зони є причиною підвищеної теплонапруженості відновленого корпусу;
- зниження жорсткості і міцності деталі, що може стати причиною спотворення форми деталі або навіть її руйнування;

Електролітичні антифрикційні та зносостійкі покриття широко застосовуються для відновлення зношених деталей і машин. Перспективними покриттями на основі цинку є сплави цинк-залізо, цинк-нікель і деякі інші. Сплав цинку з залізом за своїми фізико-механічними властивостями (теплопровідність, антифрикційних, зносостійкість) найбільш наближений до алюмінієвих сплавів. Разом з тим за деяких умов експлуатації (високі температури, циклічні навантаження і т.д.) потрібні більш зносостійкі покриття. Для цього застосовуються сплави цинку з нікелем.

Нанесенням вищевказаних гальванічних покриттів відновлюють колодязі шестеренних насосів. Слід зазначити, що покриття, нанесені електролітичними способами, характеризуються порівняно невисокою адгезією з основою і багатоопераційністю, а також значним забрудненням оточуючого середовища, що

потребує наявність спеціальних очисних споруд.

Таким чином, нанесення покриттів вище перерахованими способами далеко не завжди задовольняє тим вимогам, які пред'являються до матеріалів триботехнічного призначення.

Основними недоліками способу є:

- недостатня адгезія з основним металом;
- невисока міцність зчеплення;
- недостатня теплопровідність;
- дороге і складне устаткування.

Відновлення корпусів шестеренних насосів типу НШ способом дифузійної металізації. Спосіб дифузійної металізації полягає в термодифузійному насиченні цинком алюмінієвого сплаву. У результаті дифузії відбувається збільшення розміру деталі, при цьому її нагрівають до температури 550°C. Процес характеризується досить великою часовою протяжністю (близько 4-х годин).

До основних недоліків слід віднести:

- високу трудомісткість та енергоємність;
- необхідність застосування дорогого вакуумного обладнання;
- послаблення жорсткості і міцності деталі, що може стати причиною спотворення форми деталі або навіть її руйнування;
- недостатня теплопровідність відновленого корпусу.

На вищевказаних недоліків у ремонтному виробництві широкого застосування він не знайшов.

Відновлення корпусів шестеренних насосів способом пластичного деформування (обтисканням) набуло широкого поширення. Відновлення деталей способом пластичних деформацій засноване на використанні запасу міцності і пластичних властивостей матеріалу.

При відновленні корпусів пластичним деформуванням і подальшим розточенням отримують додаткові три ремонтних розміру по діаметру. При цьому зменшення міжцентрової відстані між колодязями дозволяє повністю компенсувати зменшення робочого об'єму насоса, що відбувається внаслідок зменшення розміру шестерень по зовнішньому діаметру.

Перевагою способу є:

- економічна ефективність, так як не потрібні ремонтні матеріали для відновлення;
- підвищення механічних властивостей матеріалу деталі;
- підвищення жорсткості корпусу за рахунок створення напруженб стискання;
- збільшення ресурсу роботи насоса в 1,6 рази при порівнянні з гільзованими корпусами і в 4 рази при використанні розчину з епоксидних смол.

На завершення слід відмітити, що жоден із згаданих методів відновлення корпусу шестеренного насоса не в змозі суттєво підвищити його зносостійкість.

Як зазначено раніше одним із суттєвих недоліків деталей, які виготовляються з алюмінієвих сплавів є їх низька зносостійкість. Це пояснюється низькою твердістю цих сплавів. В даний час не існує дієвих методів, що здатні суттєво підвищити зносостійкості робочих поверхонь, виготовлених із алюмінієвих сплавів.

Аналіз існуючих методів відновлення і зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів, зокрема корпуса шестеренного насоса дає підстави зробити наступні висновки. Існуючі способи відновлення алюмінієвих деталей шестеренних насосів не завжди забезпечують необхідну довговічність тертьових поверхонь. Крім того, застосування їх часто стримується складністю і високою вартістю необхідного обладнання і матеріалів.

Перспективним способом, що дозволяє значно збільшити зносостійкість

алюмінієвих деталей, є мікродугового оксидування. Однак він недостатньо вивчений і широкого практичного досвіду його застосування для відновлення і зміцнення деталей з ливарних алюмінієвих сплавів немає.

**Постановка завдання.** Метою досліджень є проведення аналізу науково-технічної інформації, щодо визначення можливості зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів мікродуговим оксидуванням, зокрема корпусів шестеренних насосів.

**Викладення основного матеріалу.** Одним з методів відновлення в зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів є метод МДО - мікродугове оксидування .

Відновлення і зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів МДО полягає в тому, що на алюмінієву деталь, розташовану в електролітичній ванні через спеціальний джерело живлення подається струм, що призводить до утворення на поверхні деталі мікроплазмових розрядів, під впливом яких поверхневий шар деталі перетворюється на оксид алюмінію. На поверхні деталі утворюється міцний шар кераміки завтовшки до 300 мкм [1 -8].

Фізична сутність методу МДО полягає в тому, що при пропусканні струму великої щільності через границю розділу метал-електроліт створюються умови, коли напруженість на границі розділу стає вище її діелектричної міцності і на поверхні електрода виникають мікроплазменні розряди з високими локальними температурами і тисками. Мікроплазмові розряди між електродом і деталлю формують шар покриття, що складається з оксиду металу основи і складових електроліту. Залежно від режиму мікроплазмового оксидування і складу електроліта можна отримувати керамічні покриття товщиною до 300 мкм з унікальними характеристиками зносостійкості і широким спектром застосування [1 – 8].

До основних переваг МДО відносяться [1, 4, 9, 10]:

- можливість створення надміцних покриттів з унікальними характеристиками;
- отримання кількох захисних характеристик в комплексі;
- можливість обробки деталей із складним профілем;
- немає необхідності в спеціальній підготовці поверхні перед нанесенням покриття і механічній обробці після нанесення покриття;
- регулювання швидкості процесу в широкому діапазоні;
- отримання різних покриттів на одному матеріалі.
- дешевизна і доступність хімічних реактивів;
- отримання багатофункціональних покриттів заданого складу, структури і товщини;
- нанесення покриттів, однорідних за якістю і товщині, як на зовнішні, так і на внутрішні поверхні деталей будь-якої форми;
- екологічність процесу, що виражається у відсутності токсичних хімічних компонентів і спеціальних очисних споруд для відпрацьованих електролітів.

В залежності від хімічного складу сплаву, режимів МДО та компонентів електроліту на деталях з алюмінієвих сплавів формуються складні по фазовим складом покриття, що включають в себе високотемпературні модифікації  $\alpha$   $\gamma$  оксидів  $Al_2O_3$ , фази муллита і інші складні сполуки в перехідному шарі між покриттям і металом. Такі покриття, сформовані з лужного електроліту, можна розглядати як композиційні, в яких оксиди  $\alpha$  -  $Al_2O_3$  є зміцнюючою фазою. Мікротвердість таких покриттів досягає 20...25 Гпа, що зіставно з твердістю абразивних часток [3 - 16].

Покриття, нанесені способом МДО, володіють високими теплоізоляційними властивостями і стійкі до теплового удару. Вони можуть бути використані в якості жаростійких і теплозахисних. Міцність зчеплення з основою покриттів, одержаних способом МДО, досягає 350 МПа. Це, безумовно, дає можливість застосовувати їх при

великих контактних навантаженнях. Окрім того, зносостійкість зазначених покриттів, порівнянна з зносостійкістю матеріалів на основі карбиду вольфраму.

Але в ремонтному виробництві вищевказаний спосіб широкого поширення не отримав, що пояснюється недостатнім вивченням способу, особливо стосовно до відновлення і зміцнення ливарних алюмінієвих сплавів, відсутність технологічних рекомендацій для відновлення конкретних деталей, тощо.

Одним з основних напрямків досліджень є обґрунтування вибору складу електроліту та режимів нанесення покриття за допомогою МДО, що пояснюється тим, що робочим середовищем, для одержання покриттів МДО є спеціальний електроліт.

При виборі виду і складу електроліту для відновлення і зміцнення алюмінієвих деталей шестеренних насосів необхідно враховувати, що в умовах ремонтних підприємств до електролітів пред'являються наступні вимоги [1 - 10]:

- електроліт повинен забезпечувати можливість отримання на деталях покриттів з високими фізико-хімічними властивостями;
- властивості отриманих покриттів повинні знаходитися в суворій відповідності з заданими режимами електролізу і регулюватися ними в широких межах;
- отримання покриття повинна бути максимально продуктивною;
- електроліт повинен бути простим за складом, надійним в експлуатації та екологічно безпечним;
- матеріали, що застосовують для приготування електроліту повинні бути дешевими і недефіцитними;
- способи контролю і коректування електроліту повинні бути прості і доступні для ремонтних підприємств.

Електроліти для МДО діляться на чотири основні групи [1 - 10]:

- розчини, в яких зміцнений шар утворюється за рахунок окислення металу (розчини кислот і лугів);
- розчини, в яких покриття створюється за рахунок аніонів електроліту (розчини рідкого скла);
- розчини, в яких покриття формується за рахунок окислення металу і за рахунок аніонів електроліту (суміші розчинів першого і другого типів);
- розчини, які містять дрібнодисперсні частинки.

В електролітах першої групи покриття формується переважно завдяки окисленню алюмінію. В електролітах другої і третьої груп відбувається не тільки окислення алюмінію, а й включення до складу покриття речовини з електроліту. В електролітах четвертої групи покриття формується в основному з матеріалу, який є в них у вигляді суспензії [9 - 16].

Завдяки тому, що процес ведуть в умовах іскрового розряду на поверхні окисленої деталі при локальних температурах в зоні реакції 700...750°C, композиційні добавки, що знаходяться в електроліті у вигляді порошків, сплавляються з іншими компонентами покриття. Це дозволяє створити міцне керамічне покриття, модифіковане необхідними включеннями.

Застосування електролітів з включеннями оксиду алюмінію, оксиду титану та інших матеріалів, введених до складу електроліту, дозволяє формувати покриття з наперед заданими характеристиками, що істотно розширює можливість отримання покриттів з різними функціональними властивостями.

У промисловості найбільше застосування отримали електроліти першої групи. Одним з найпростіших і визнаних електролітів цієї групи став розчин, що містить КОН 2...8 г/л, який дає можливість отримувати якісні керамічні покриття на алюмінієвих сплавах. З цією ж метою можуть використовуватися розчини деяких кислот (сірчана, фосфорна, щавлева, лимонна і ін.), серед яких найбільшого поширення набула сірчана



кислота. Слід зазначити, що сірчана кислота, як і інші, придатна лише в концентрованому вигляді, так як розбавлена кислота не здатна пасивувати алюміній, що є вирішальним фактором при веденні МДО.

Склади декількох найбільш поширених електролітів, що використовуються при МДО, і зразкове призначення одержуваних керамічних покриттів представлені в табл.1.

Таблиця 1 – Склад електролітів і зразкове призначення формованих у них покриттів при МДО

Склад електроліту, г/л Н <sub>2</sub> O	Товщина покриття, мкм	Призначення покриття
1. Гідрооксид калію – 2...8	50...100	Підвищення зносостійкості, захист від корозії
2. Натрієве рідке скло - 180 ... 200, гідрооксид калію - 75 ... 84	300...500	Захист від термічного впливу
3. Натрієве рідке скло - 20 ... 60	100...150	Підвищення зносостійкості, захист від корозії
4. Гідроксид натрію - 15 ... 30 5. Натрієве рідке скло - 80 ... 120, оксид алюмінію - 10 ... 20	25...200	Захист від термічного впливу
6. Гідроксид калію - 2 ... 3, натрієве рідке скло - 8 ... 10, пероксид водню - 2,5 ... 10	150...200	Підвищення зносостійкості
7. Алюмінат натрію - 25 ...50	200...300	Захист від корозії і термічного впливу
8. Натрій фосфорно-молібденово-кислий - 10 ... 100	5...20	Захист від корозії
9. Концентрована сірчана кислота	15...50	Зміцнення, захист від корозії

*Джерело: розроблено авторами на підставі [1 - 10]*

При використанні електролітів першої групи геометричні розміри оброблюваних деталей змінюються незначно. Зміцнююче покриття формується з внутрішньої сторони. У цьому випадку покриття заглиблюється в метал, а зовнішній дійсний розмір деталі змінюється в межах 10% від товщини сформованої плівки на величину зовнішнього шару покриття, який при подальшій фінішній механічній обробці повністю вилучається [1, 4, 9, 10].

Особливий інтерес представляють електроліти 2-ий і 3-ей груп, здатні утворювати покриття за рахунок катіонів розчину. До даних електролітів можна віднести розчини силікатів лужних металів.

Проведені нами попередні дослідження з оксидуванню алюмінієвих ливарних сплавів в електроліті, що містить силікат натрію, показали, що електроліз розчинів рідкого скла призводить до формування товстошарові покриттів (до 0,5 мм). Однак покриттям, отриманим у вищевказаному електроліті, властива низька адгезія і зносостійкість.

З вищевказаного бачимо, що якість зміцнюючих покриттів можна суттєво покращити, якщо інтегрувати електроліти, що належать до різних груп. Однією з таких комбінацій електролітів є електроліт типу «KOH – Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>».

Концентрація KOH буде впливати на травну здатність електроліту, що дозволить сформувати зміцнений шар всередину оксидованої поверхні щодо номінального розміру деталі і збільшити адгезію покриттів. Введення ж рідкого скла дозволить

формувати покриття за рахунок його компонентів, що в кінцевому підсумку призведе до можливості не тільки зміцнення, а й отримання достатньої товщини покриття для відновлення алюмінієвої деталі.

Використання електролітів типу «KOH – Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>», дасть можливість не тільки зміцнювати алюмінієві деталі при МДО, але й відновлювати їх розміри за рахунок компонентів електроліту.

В залежності від хімічного складу сплаву, режимів МДО і додаткових компонентів електроліту на деталях з алюмінієвих сплавів формуються складні по фазовому складу покриття, що включають в себе високотемпературні модифікації оксидів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Такі покриття, сформовані з лужного електроліту, можна розглядати як композиційні, в яких оксиди Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> є зміцнюючою фазою. Мікротвердість таких покриттів досягає 20...25 ГПа [3 - 16].

Таким чином, на деталях, оброблених МДО утворюються покриття, які являють собою кераміку складного складу, що утворюється за рахунок окислення поверхні металу. Товщину покриття можна регулювати за рахунок включення до його складу елементів з електроліту. Слід відмітити, що технологія МДО при необхідності дозволяє ввести в покриття будь-який потрібний хімічний елемент.

Ряд авторів [3, 14 - 17] також вказують на те, що оксидне покриття, отримане МДО, по суті, представляє з себе композиційний матеріал, який поєднує в собі доволі пластичну матрицю, що складається з твердого розчину муллита 3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> • 2SiO<sub>2</sub> із незначною кількістю γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і складнооксидних сполук елементів основи із зміцнюючою фазою α - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 65%), яка, головним чином, і забезпечує високу зносостійкість покриттів.

Твердість покриттів, отриманих мікродуговим оксидуванням досягає 21 ГПа. Вимірювання твердості проводили за допомогою приладу Nano Hardness Tester, при нарузке на індентор - 200 Н. Твердість покриттів розраховували виходячи із глибини проникнення індентора [6, 8, 13, 14, 21, 22].

У роботах [18 - 20] зазначено, що зносостійкість покриттів, сформованих способом МДО, не поступається зносостійкістю композиційних матеріалів на основі карбідів вольфраму, що традиційно застосовуються проти абразивного зношування матеріалів.

Чим більше часу проводити обробку деталі, тим більше елементів з електроліту накопичується в поверхневому шарі. Нижній шар покриття, що прилягає до металу-основи, складається переважно з його оксидних сполук.

Товщина покриттів визначається декількома основними чинниками. Це природа електроліту, матеріал сплаву металу, режим обробки і час процесу. Мікродугове оксидування дозволяє отримувати покриття різної товщини від 1 мкм до 500 мкм.

Необхідна товщина покриття залежить від призначення і умов експлуатації. Для нанесення підшару під фарбування досить 5-10 мкм, для додання електроізоляційних властивостей або високої зносостійкості необхідно 50...100 мкм. Декоративні властивості та антикорозійні властивості в атмосферних умовах забезпечують 20...40 мкм покриття.

Покриття, що були отримані МДО можуть бути використані як зносостійкі покриття в різних вузлах і агрегатах машин і механізмів. Зокрема використовувати деталі з алюмінієвих сплавів в якості з'єднань, що підлягають зношуванню.

Таким чином, проведені порівняльні дослідження зносостійкості дозволили встановити, що покриття, отримані мікродуговим оксидуванням, мають високу зносостійкість. Отже, можна зробити висновок, що керамічні покриття, отримані МДО можуть бути рекомендовані для відновлення і зміцнення алюмінієвих деталей шестеренних насосів, зокрема корпусу насоса.

### Висновки.

1. Фізико-механічні властивості покриттів, отриманих на деталях з алюмінієвих сплавів, дозволять значно збільшити їх зносостійкість, а, отже, довговічність і є перспективним напрямком розвитку ремонтного виробництва в сучасних умовах.

2. Зношування пар тертя з покриттями, сформованими при використанні раціонального складу електроліту і раціональних режимах МДО при сполученні «корпус-шестерня», в 2,5 рази вище, ніж у аналогічних без покриттів, прийнятих за еталон порівняння.

3. На підставі проведених досліджень розроблено технологічний процес зміцнення МДО корпусу і втулок насосів типу НШ.

### Список літератури

1. Николаев А.В., Марков Г.А., Пещевский В.И. Новое явление в электролизе. *Изв. СО АН СССР. Серия "Химические науки"*. 1977. Вып. 5, № 12. С. 32-34.
2. Яковлев С.Я., Кравецкий Г.Л., Другов П.Н. Микродуговой электролиз на угольных материалах. *Вестник МВТУ им. Баумана. Серия "Машиностроение"*. 1992. С. 25-34.
3. Павлюс С.Г., Соборнитский В.Я., Шепрут Ю.А. Диэлектрические свойства анодно-искровых силикатных покрытий на алюминии. *Электронная обработка материалов*. 1987. № 3. С. 34-36.
4. Микродуговое оксидирование. / Марков Г.А., Белеванцев В.И., Терлеева О.П., Шулейко Е.К., Слонова А.И. *Вестник МВТУ им. Баумана. Серия "Машиностроение"*. 1992. № 1. С. 34- 56.
5. Батищев А.Н., Новиков А.Н., Кузнецов Ю.А. Восстановление алюминиевых деталей сельскохозяйственной техники микродуговым оксидированием. *Инженерно-техническое обеспечение АПК*. 1996. № 4. С. 18-19.
6. Черненко В.И., Снежко Л.А., Потапова И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Москва: Химия, 1991. 128 с.
7. Снежко Л.А., Черненко В.И. Энергетические параметры процесса получения оксидных покрытий на алюминии в режиме искрового разряда. *Электронная обработка материалов*. 1983. № 2. С. 25-28.
8. Ван Тран Бао и др. Механизм анодного искрового осаждения металлов. *Реферативный журнал "Химия"*. 1978. № 1. С. 41.
9. Снежко Л.А., Удовиченко Ю.В., Тихая Л.С. Свойства анодно-искровых покрытий, сформированных на сплавах алюминия из щелочных электролитов. *Физика и химия обработки материалов*. 1989. № 3. С. 93-96.
10. Федоров В.А. Модифицирование микродуговым оксидированием поверхностного слоя деталей. *Сварочное производство*. 1992. № 8. С. 29-30.
11. Каракозов Э.С., Чавдаров А. В., Барыкин Н.В. Микродуговое оксидирование - перспективный процесс получения керамических покрытий. *Сварочное производство*. 1993. № 6. С. 4-7.
12. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием. / Новиков А.Н., Батищев А.Н., Кузнецов Ю.А., Коломейченко А.В. Орел: Орел ГАУ, 2001. 99 с.
13. Казанцев И.А., Чуфистов О.Е., Голованова Н.В., Уткин А.А., Симцов В.В. Влияние микродугового оксидирования на фазовый состав и свойства покрытий алюминия. *Мат. 4-го собрания металловедов России*. Ч. I. Пенза: Приволжский Дом знаний, 1998. С. 105-107.
14. Кузнецов Ю.А. Износостойкость покрытий при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов. *Использование научного потенциала вузов в решении проблем научного обеспечения АПК в России: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* ОрелГАУ, 2001. С. 229-230.
15. Новиков А.Н. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники из алюминиевых сплавов электрохимическими способами. Орел: ОрелГАУ, 2001. 233 с.
16. Федоров В.А., Великосельская Н.Д. Влияние микродугового оксидирования на износостойкость алюминиевых сплавов. *Трение и износ*. 1989. Т. 10, №3. С. 521-524.
17. Снежко Л.А. Импульсный режим для получения силикатных покрытий в искровом разряде. *Защита металлов*. 1988. Т. 16, № 3. С. 365.
18. Малышев В.Н., Булычев С.Н., Марков Г.А. Физико-механические характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования. *Физика и химия обработки материалов*. 1985. № 1. С. 82-87.

19. Федоров В.А., Великосельская Н.Д. Взаимосвязь фазового состава и свойств упрочненного слоя, получаемого при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1991. №3. С. 29-30.
20. Петросянц А.А., Малышев В.Н., Федоров В.А., Марков Г.А. Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования. *Трение и износ*. 1984. Т. 5, № 2. С. 350-354.
21. Кузнецов Ю.А., Коровин А.Я. Восстановление деталей газотермическими покрытиями с последующим упрочнением микродуговым оксидированием. *Развитие села и социальная политика в условиях рыночной экономики: материалы Междунар. научн.-практ. конф., посвященной 70-летию МГАУ*. Москва: МГАУ им. В.П. Горячкина. 2001. Ч. 1. С. 143-144.
22. Коровин А.Я. Технология восстановления и упрочнения деталей гидравлических шестеренных насосов типа НШ-У микродуговым оксидированием: дис. ... канд. техн. наук. / Орловский гос. аграрный ун-т. Орел, 2003. 137 с.

## References

1. Nikolaev, A.B., Markov, G.A. & Peshevickiy, B.I. (1977). Noye yavlenie v elektrolize [A new phenomenon in electrolysis]. *Izv. CO AN SSSR. Seriy "Himicheskie nauki" – Izv. Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Series "Chemical Sciences". Vol. 5, № 12.* 32-34. [in Russian].
2. Yakovlev, S.Y., Kraveckiy, G.L. & Drugov, P.N. (1992). Mikrodugovoy elektroliz na ugolnykh materialakh [Microarc electrolysis on coal materials]. *Vestnik MVTU im. Baumana. Seriy "Mashinostroenie" – Vestnik MVTU im. Bauman. Series "Mechanical Engineering".* 25-34. [in Russian].
3. Pavlus, S.G., Sobornitskiy, V.Y. & Sheprut, U.A. (1987). Dielektricheskie svoystva anodno-iskrovnykh silikatnykh pokrytiy na aluminii [Dielectric properties of anode-spark silicate coatings on aluminum]. *Elektronnyy obrabotka materialov – Electronic material processing.* № 3. 34-36. [in Russian].
4. Markov, G.A., Belevancev, V.I., Terleeva, O.P., Shuleyko, E.K. & Slonova, A.I. (1992). Mikrodugovoe oksidirovanie [Microarc oxidation]. *Vestnik MVTU im. Baumana. Seriy "Mashinostroenie" – Vestnik MVTU im. Bauman. Series "Mechanical Engineering".* № 1. 34- 56. [in Russian].
5. Batischev, A.N., Novikov, A.N. & Kuznecov, U.A. (1996). Vosstanovlenie aluminievykh detaley sel'skohozyustvennoy tehniky mikrodugovym oksidirovaniem [Restoration of aluminum parts of agricultural machinery by micro-arc oxidation]. *Inzhenerno-tehnicheskoe obespechenie APK – Engineering and technical support of the AIC.* № 4. 18-19 [in Russian].
6. Chernenko, V.I., Snezhko, L.A. & Potapova, I.I. (1991). *Poluchenie pokrytiy anodno-iskrovum elektrolizom [Preparation of coatings by anode-spark electrolysis]*. Moscow: Himiy [in Russian].
7. Snezhko, L.A. & Chernenko, V.I. (1983). Energeticheskie parametry processa polucheniya oksidnykh pokrytiy na aluminii v rezhime iskrovogo razryada [Energy parameters of the process of obtaining oxide coatings on aluminum in the spark discharge mode]. *Elektronnyy obrabotka materialov – Electronic material processing.* № 2. 25-28. [in Russian].
8. Van Tran Bao. (1978). Mehanizm anodnogo iskrovogo osazhdeniya metallov [Mechanism of anodic spark deposition of metals]. *Referativnyy zhurnal "Himiy" – Abstract journal "Chemistry".* № 1. 41 [in Russian].
9. Snezhko, L.A., Udovichenko, U.B. & Tihaya, L.S. (1989). Svoystva anodno-iskrovnykh pokrytiy sformirovannykh na splavakh aluminiiy shelochnykh elektrolitov [Properties of anode-spark coatings formed on aluminum alloys from alkaline electrolytes]. *Fizika i himiy obrabotki materialov – Physics and Chemistry of Material Processing.* № 3. 93-96. [in Russian].
10. Fedorov, V.A. (1992). Modificirovanie mikrodugovym oksidirovaniem poverhnostnogo sloya detaley [Modification of the surface layer of parts by microarc oxidation]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production.* № 8. 29-30. [in Russian].
11. Karakozov, E.S., Chavdarov, A.B. & Barukin, N.V. (1993). Mikrodugovoe oksidirovanie – perspektivnyy process polucheniya keramicheskikh pokrytiy [Microarc oxidation - a promising process for obtaining ceramic coatings]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production.* № 6. 4-7. [in Russian].
12. Novikov, A.N., Batischev, A.N., Kuznecov, U.A. & Kolomeychenko, A.V. (2001). Vosstanovlenie i uprochnenie detaley iz aluminievykh splavov mikrodugovym oksidirovaniem [Recovery and strengthening of aluminum alloy parts by micro-arc oxidation]. Orel: Orel GAU [in Russian].
13. Kazancev, I.A., Chufistov, O.E., Golovanova, N.V., Utkin, A.A. & Simcov, V.V. (1998). Vliyanie mikrodugovogo oksidirovaniya na fazovyy sostav i svoystva pokrytiy aluminiiy [Effect of microarc oxidation on the phase composition and properties of aluminum coatings]. *Mat. 4 sobraniya metalloedov Rossii. Ch. I.* - Penza: Privolzhskiy dom znaniy. P.105-107. [in Russian].
14. Kuznecov, U.A. (2001). Iznosostoykost pokrytiy pri mikrodugovom oksidirovanii aluminievykh splavov [Wear resistance of coatings during microarc oxidation of aluminum alloys]. *Ispolzovanie nauchnogo*

- potenciala vuzov v reshenii problem nauchnogo obespecheniya APK v Rossii: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Orel GAU, P. 229-230. [in Russian].*
15. Novikov, A.N. (2001). *Tehnologicheskie osnovy vosstanovleniya i uprochneniya detaley selskohozyastvennoy tehniky iz aluminievuh splavov elektrohimičeskimi sposobami [Technological bases of restoration and strengthening of agricultural machinery parts from aluminum alloys by electrochemical methods]. Orel: Orel GAU [in Russian].*
  16. Fedorov, V.A. & Velikoselskaya, N.D. (1989). Vliyanie mikrodogovogo oksidirovaniya na iznosostoykost aluminievuh splavov [Effect of microarc oxidation on the wear resistance of aluminum alloys]. *Trenie i iznos – Friction and wear. Vol. 10, №3. 521-524. [in Russian].*
  17. Snezhko, L.A. (1988). Impulsnuy rezhim dlya polucheniya silikatnih pokrutiy v iskrovom razryde [Pulse mode for obtaining silicate coatings in a spark discharge]. *Zashita metallov – Protection of metals. Vol. 16, № 3.365. [in Russian].*
  18. Malushev, V.N., Buluchev, S.N. & Markov, G.A. (1985). Fiziko-mehanicheskie harakteristike i iznosostoykost pokrutiy, nanesennuh metodom mikrodogovogo oksidirovaniya [Physico-mechanical properties and wear resistance of coatings deposited by the method of micro-arc oxidation]. *Fizika i himiya obrabotke materialov – Physics and Chemistry of Material Processing. № 1. 82-87. [in Russian].*
  19. Fedorov, V.A. & Velikoselskaya, N.D. (1991). Vzaimosvyaz fazovogo sostava i svoustv uprochnennogo sloya, poluchaemogo pri mikrodogovom oksidirovanii aluminievuh splavov [The relationship between the phase composition and properties of the hardened layer obtained by microarc oxidation of aluminum alloys]. *Himičeskoe i nefyanoє mashinostroenie – Chemical and petroleum engineering. №3. 29-30. [in Russian].*
  20. Petrosyanc, A.A., Malushev, V.N., Fedorov, V.A. & Markov, G.A. (1984). Kinetika iznashivaniya pokrutiy, nanesennuh metodom mikrodogovogo oksidirovaniya [The kinetics of wear of the coatings deposited by the method of micro-arc oxidation]. *Trenie i iznos – Friction and wear. Vol. 5, № 2. 350-354 [in Russian].*
  21. Kuznecov, U.A. Korovin, A.Y. (2001). Vosstanovlenie detaley gazotermicheskimy pokrutiyami s posleduyshim mikrodogovom oksidirovaniiem [Restoration of parts by gas-thermal coatings with subsequent hardening by micro-arc oxidation]. *Razvitie sela i socialnaya politika v usloviyah rinochnoy ekonomiki: Materialu mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii posveshennoy 70-leiyu MGAU. Moskova: MGAU im. V.P. Gorychkina. Issue. 1. 143-144. [in Russian].*
  22. Korovin, A.Y. (2003). Tehnologiya vosstanovleniya i uprochneniya detaley gidravlicheskih shesterennuh nasosov tipa NSh mikrodogovom oksidirovaniiem [Technology of restoration and strengthening of parts of hydraulic gear pumps of the NSh-U type by micro-arc oxidation]. *Candidate's thesis. Orlovskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet. Orel [in Russian].*

**Yuriy Kuleshkov**, Prof., Dsc., **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **V. Kroshka**, master  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Strengthening of Aluminum Alloy Parts by Micro-Arc Oxidation**

The purpose of the research is to analyze the scientific and technical information to determine the possibility of strengthening the parts of aluminum alloys by microarc oxidation, in particular gear pump housings.

The article presents the results of the analysis of possibility of using a new method of hardening robocznych surfaces - micro-arc oxidation to enhance the wear resistance of working surfaces of parts made of aluminum alloys, in particular housings, gear pumps NSH. The paper describes the essence of the process of hardening parts by microarc oxidation, presents the main physical and mechanical characteristics of the hardening coating. It is noted that the adhesion strength and mechanical properties of the coating largely depend on the state of the surface to be strengthened, in particular, on the method of pretreatment. At the same time, it was found that the strengthening coating of the metal after plastic deformation has a greater adhesion strength, greater thickness and hardness. The paper presents the basic information about microarc oxidation, which, according to the authors, will contribute to the development of the method in the poorly studied method of hardening in repair production.

It can be concluded that the ceramic coatings obtained by microarc oxidation can be recommended for the restoration and strengthening of aluminum parts of gear pumps, in particular the pump housing.

**microarc oxidation, hardening of aluminum alloys, plastic deformation, adhesion strength, wear resistance, microhardness of the coating, cermet**

*Одержано (Received) 24.01.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 05.02.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 620.186 (075)

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).54-62](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).54-62)

Ю.В. Кулешков, проф., д-р техн. наук, М.В. Красота, доц., канд. тнхн. наук,  
Т.В. Руденко, доц., канд. тнхн. наук, Р. А. Осін, доц., канд. тнхн. наук, В.Г. Рева,  
магістрант

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький,  
Україна

e-mail: kul090455@gmail.com; krasotamv@ukr.net; r-t-v@mail.ua; ruslan\_osin@ukr.net

## Відновлення поршневих пальців гарячим пластичним деформуванням

Одним з перспективних методів відновлення поршневих пальців шатунно – поршневої групи двигунів внутрішнього згорання є метод гарячої пластичної деформації. Процес відновлення поршневих пальців гарячим пластичним деформуванням дозволяє підвищити їх міцність і, зокрема втомну міцність. При розробці технологічного процесу відновлення поршневих пальців із використанням методу гарячої пластичної деформації шляхом його роздачі пуансоном в штампі виникає задача визначення зусилля, яке необхідно для якісного проведення процесу деформації. У статті пропонуються теоретичні основи розрахунку зусиль деформації. Результат був отриманий на основі обраної схеми формоутворення.  
**гаряче пластичне деформування, пуансон, зусилля деформації**

**Постановка проблеми.** Поршневий палець (рис. 1) призначений для шарнірного з'єднання поршня з шатуном і в процесі роботи підлягає впливу великих зовнішніх навантажень, змінних за величиною та напрямком. Матеріалом для виготовлення поршневих пальців тракторних дизелів служить переважно хромонікелева сталь марки 12ХНЗА, яка має наступний хімічний склад: С (карбон) – від 0,09 до 0,16%; Si (силіцій) – від 0,17 до 0,37%; Mn (манган) – від 0,30 до 0,60%; Ni (нікель) – від 2,75 до 3,5%; S (сірка) – від 0,025 до 0,030%; P (фосфор) – 0,025%; Cr (хром) – від 0,06 до 0,90%; інші -  $\leq 0,2\%$ .

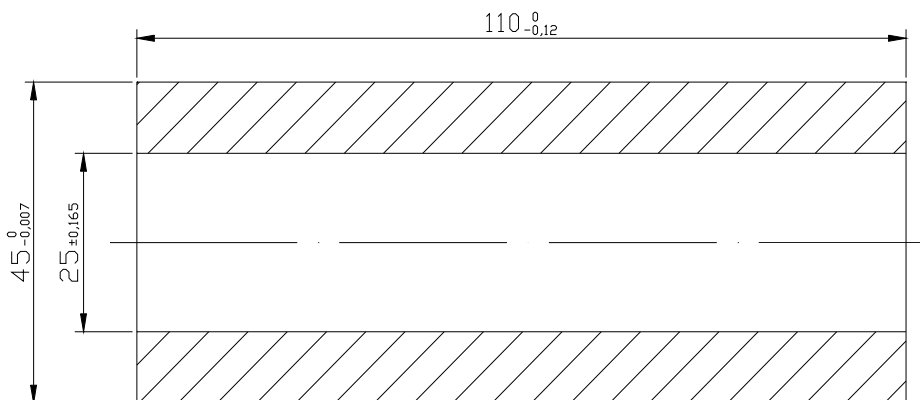


Рисунок 1 – Поршневий палець двигуна СМД-60

Джерело: розроблено авторами

Хімічні елементи, що входять до складу даної сталі сприяють забезпеченню її в'язкості і дозволяють отримувати заготовку деталі методами пластичного деформування.

© Ю.В. Кулешков, М.В. Красота, Т.В. Руденко, Р.А. Осін, В.Г. Рева, 2021

Зовнішня поверхня поршневого пальця підлягає цементації, після чого здійснюється загартовування. Твердість робочої поверхні складає HRC від 56 до 62, а серцевини HRC від 35 до 45.

Мікроструктура цементованого шару повинна складатися з дрібногольчатого мартенситу — до четвертого балу, в котрому допускаються рівномірно розподілені включення цементиту, залишкового аустеніту та троститу, також можливі окремі включення фериту. Під час виготовлення поршневих пальців з метою зменшення утримання залишкового аустеніту виконують обробку деталі холодом: охолодження й витримка деталей при температурах від мінус 50 до мінус 70°C. Високий рівень вимог до поршневих пальців зумовлений великим навантаженням деталей циліндро-поршневої групи. Навантаження на злом до появи тріщин складає для різних типорозмірів пальців від 18 до 70 тон.

Підвищення надійності роботи двигунів внутрішнього згорання можливо за рахунок систематичного та високоякісного проведення діагностичних заходів та своєчасного та якісного ремонту. Одним з резервів підвищення ефективності використання техніки та економії матеріальних, паливно-енергетичних і трудових ресурсів є відновлення зношених деталей під час ремонту техніки..

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Нами було проведено обстеження технічного стану поршневих пальців, о надійшли в ремонт. При цьому було встановлено, що товщина стінки поршневих пальців які поступають на відновлення знаходиться в межах від 9 до 10,5 мм, а більшість поршневих пальців мають розмір такий, що для їх відновлення необхідне збільшення зовнішнього діаметру поршневого пальця на величину до 0,30 мм.

Виділяють наступні схеми технологічних процесів відновлення поршневих пальців.

Механічна обробка під зменшений ремонтний розмір. На перший погляд є економічно доцільною, але для його реалізації необхідно мати шатуни і поршні відповідного ремонтного розміру.

Нарощування діаметру нанесенням додаткового шару матеріалу та наступна механічна обробка в номінальний розмір. До цих методів слід віднести гальванічні методи осаджування хрому та остальювання, контактне наварювання стрічки, плазмове нанесення порошкових матеріалів, гідротермічна роздача, тощо.

Аналізуючи вище перелічені методи відновлення поршневих пальців приходимо до висновку, що виникненням під час відновлення пальців внутрішніх напружень розтягування призводять до суттєвого зниження втомної міцності деталі

Існує і ще один напрямок нарощування діаметру за рахунок товщини стінок за допомогою пластичного деформування з наступною механічною обробкою в номінальний розмір. При цьому виділяють холодний та високотемпературний режим обробки. До першої підгрупи відносяться прошивка, протяжка та електрогідравлічний удар. Роздача поршневих пальців в перших двох випадках відбувається за рахунок силової дії пуансону або протяжки. В третьому випадку силова, дія, яка викликає деформацію, утворюється за рахунок тиску рідини при електродуговому розряді та носить характер удару.

Другу підгрупу складають методи, при яких роздачі підлягають розігріті поршневі пальці. Гаряча прошивка являє собою продавлювання пуансона через деталь, попередньо нагріту до високих температур.

Відновлення деталей пластичним деформуванням засновано на використанні запасу металу деталі і його пластичних властивостей.

З вищенаведеного бачимо, що відновлення поршневих пальців може бути

досягнута багатьма способами, але спосіб гарячого пластичного деформування [1 - 7]. має ряд переваг перед іншими методами, а саме:

- можливість відновлення всіх зношених поверхонь одночасно;
- можливість відновлення тільки за рахунок перерозподілу власного матеріалу пальця;
- можливість створення внутрішніх напруг стискання, що сприяє зміцненню матеріалу поршневого пальця;
- можливість «заліковування» мікротріщин;
- нагрівання пальця до температури 1150...1200<sup>0</sup>С з подальшим пластичним деформуванням веде до подрібнення зерна, що сприяє зміцненню матеріалу поршневого пальця, зокрема підвищенню його втомної міцності на 15...20%.

Це пояснюється тим, що в процесі нагрівання сталі вище точки рекристалізації і подальшого пластичного деформування з металом деталі відбувається ряд позитивних перетворень. Відбувається «заліковування» мікротріщини, що виникають в процесі експлуатації. Матеріал відновлених поршневих пальців набуває волокнистої макроструктури з напрямком волокон відповідно до зовнішнього контуру деталі. Відбувається подрібнення зерна в компонентах мікроструктури, більш рівномірний розподіл твердості по поперечному перерізу та зменшення залишкових внутрішніх напружень. Все це сприяє поліпшенню фізико-механічних властивостей металу

На пластичність металу в процесі пластичного деформування крім температури суттєвий вплив має схема пластичного деформування й і швидкість деформування. Для збільшення пластичності металу й усунення можливості наклепу при гарячій пластичній деформації температура нагрівання повинна бути значно більше, ніж мінімальна температура рекристалізації. Як правило початок гарячого пластичного деформування відбувається при температурі 1200...1150<sup>0</sup>С, а закінчення не нижче 800...850<sup>0</sup>С.

При відновленні деталей пластичним деформуванням особливо важливе значення має швидкість нагрівання, оскільки важливо уникнути при нагріванні вигорання легуючих елементів і не допустити росту зерна. Тому необхідно максимально збільшити швидкість нагрівання деталі і вести нагрівання, по можливості в захисному чи нейтральному середовищі.

Сутність способу відновлення поршневого пальця гарячим пластичним деформуванням полягає у швидкісному нагріванні вала в соляній печі за 2,0...2,5 хв., переміщенні пальця в штамп і роздачі в штампі двома пуансонами.

Після відновлення поршневого пальця гарячим пластичним деформуванням деталь піддається повільному охолодженню, щоб уникнути утворення гартівних структур з наступною механічною обробкою. Об'єм механічної обробки часто знижується в порівнянні з заводською технологією, оскільки при пластичному деформуванні поковка максимально наближається до форми деталі.

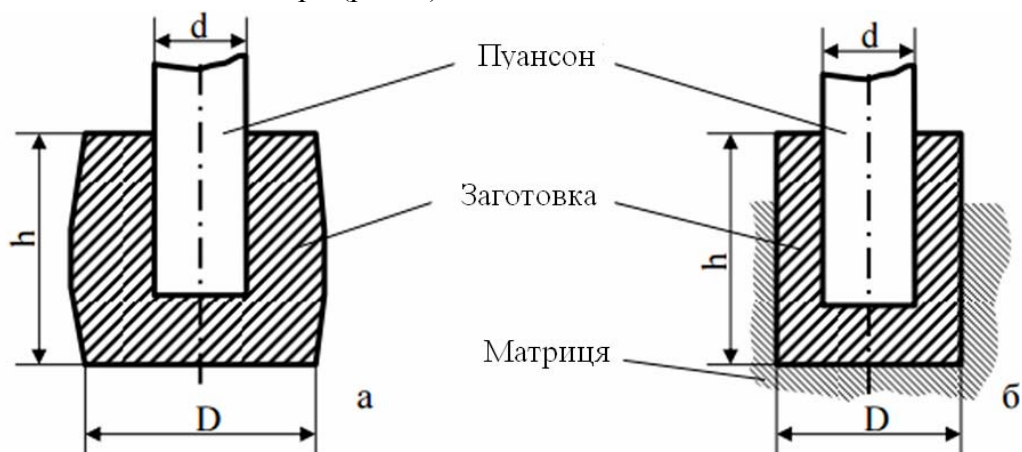
Оскільки при відновленні пальців пластичним деформуванням поковка максимально наближається до форми деталі, то ряд операцій механічної обробки стають непотрібними.

При розробці технологічного процесу відновлення поршневого пальця гарячим пластичним деформуванням, проектування штампової оснастки важливо в першу чергу, визначити зусилля, яке необхідно розвивати в процесі штампування. Від цього багато в чому залежить якість штампування [8 - 13].

**Постановка завдання.** Метою дослідження є створення теоретичної бази, що дає можливість розрахувати зусилля гарячого пластичного деформування поршневого пальця.



**Виклад осного матеріалу.** Прошивка - ковальська операція, за допомогою якої отримують в заготовках отвори (рис. 2).



а - відкрита; б - закрита

Рисунок 2 – Прошивка заготовки

Джерело: розроблено авторами

Відкрита прошивка циліндричних заготовок здійснюється зазвичай при співвідношенні діаметрів заготовки -  $D$  і пуансона -  $d$ :  $D/d > 2$ . При значенні зазначеного співвідношення близько,  $D/d \approx 5...6$ , схема прошивки практично не відрізняється від схеми занурення пуансона в плоский напівпростір.

При закритій прошивці співвідношення  $D/d < 2$  зазвичай менше 2.

Співвідношення зусиль при відкритій і закритій прошивках показано на рис. 3.

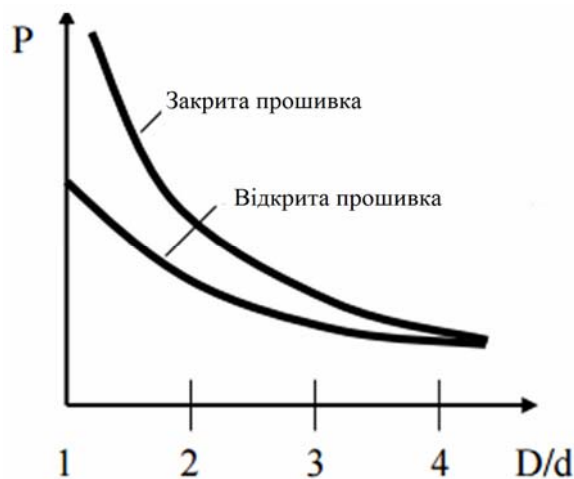


Рисунок 3 – Залежність зусилля прошивки від співвідношення діаметрів заготовки -  $D$  і пуансона -  $d$   
Джерело: розроблено авторами

Розглянемо задачу відкритої прошивки (рис. 4).

Повне зусилля на пуансоні задається формулою

$$P = P_1 + P_2, \quad (1)$$

де  $P_1$  – зусилля, потрібне для осадження матеріалу безпосередньо під пуансоном;

$P_2$  – зусилля відколу матеріалу по контуру пуансона.

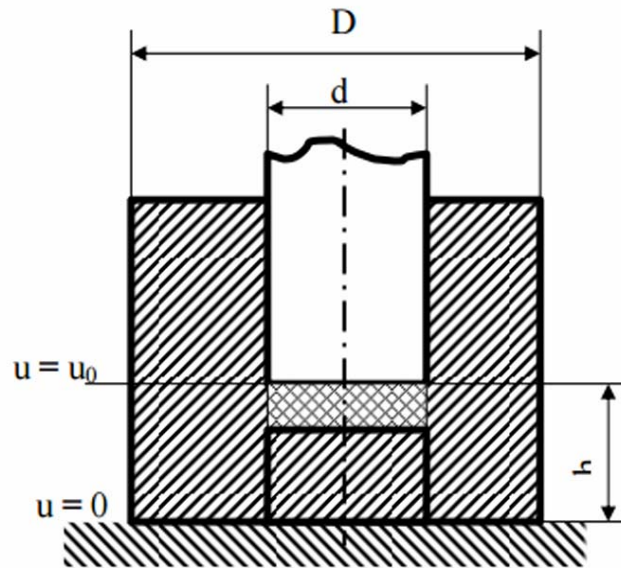


Рисунок 4 – Схема відкритої прошивки

Джерело: розроблено авторами

При гарячій прошивці формула для осадження смуги може бути перетворена для осесиметричного випадку таким чином:

$$\tau_k = -f \cdot \sigma_s \quad \text{або} \quad \tau_k = -\frac{\sigma_s}{2}, \quad (2)$$

$$\sigma_{33} = \frac{2 \cdot \tau_k}{h} \cdot x_1 + C \quad \text{або} \quad \sigma_{33} = \frac{\sigma_s \cdot \rho}{h} \cdot x_1 + C, \quad (3)$$

$\sigma_s$  – границя текучості матеріала;

$\sigma_{33}$  – нормальні напруги;

$\tau_k$  – дотичні напруги.

Коефіцієнт  $C$  у формулі (3) можна визначити, використовуючи рішення задачі про деформацію кругової заготовки (формула (7)), вважаючи, що радіальні напруги на границі ототожнюються з радіальним тиском з боку заготовки:

$$\sigma_\rho = \sigma_s^* \cdot \ln \frac{D}{d}. \quad (4)$$

Зв'язок радіальних і нормальних напружень виражається умовою пластичності в вигляді

$$\sigma_{33} - \sigma_\rho = -\sigma_s. \quad (5)$$

Послідовне перетворення формул (3) - (5) дає:

$$\sigma_\rho = \sigma_{33} + \sigma_s,$$

$$\sigma_\rho = \sigma_s + \frac{\sigma_s \cdot \rho}{h} + C, \quad \sigma_\rho \left( \rho = \frac{d}{2} \right) = \sigma_s + \frac{\sigma_s \cdot d}{2 \cdot h} + C, \quad \sigma_\rho \left( \rho = \frac{d}{2} \right) = -\sigma_s \ln \frac{D}{d},$$

$$C = -\sigma_s^* \cdot \ln \frac{D}{d} - \frac{\sigma_s \cdot d}{2 \cdot h} - \sigma_s, \quad \sigma_3 = \frac{\sigma_s \cdot \rho}{h} - \frac{\sigma_s \cdot d}{2 \cdot h} - \sigma_s^* \cdot \ln \frac{D}{d}.$$

Остаточно, маємо:

$$\sigma_3 = -\sigma_s \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{D}{d} - \frac{\rho - d/2}{h} \right]. \quad (6)$$

Отримане значення нормального напруження (6) можна використовувати для обчислення:  $P_1$ :

$$P_1 = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{d/2} \sigma_3 \cdot \rho \cdot d\rho \quad P_1 = \sigma_s \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{D}{d} - \frac{d}{6 \cdot h} \right], \quad (7)$$

звідки питоме зусилля визначається елементарно:

$$p_1 = \sigma_s \cdot \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{D}{d} - \frac{d}{6 \cdot h} \right]. \quad (8)$$

Для визначення питомої зусилля  $p_2$ , що виникає від зрізу, використовуємо метод балансу робіт. Робота зрізу визначається співвідношенням:

$$A_{cp} = \pi \cdot d \cdot h \cdot \tau_k \cdot \left( \frac{u_0 - O}{2} \right), \quad A_{cp} = \pi \cdot d \cdot h \cdot \frac{\sigma_s}{2} \cdot \frac{u_0}{2}. \quad (9)$$

Робота подолання опору зрізу, що обчислюється при переміщенні пуансона, записується формулою

$$A_{comp} = p_2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot u_0. \quad (10)$$

Прирівнюючи формули роботи (9) і (10), отримаємо:

$$p_2 = \sigma_s \frac{h}{d}. \quad (11)$$

Складаючи формули (8) і (11), отримаємо повне питоме зусилля:

$$p = \sigma_s \cdot \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{D}{d} - \frac{d}{6 \cdot h} + \frac{h}{d} \right]. \quad (12)$$

Використовуючи дану формулу, можна обчислити повне потрібне зусилля для прошивки шляхом простого множення питомої зусилля на площу торця пуансона.

Питоме зусилля (12) можна мінімізувати за величиною, визначивши тим самим умова співвідношення висоти заготовки і діаметра пуансона для створення оптимального силового режиму деформування. Виконуючи диференціювання (12) і прирівнюючи похідну нулю, отримаємо:  $\frac{d}{h} = \sqrt{6}$ .

Тоді питоме зусилля

$$p = \left[ 2 + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{D}{d} \right]. \quad (13)$$

Формули (12) і (13) справедливі для співвідношень  $D/d \leq 5 \dots 6$ , проте друга формула справедлива при  $\frac{d}{h} \leq \sqrt{6}$ .

Якщо співвідношення  $D/d > 6$ , то задача прошивки аналогічна задачі втискання пуансона в плоске напівпростір. Оцінку граничних значень питомих зусиль можна зробити в цьому випадку методом ліній ковзання, що дозволяє зробити рівняння, яке дається залежністю:

$$p = 2 \cdot k \cdot (1 + \omega_{AB}), \quad (14)$$

$$\text{де } k = \frac{\sigma_s^*}{2};$$

$\omega_{AB}$  – кут між дотичними до лінії ковзання під інструментом і при виході на вільну поверхню.

Для початкового етапу втискання - кут повороту дотичної становить  $\pi/2$ , а для кінцевого –  $\pi$ . Відповідно значення питомих зусиль, в силу формули (14), дорівнюватимуть приблизно  $2,8 \cdot \sigma_s$  і  $3,6 \cdot \sigma_s$ .

Вирішимо задачу про роздачу товстостінної труби внутрішнім тиском «р». Внутрішній і зовнішній радіуси кривизни труби рівні  $r$  і  $R$  відповідно. Механічні характеристики, зокрема, межа текучесті матеріалу, вважаються відомими. Задача полягає в з'ясуванні зв'язку між параметрами труби і внутрішнім тиском в момент приведення труби в пластичний стан.

Якщо взяти рівняння рівноваги для осесиметричних задач з урахуванням того, що коефіцієнт тертя дорівнює нулю, то рівняння рівноваги має вигляд

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0 \quad (15)$$

Умову пластичності можна записати у вигляді

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s^* \quad (16)$$

Умова пластичності (16) для даного випадку має мати знак «-» у правій частині для узгодження знаків окружних напружень, а тому рівняння (15) набирає вигляду

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} = \frac{\sigma_s^*}{\rho} \quad (17)$$

Рішення диференціального рівняння (17) призводить до залежності

$$\sigma_\rho = \sigma_s^* \cdot \ln R + C \quad (18)$$

Граничні умови

$$\sigma_\rho|_r = f(\rho), \quad (19)$$

з урахуванням нульових значень нормальних напружень на зовнішньому контурі використовуємо для визначення  $C$

$$\sigma_\rho(R) = \sigma_s^* \cdot \ln R + C \quad (20)$$

Підстановка значення  $C$  з (20) в (18) призводить до вирішення:

$$\sigma_\rho(R) = -\sigma_s^* \cdot \ln \frac{R}{\rho} \quad (21)$$

На внутрішньому контурі (при  $\rho = r$ ) нормальне напруження дорівнює  $-p$ , а тому з (21) маємо

$$\sigma_\rho(r) = -\sigma_s^* \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (22)$$

Співвідношення (22) є рішенням вихідної задачі.

### Висновки.

1. Відновлення поршневого пальця гарячим пластичним деформуванням дозволяє відновити 95% пальців, що надійшли в ремонт.

2. Поршневі пальці відновлені гарячим пластичним деформуванням по своїм технічним параметрам на поступаються новим, що досягається - «заліковуванням» мікротріщин, створенням внутрішніх напруг стискання, та подрібненню зерна, що

сприяє зміцненню матеріалу поршневого пальця, зокрема підвищенню його втомної міцності на 15...20%.

3. В результаті проведення теоретичних досліджень опору металу пластичному деформуванню були отримані залежності питомого зусилля на пуансоні в залежності від співвідношення діаметрів заготовки.

## Список літератури

1. Бисикенов А.Б. Анализ способов восстановления автотракторных шестерен. *Ремонт сельскохозяйственной техники и ее надежность: сб. научных трудов*. 1976. Вып. 76. С. 58-70.
2. Кириллов А.В. Анализ технологических процессов восстановления зубчатых колес с неравномерным износом по длине зубьев. *Ремонт тракторов и с/х машин: сб. научных трудов*. Саратовский СХИ, Саратов, 1982. С. 72-83.
3. Пашин Ю.Д., Кириллов А.В. Восстановление цилиндрических зубчатых колес. *Степные просторы*. 1982. № 9. 52 с.
4. Кузьменков О.И., Карабанов Ф.Ф. Прогрессивные методы восстановления зубчатых колес. Обзорная информация. Серия: Машиностроение и металлообработка Белорусский НИИТИ и ТЭИ Госплана БССР Минск, 1980. 22 с.
5. Кузьменков О.И. Теоретические основы восстановления формы и механических свойств твердых тел ротационным пластическим деформированием. *Современное оборудование и технологические процессы для восстановления изношенных деталей машин*: тезисы докл. на НТК стран-членов СЭВ и СФРЮ. ("Ремдеталь-83"). М.: ЦНИИТЭИ. Ч. 2. С. 20-22.
6. Ковальчук Ю.М., Климин В.И., Брусенцов А.И. и др. Технология и установка для восстановления валов-шестерен гидронасосов типа НШ. *Современное оборудование и технологические процессы для восстановления изношенных деталей машин*: тезисы докл. на НТК стран-членов СЭВ и СФРЮ ("Ремдеталь-83"). М.: ЦНИИТЭИ, Ч. 2. С. 19-20.
7. Климин В.И., Гребельник М.П., Савчук С.А. и др. Восстановление шестерен гидронасосов методом пластической деформации. *Технология и организация производства*. 1985. № 3. С. 50-51.
8. Томсен З., Янг И., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1969. 504 с.
9. Стопанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1979. 215 с.
10. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
11. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилия и деформаций) / И.Я.Тарновский, А.А.Поздеев О.А.Ганаго и др.; под ред. И.Я.Тарновского. М.: Металлургия, 1963. 672 с.
12. Теория пластических деформаций металлов / Е.П.Унксов, У.Джонсон, В.Л.Колмогоров и др.; под ред. Е.П.Унксова, А.Г.Овчинникова. М.: Машиностроение, 1983. 598 с.
13. Хензель А., Шпигель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справ.изд. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
14. Филимонов В. И., Мищенко О. В. Теория обработки металлов давлением: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 208 с.
15. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. Москва: Металлургия, 1972. 408 с.

## References

1. Bisikenov, A.B. (1976). Analiz sposobov vostanovleniy avtotraktornuh shesteren [The analysis of the methods of recovery of automotive gears]. *Remont selskhozystvennoy tehniky i nadezhnost – Agricultural Machinery Repair and Reliability*. Vol. 76. 58-70. [in Russian].
2. Kirillov, A.B. (1982). Analiz tehnologicheskikh processov vostanovleniy zubchatuh kolyos s neravnomernum iznosom po dline zuba [Analysis of technological processes for restoring gears with uneven wear along the length of the teeth]. *Remont traktorov i s/h mashin – Repair of Tractors and Agricultural Machines*. Saratov. 78-830. [in Russian].
3. Pashin, U.D. & Kirillov, A.B. (1982), Vosstovlenie culindricheskikh zubchatuh kolyos [Restoration of cylindrical gears]. *Stepnue prostoru – Steppe Expanses*. 9. 52 [in Russian].
4. Kuzmenkov, O.I. & Karabanov, F.F. (1980). Progressivnuyue metodu vosstanovleniy zubchatuh kolyos

- [Progressive gear recovery methods]. *Obzornay informaciy. Seriy: Mashinostroenie I metaloobrobtka Belorusskiy NIINTI i TEI Gosplana BSSR MinskS 22.* [in Russian].
5. Kuzmenko O.I. Tetoreticheskie osnovu vosstanovleniy formu i mehanocheskikh svoystv tvurduh tel rotacionnum plasticheskim deformirovaniem [Theoretical foundations of restoring the shape and mechanical properties of solids by rotational plastic deformation]. *Sovremennoe oborudovanie i tehnologicheskie processu dly vosstanovleniy iznoshenuh detaley mashin: tezisu dokladov na NTK stran – chlenov SEV i SFRU ("Remdetal-83")*, 2. pp. 20-22. [in Russian].
  6. Kovalchuk U.M., Klimin B.I., Brusencov A.I. Tehnologiy i ustanovka dly vosstanovleniy valovshesteren gidronasosov tipy NSh [Technology and installation for restoring the gear shafts of hydraulic pumps of the NSH type]. *Sovremennoe oborudovanie i tehnologicheskie processu dly vosstanovleniy iznoshenuh detaley mashin: tezisu dokladov na NTK stran – chlenov SEV i SFRU ("Remdetal-83")*, Moscow.: CNIITEI, 2. pp. 19-20. [in Russian].
  7. Klimkin, B.I., Grebelnik, M.P. & Savchuk, S.A. (1985). Vosstanovlenie shesteren gidronasosov metodom plasticheskoy deformacii [Restoration of hydraulic pump gears by plastic deformation method]. *Tehnologiy i organozciy proizvodstva – Technology and Organization of Production. Moskow CIITEI Goskomcelhoztehniki. 3.* 50-51. [in Russian].
  8. Tomsen Z., Yang I. & Kobayashi Sh. (1969). *Mehanika plasticheskikh deformaciy pri obrabotke metallov [Mechanics of plastic deformations in metal processing]*. Moskow: Mashinostroenie [in Russian].
  9. Stopanskiy, L.G. (1979). *Raschet processov obrabotki metallov davleniem [Calculations of metal forming processes]*. Moskow: Mashinostroenie [in Russian].
  10. Storozhev, M.V. & Popov, E.A. (1977). *Teoriy obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]*. Moskow: Mashinostroenie [in Russian].
  11. Taranovskiy, I.Y., Pozdeev, A.A. & Ganago, O.A.. (1963). *Theory of metal forming. I.Y.Taranovskogo (Ed.)*. Moskow: Metalurgizizdat [in Russian].
  12. Unksov, E.P., Dzhonson, U. & Kolmogorov, V.L.. (1983). *Teoriy plasticheskikh deformaciy metallov [Theory of plastic deformations of metals]*. E.P. Unksov, A.G.Ovchinnikova (Ed.). Moskow. Mashinostroenie [in Russian].
  13. Henzel A. & Shpigel T. (1982). *Raschet energosilovuh parametrov v processah obrabotki metallov davleniem [Calculation of energy-power parameters in metal forming processes]: Sprav. izd.* Moskow. Metalurgiy [in Russian].
  14. Fillimonov, V. I. & Fillimonov, O. V. (2012). *Teoriy obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]: uchebnoe posobie .* Ulianovsk : UIGTU [in Russian].
  15. Tomlenov, A.D. (1972). *Teoriy plasticheskogo deformirovaniy metallov [Theory of plastic deformation of metals]*. Moskow: Metalurgiy [in Russian].

**Yuriy Kuleshkov**, Prof., Dsc., **Timofey Rudenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mikhail Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Reva**, master  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Restoration of Piston Pins by Hot Plastic Deformation**

The aim of the study is to create a theoretical basis that allows to calculate the forces of hot plastic deformation of the piston pin.

One of the promising methods of restoring the piston fingers of the connecting rod - piston group of internal combustion engines is the method of hot plastic deformation. The process of restoring the piston fingers by hot plastic deformation can increase their strength and, in particular, fatigue strength. When developing the technological process of restoration of piston fingers using the method of hot plastic deformation by distributing it with a punch in the stamp, there is a problem of determining the effort required for high-quality deformation process. The article offers the theoretical basis for calculating the deformation forces. The result was obtained on the basis of the selected scheme of formation.

As a result of the calculations we can conclude:

1. Restoration of the piston finger by hot plastic deformation allows to restore 95% of the fingers which have arrived in repair.

2. Piston fingers restored by hot plastic deformation in their technical parameters are not inferior to the new, achieved - "healing" of microcracks, creating internal compressive stresses, and grinding grain, which strengthens the material of the piston finger, in particular increasing its fatigue strength by 15... 20% .

3. As a result of theoretical studies of the resistance of the metal to plastic deformation were obtained dependences of the specific force on the punch depending on the ratio of the diameters of the workpiece.

**hot plastic deformation, punch, deformation force**

*Одержано (Received) 24.01.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 05.02.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 621.794.61

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).63-69](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).63-69)

**М.М. Студент**, ст. наук. співр., док. техн. наук, **В.М. Гвоздецький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, **Г.Г. Веселівська**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, **Х.Р. Задорожна**, мол. наук. співр., канд. техн. наук, **Р.С. Мардаревич**, наук. співр., канд. техн. наук, **Я.Я. Сірак**, мол. наук. співр., канд. техн. наук

*Фізико-механічний інститут НАН України, м. Львів, Україна*

*e-mail: student.phmi@gmail.com, gvosdetcki@gmail.com, fminanu1978@gmail.com, 880988@ukr.net, algirdas.280378@gmail.com*

**С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук

*Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: markob0@ukr.net*

## Вплив складу електроліту на характеристики синтезованого під час твердого анодування алюмінію оксидного шару

Тверде анодування виконано за температури  $-4...0^{\circ}\text{C}$  впродовж 60 хв. Як базовий електроліт використано 20%-й водний розчин  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Під час анодування густина струму становила  $5 \text{ A}/\text{dm}^2$ . Щоб з'ясувати вплив сильних окиснювачів на характеристики анодних шарів (оксидних), в електроліт додавали 30; 50; 70 та 100 г/л перекису водню ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). В деяких випадках його продували озono-повітряною сумішшю з розрахунку  $5 \text{ мг}\cdot\text{хв}/\text{л}$  озону. Встановлено, що оксидний шар ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) під час твердого анодування на алюмінієвих сплавах формують не лише іони кисню, які утворюються внаслідок розкладу води, а також його нейтральні атоми, які формуються через розкладання перекису водню та озону. Виявлено, що перекис водню, а також продування електроліту збільшують товщину та мікротвердість анодного шару на 50% внаслідок зниження вдвічі кількості молекул води в оксиді алюмінію. Перекис водню та озон, очевидно, зменшують і товщину бар'єрного шару покриття, крізь який проникають іони кисню та алюмінію, які, з'єднуючись, формують оксидний шар.

**тверде анодування, алюміній, оксидний та бар'єрний шари, пори, мікротвердість**

**Постановка проблеми.** Алюмінієві сплави володіють високою конструкційною міцністю та поліпшеними ливарними властивостями, низькими питомою вагою і температурою плавлення, тому їх часто використовують в промисловості. Через хімічну активність до кисню з утворенням на поверхні металу тонкої захисної плівки алюмінієві конструкції тривкі в умовах атмосферного впливу. Проте їм властива низька абразивна зносостійкість, для підвищення якої, необхідні нові технології. Найчастіше для підвищення експлуатаційних властивостей деталей з алюмінієвих сплавів використовують гальванічне хромування, газотермічне нанесення покриттів та способи штучного вирощування оксиду на їх поверхні – плазмoeлектролітне оксидування та тверде анодування [1–5]. Сталеві та чавунні деталі заміняють на алюмінієві з оксидним шаром (наприклад, алюмінієві блоки циліндрів двигунів внутрішнього згорання, робочі поверхні яких вкриті оксидним зносостійким шаром).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений огляд літературних джерел показав, що для підвищення властивостей алюмінієвих сплавів на їх поверхні формують зносостійкі та корозійнотривкі покриттів. З метою підвищення

характеристик отриманих анодних шарів необхідно додатково їх ущільнювати просочуванням з наступною термічною обробкою до 200°C. Також часто рекомендують термічну обробку, як спосіб зменшення кількості молекул води в анодному алюмінієвому шарі ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ). Найпоширеніші операції термічної обробки часто є неможливими через габарити анодованих деталей. Метод твердого анодування технологічно простіший та дешевший, однак, має суттєві недоліки: поверхневі шари мають низькі твердість ( $\leq 500$  HV) та зносостійкість [4]. Сучасні вимоги до підвищення надійності і довговічності машин за зниження собівартості виробництва, дотримання екологічної чистоти визначають актуальність технологій зміцнення поверхневого шару алюмінієвих сплавів.

**Постановка завдання.** Шляхом введення сильних окиснювачів до складу електроліту сформувати анодні шари на поверхні алюмінію з підвищеними механічними характеристиками. Визначити вплив тривалості формування анодного шару на зміну його властивостей.

**Виклад основного матеріалу.** Тверде анодування виконували за температури – 4...0°C упродовж 60, 120 та 180 хв, використовуючи класичну схему анодування (рис. 1).

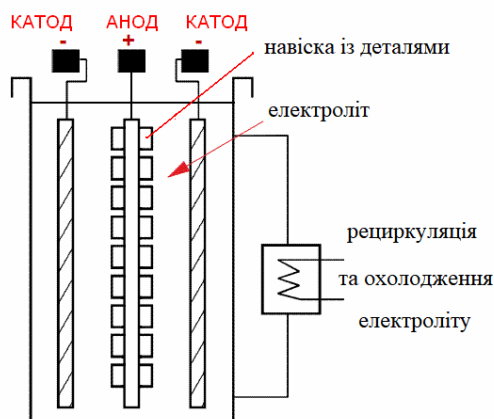


Рисунок 1 – Схема установки для твердого анодування алюмінієвих сплавів

*Джерело: розроблено автором*

Базовим електролітом слугував 20%-й водний розчин  $H_2SO_4$ . Під час анодування підтримували густину струму 5 А/дм<sup>2</sup>. Зразки з технічного алюмінію АД0 (1011) (0,25 мас.% Si; 0,40 Fe; 0,05 Cu; 0,05 Mn; 0,05 Mg; 0,05% Ti; решта – Al) розміром 20 × 20 × 5 мм заздалегідь знежирювали віденським вапном (водний розчин суміші CaO + MgO).

Зразки освітлювали в водному розчині нітратної кислоти (400 г/л), промивали в дистильованій воді з наступним просушуванням гарячим повітряним струменем впродовж 3...5 хв та, під'єднавши до анодної напруги, занурювали в електроліт. Для визначення впливу сильних окиснювачів на властивості анодних шарів, змінювали склад електроліту шляхом додавання перекису водню ( $H_2O_2$ ) у кількості 30; 50; 70 та 100 г/л та продуванням озono-повітряною сумішшю з розрахунку 5 мг·хв/л озону. Мікротвердість анодних шарів визначали приладом ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76) та багатофункціональним пристроєм "Мікрон-гамма" методом локального навантаження [6]. Міцність, пластичність та модуль Юнга матеріалів встановлювали методом склерометрії. Структуру досліджували в характеристичному випромінюванні BSD на електронному мікроскопі EVO 40 XVP. Фазовий аналіз виконували на рентгенівському дифрактометрі BRUKER D8 DISCOVER.



Для досліджень абразивного зношування використовували абразивний диск діаметром 150 мм та шириною 8 мм із електрокорунду середньом'якої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7K15 з розміром зерна 20 мкм за частоти його обертання  $2,7\text{с}^{-1}$  (58 м/хв), навантаження в зоні лінійного контакту  $P = (14,7 \pm 0,25)$  Н. Тривалість дослідження 60 с. Знос оцінювали за втратою маси зразків з точністю  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  г на електронній аналітичній вазі марки KERN ABJ 220 4M.

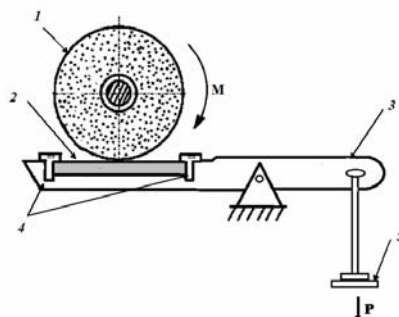


Рисунок 2 – Принципова схема установки для дослідження абразивного зношування зразків жорстко закріпленим абразивом: 1 – абразивний диск; 2 – зразок; 3 – важіль; 4 – кріплення зразка; 5 – вантаж;  $P$  – навантаження

Джерело: розроблено автором

**Структура та мікротвердість анодованих шарів.** Анодний шар є пористий та складається з тонкого бар'єрного шару та зовнішньої пористої ділянки з циліндричними порами, які виходять на поверхню (рис. 3) [7–9]. Він містить щільно розташовані стовпчасті шестикутні комірки з центральною циліндричною порою. Бар'єрний шар на дні комірок має напівсферичну форму.

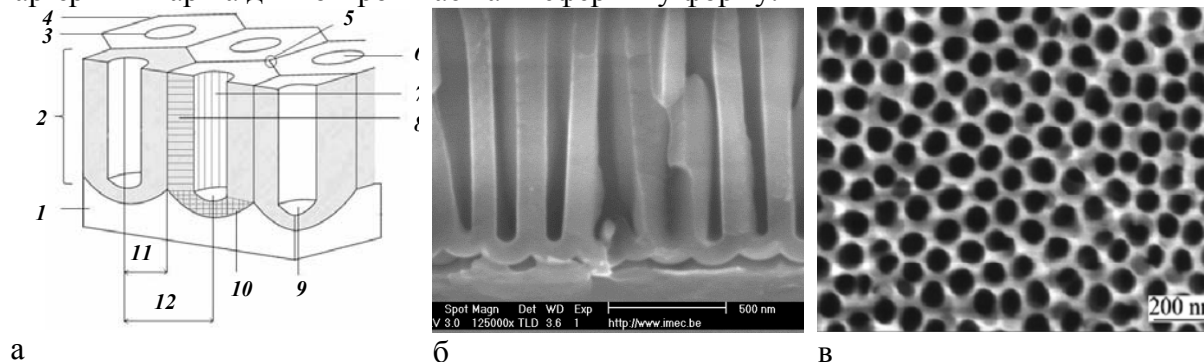


Рис. 3. Зображення структури анодного шару: а – схематичне [7] (1 – алюміній; 2 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3 – пора; 4 – комірка; 5 – потрійна точка; 6 – гирло пори; 7 – стінка пори; 8 – стінка комірки; 9 – основа пори; 10 – бар'єрний шар; 11 – радіус комірки; 12 – відстань між порами); б – у поперечному перерізі [8]; в – вид зверху [9]

Джерело: розроблено автором

Оксидний шар на поверхні алюмінієвих сплавів формується у вигляді стовпчиків діаметром не більше 50 мкм зі сильно гідратованого оксиду алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  [7]. Кількість молекул води в ньому залежить від режиму його синтезу. Під час анодування в сірчано-кислотному електроліті діаметр пори типової анодної комірки до 25 нм, а бар'єрного шару – 10...30 нм.

У структурі анодних шарів присутні пори двох типів: крупні ( $\leq 5$  мкм) та нанометрові ( $\leq 50$  нм). Їх кількість зростає зі збільшенням тривалості анодування (рис. 4, табл. 1).

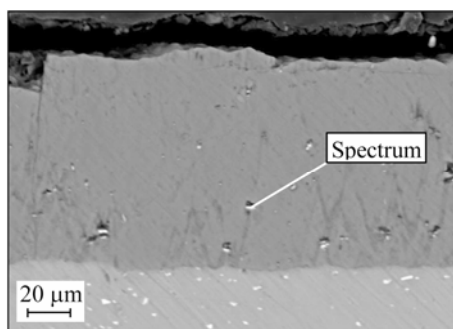


Рисунок 4 – Структура анодного шару на сплаві АД0 з включеннями інтерметалідів, синтезованого впродовж 60 хв.

Джерело: розроблено автором

Таблиця 1 – Спектральний аналіз включень в анодному шарі (рис. 2, спектр)

Вміст	Елемент					Всього
	Al	Si	Mn	Fe	Cu	
мас. %	59,12	5,40	6,07	20,52	8,89	100,00
ат. %	73,01	6,41	3,68	12,24	4,66	100,00

Джерело: розроблено автором

За всіх електрохімічних способів формування товстошарового оксиду необхідно активувати кисень і кисневмісні компоненти в міжелектродному проміжку. Кисень утворюється в продуктах гідролізу води та внаслідок дисоціації електроліту. Властивості анодованих шарів можна змінювати складом електроліту.

З підвищенням концентрації перекису водню в базовому електроліті від 0 до 70 г/л товщина оксидного шару зростає майже на 50%, тобто з 75 до 110 мкм (рис. 5).

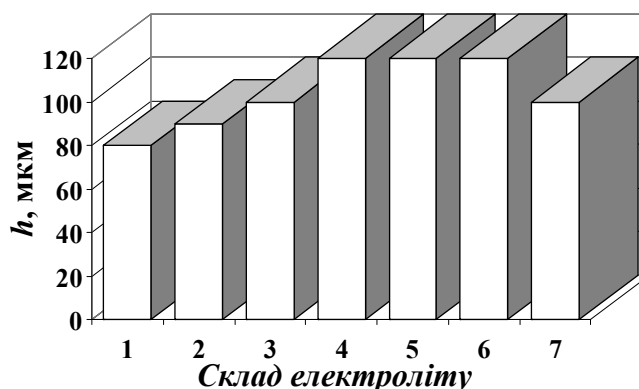


Рисунок 5 – Вплив концентрації  $\text{H}_2\text{O}_2$  та  $\text{O}_3$  (2-7) в електроліті (1) на товщину синтезованого анодного шару: 1 – 20%-ий р-н  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 2 – 30 г/л  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; 3 – 50 г/л  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; 4 – 70 г/л  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; 5 –  $\text{O}_3$  та 6 – 70 г/л  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_3$

Джерело: розроблено автором

З подальшим її ростом до 100 г/л (10%) його товщина не збільшується. Після додаткового продування електроліту з таким вмістом перекису водню озono-повітряною сумішшю товщина шару не зростає, а після продування базового збільшується на 15% (до 90 мкм).

Крім того, з підвищенням концентрації перекису водню в базовому електроліті (від 0 до 70 г/л) мікротвердість оксидного шару зростає (на 60% – з 400 до 650 HV; табл. 2). Максимальне її значення отримано в електроліті з 30 г/л  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Внаслідок анодування в базовому електроліті, мікротвердість покриття становить 380...400 HV.

Таблиця 2 – Фізико-механічні характеристики анодних шарів

Склад електроліту (тривалість анодування – 60 хв)	Мікротвердість, HV
Базовий (20%-й р-н H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	380
+ 30 г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	650
+ 50 г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	510
+ 70 г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	500
+ 100 г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	470
+ O <sub>3</sub>	510

Джерело: розроблено автором

Проведеними дослідженнями встановлено, що зі збільшенням тривалості анодування до 120...180 хв мікротвердість шару зростає на 60 % (табл. 3). Ймовірно, що таке зростання зумовлено зменшенням вмісту молекул води в структурі анодного шару, або зменшенням його пористості. Можливо також, що збільшення тривалості анодування сприяє формуванню нової фази ( $\gamma$ -фази), сліди якої виявлено фазовим аналізом, яка має підвищені механічні властивості.

Таблиця 3 – Фізико-механічні характеристики анодних шарів залежно від тривалості анодування

Склад електроліту	Тривалість анодування, хв	Мікротвердість, HV
Базовий	60	380
Базовий	120	640
Базовий	180	640

Джерело: розроблено автором

**Абразивна зносостійкість.** На поверхні деталей алюмінію та його сплавів поверхневі шари піддаються впливу абразиву. Проведеними дослідженнями анодних шарів, сформованих впродовж 60 хв, на абразивну зносостійкість за умов жорсткозакріпленого абразиву встановлено, що зміна складу електроліту забезпечує підвищення опору їх зношуванню (табл. 4).

Таблиця 4 – Абразивна зносостійкість анодних шарів

Склад електроліту	Тривалість анодування, хв							
	60			60				
	Базовий	Базовий	Базовий	Базовий електроліт з додатками				
	й		й	30 г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	50 г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	70 г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	100 г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
Втрата маси, мг	22,4	5,3	6,7	18,3	16,8	35,4	22,2	1,8

Джерело: розроблено автором

Вміст в електроліті пероксиду водню в кількості 30...100 г/л спричиняє зменшення втрати маси 18,3...22,2 мг. Це забезпечено зменшенням кількості молекул води в анодному шарі. Продування озоном збільшує втрату маси шару, що, очевидно, викликано зміною структури анодного шару, бо його мікротвердість є вищою порівняно з базовим (табл. 2).

Збільшення тривалості анодування до 120 та 180 хв суттєвіше покращує властивості анодних шарів. Абразивна зносостійкість зростає в 3-4 рази. Вища втрата маси під час анодування 180 хв можливо викликана дещо більшим вмістом молекул

води в шарі, ніж при його синтезі впродовж 120 хв, однак їх мікротвердість є однаковою, а, отже, і структура.

**Висновки.** 1. Встановлено, що анодування алюмінію впродовж 60 хв. забезпечує підвищення його властивостей. Зміна складу електроліту сприяє зростанню мікротвердості в 1,2...1,7 рази. Опір абразивному зношуванню збільшується за вмісту різної кількості додатків в електроліт та максимальним є при 30 г/л  $H_2O_2$ . Продування базового електроліту озоном забезпечує підвищення мікротвердості шару від 380 до 510 HV. Вища втрата маси за вищої мікротвердості спричинена збільшенням пористості покриттів.

2. Визначено, що збільшення часу анодування в базовому електроліті до 120 та 180 хв сприяє зростанню мікротвердості до 640 HV порівняно із анодованим шаром впродовж 60 хв. Втрата маси при дослідженні абразивного зношування є меншою в 3-4 рази при більш тривалому анодуванні, ніж при 60 хв в базовому електроліті.

## Список літератури

1. Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasma-electrolytic oxide-ceramic layers synthesized on D16T alloy / M. M. Student and other. *Materials Science*. 2017. 53, № 2. P. 359–367.
2. Gibbs energy calculation of electrolytic plasma channel with inclusions of copper and copper oxide with Al-base / V. M. Posuvailo, and other. *Mat. Sci. and Eng.* 2017. 181, № 1. P. 157–168.
3. Effect of hydrogen on the wear resistance of steels upon contact with plasma electrolytic oxidation layers synthesized on aluminium alloys / V. Hutsaylyuk and other. *Metals*. 2019. 9, № 3. P. 280. <https://doi.org/10.3390/met9030280>.
4. Structure and properties of aluminum alloys modified with silicon carbide by laser surface treatment / H. V. Pokhmurs'ka and other. *Materials Science*. 2005. 41, № 3. P. 316–323.
5. Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings / T. R. Stupnyts'kyi and other. *Materials Science*. 2016. 52, № 2. P. 165–172.
6. Головин Ю. И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Metallurgiya, 1991. 158 с.
7. Torrescano Alvarez, Jeanette Marcela. Hard anodic films for aluminium alloys. The University of Manchester, UK, 2018. 184 p.
8. Ning-ning Hu, Shi-rong Ge and Liang Fang. Tribological properties of nano-porous anodic aluminum oxide template. *J. of Central South University of Tech.* 2011. 18. P. 1004–1008.
9. Alaa M. Abd-Elnaiem, Gaber A. Parametric study on the anodization of fabricating nano-pores template. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013. 13. P. 9741–9751.
10. Galusek D., Ghillányová K. Ceramic oxides. *Ceramics Science and Technology. Mat. and Properties*. Darmstadt: Wiley-VCH, 2010. 2, Ch. 1. P. 3–58.

## Referencis

1. Student, M. M. et al. (2017). Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasma-electrolytic oxide-ceramic layers synthesized on D16T alloy. *Materials Science*. 53, № 2. P. 359–367 [in English].
2. Posuvailo, V. M. et al. (2017). Gibbs energy calculation of electrolytic plasma channel with inclusions of copper and copper oxide with Al-base. *Mat. Sci. and Eng.* 181, № 1. P. 157–168 [in English].
3. Hutsaylyuk, V. et al. (2019). Effect of hydrogen on the wear resistance of steels upon contact with plasma electrolytic oxidation layers synthesized on aluminium alloys. *Metals*. 9, № 3. P. 280. <https://doi.org/10.3390/met9030280> [in English].
4. Pokhmurs'ka, V. et al. (2005). Structure and properties of aluminum alloys modified with silicon carbide by laser surface treatment. *Materials Science*. 41, № 3. P. 316–323 [in English].
5. Stupnyts'kyi, T. R. et al. (2016). Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings. *Materials Science*. 52, № 2. P. 165–172 [in English].
6. Golovin, Ju. I. (1991). *Nanoindentirovanie i ego vozmozhnosti [Nanoindentation and its capabilities]*. Moscow: Metallurgija. [in Russian].
7. Torrescano Alvarez & Jeanette Marcela. (2018). Hard anodic films for aluminium alloys. The University of Manchester, UK [in English].

8. Ning-ning Hu, Shi-rong Ge & Liang Fang. (2011). Tribological properties of nano-porous anodic aluminum oxide template. *J. of Central South University of Tech.* 18. P. 1004–1008 [in English].
9. Alaa M. Abd-Elnaiem & Gaber A. (2013). Parametric study on the anodization of fabricating nano-pores template. *Int. J. Electrochem. Sci.* 13. P. 9741–9751 [in English].
10. Galusek D. & Ghillányová K. (2010). Ceramic oxides. *Ceramics Science and Technology. Mat. and Properties.* Darmstadt: Wiley-VCH. 2, Ch. 1. P. 3–58 [in English].

**Mykhajlo Student**, Dsc., Senior Researcher, **Volodymyr Hvozdetkii**, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Halyna Veselivska**, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Khrystyna Zadorozhna**, PhD tech. sci., Younger Researcher, **Roman Mardarevych**, PhD tech. sci., Researcher, **Yaruna Sirak**, PhD tech. sci., Younger Researcher

*Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine*

**Sergiy Markovych**, Assos. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine*

### **Influence of Electrolyte Composition on the Characteristics of Synthesized During Solid Anodization of Aluminum Oxide Layer**

The aim of the study. By introducing strong oxidizers to the electrolyte form anode layers on the surface of aluminum with increased mechanical characteristics. To determine the effect of the duration of the formation of an anode layer to change its properties.

Hard anodizing was performed at a temperature of  $-4...0^{\circ}\text{C}$  for 60 min. A 20% aqueous solution of  $\text{H}_2\text{SO}_4$  was used as the base electrolyte. During anodizing, the current density was  $5 \text{ A/dm}^2$ . To determine the effect of strong oxidants on the characteristics of the anode layers (oxide), 30 were added to the electrolyte; 50; 70 and  $100 \text{ g/l}$  of hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). In some cases, it was purged with an ozone-air mixture at a rate of  $5 \text{ mg}\cdot\text{min/l}$  of ozone. It was found that the oxide layer ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) during hard anodizing on aluminium alloys forms not only oxygen ions, which are formed by the decomposition of water, but also neutral oxygen atoms, which are formed by the decomposition of hydrogen peroxide and ozone. It was found that hydrogen peroxide, as well as blowing the electrolyte with an air-ozone mixture increase the thickness and microhardness of the anodized layer by 50% due to the reduction of the number of water molecules in alumina by half. Hydrogen peroxide and ozone apparently also reduce the thickness of the barrier layer of the coating, through which oxygen and aluminium ions penetrate and which, when combined, form an oxide layer.

Conclusions. 1. It has been established that aluminum anodizing for 60 minutes. provides an increase in its properties. Changing the composition of the electrolyte contributes to the growth of microhardness in 1.2 ... 1.7 times. The resistance of abrasive wear increases with the content of different amounts of applications in the electrolyte and the maximum is at  $30 \text{ g/l}$   $\text{H}_2\text{O}_2$ . Blowing the base electrolyte ozone provides an increase in the microhardness of the layer from 380 to 510 HV. The higher loss of mass for higher microhardness is caused by an increase in porosity of coatings.

2. It is determined that an increase in the anodization time in the baseline electrolyte to 120 and 180 minutes contributes to the growth of microhardness to 640 HV compared to an anodized layer for 60 minutes. Loss of mass in the study of abrasive wear is less than 3-4 times with longer anodation than at 60 minutes in the baseline electrolyte.

**solid anodizing, aluminum, oxide and barrier layers, pores, microhardness**

*Одержано (Received) 02.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 17.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ**

УДК 624.155.152

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).70-78](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).70-78)**В.І. Пантелесенко**, доц., канд. техн. наук, **А.Л. Червоноштан**, інж., **В.А. Пушенко**, студ.*Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро, Україна**e-mail: vladmaestro2017@gmail.com, andrew.chervonoshtan@pgasa.dp.ua,**Vadimpushenko99@gmail.com***С.О. Карпушин**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: karp22.05.1972ksa@gmail.com*

## Дослідження напруженого стану багатоцільового змінного бульдозерно-захватного робочого обладнання

В статті представлено змінне робоче обладнання на базі мобільного шарнірно-зчленованого колісного шасі високої прохідності, а саме бульдозерний відвал в поєднанні із захватним пристроєм для виконання різних робочих операцій, та проведено дослідження напруженого стану найбільш відповідальних елементів робочого обладнання в програмному середовищі «SolidWorks». Дослідження проведені в межах діючих навантажень та прийнятого матеріалу для їх виготовлення, а також визначена кількість циклів навантаження до втрати цими елементами тривкісної стійкості за межею плинності матеріалу. Дослідження напруженого стану елемента робочого обладнання показало, що при статичному навантаженні в межах 710 кН, матеріал робочого обладнання та його конструкція витримують навантаження по всім критеріям програми «SolidWorks». Дослідження при різній кількості циклів навантаження показали, що деталь витримує при даному матеріалі приблизно 1000000 циклів навантаження, а для виготовлення елементів робочого обладнання доцільно використовувати сталь 10ХСНД.

**робоче обладнання, напружений стан, статичне навантаження, міцність, «SolidWorks», притискна рамка**

**Постановка проблеми.** До числа основних напрямків, які визначають перспективний розвиток будівельної землерийної техніки, відноситься розширення технологічних можливостей за рахунок збільшення номенклатури робочого обладнання існуючих машин, а також створення універсальних дорожніх машин багатоцільового призначення [1, 2].

Об'єми будівельних робіт, розосередженість будівельних об'єктів, їх значна лінійна протяжність для меліоративного і дорожнього будівництва [3, 4], а у деяких випадках навпаки – обмеженість будівельних майданчиків обумовлюють достатньо високі вимоги до технологічних можливостей сучасних будівельних і дорожніх машин. Також серед відкритих питань залишається узгодження продуктивностей суміжних, у відповідності до технологічного циклу, машин. Наведений комплекс організаційних, конструктивних, технологічних, економічних та типорозмірних невідповідностей призводить до вимушених простоїв у роботі та великого відсотку ручної,

малопродуктивної праці. Актуальними при цьому залишаються проблеми пов'язані з надійністю і довговічністю змінного і багатоцільового робочого обладнання. Тому в роботі наведено дослідження напруженого стану найбільш відповідальних елементів захватно-бульдозерного робочого обладнання за допомогою комп'ютерної програми «SolidWorks» в межах діючих навантажень та обґрунтованого матеріалу для їх виготовлення. Також визначена кількість циклів навантаження до втрати цими елементами тривкісної стійкості за межею плинності матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Спорудження земляного полотна, виконання земляних робіт та головні вимоги до будівельної техніки повинні здійснюватися у відповідності до вимог національних стандартів: ДБН В.2.3-4:2015, ГОСТ 17.5.3.06-85, ДБН В.2.8-9-98 [5, 6, 7].

Відомо, що за умов великих об'ємів земляних робіт найбільш ефективним є застосування високопродуктивних землерийних машин безперервної дії [8]. А для розосереджених будівельних об'єктів, які характеризуються, як правило середніми і малими об'ємами робіт, частка таких зокрема в дорожньому будівництві складає 60...80% [1, 3], усунути вимушені простої, скоротити час на перебазування, підвищити коефіцієнт використання машини, зменшити відсоток ручної праці можливо розробкою та застосуванням змінного і багатоцільового робочого обладнання [9-14]. Перспективними для розробки змінного і багатоцільового робочого обладнання є машини відвального типу на колісному русійнику, одноківшеві гідравлічні екскаватори, фронтальні навантажувачі. Модернізована будівельна техніка здатна виконувати наступні операції: розробку і засипку траншей і котлованів, розробку міцних ґрунтів, переміщення вантажів, зокрема довгомірних, виконання монтажних робіт в стиснених умовах будівельного майданчика. Застосування однієї машини зі змінним багатоцільовим робочим обладнанням у більшості випадках забезпечує повний цикл підготовчих, планувальних, будівельно-монтажних і оздоблювальних робіт.

Варто зазначити, що багато питань, що пов'язані з ефективною роботою рухомого будівельного і транспортного складу в процесі будівництва вимагають розгляду комплексного логістичного підходу [15].

**Постановка завдання.** Запропонувати конструкцію змінного багатоцільового бульдозерно-захватного робочого обладнання для мобільного шарнірно-зчленованого колісного шасі підвищеної прохідності, змодельовати навантаження на робоче обладнання в межах програмного забезпечення «SolidWorks» з метою оптимізації, або перевірки геометричних і вагових параметрів та обґрунтування матеріалу для тривкісної стійкості.

**Виклад основного матеріалу.** В статті представлено змінне багатоцільове робоче обладнання на базі шарнірно-зчленованого колісного шасі високої прохідності, а саме бульдозерний відвал в поєднанні із захватним пристроєм для виконання широкого спектру робочих операцій, що дозволить використовувати машину самостійно, без залучення додаткової будівельної техніки.

Окрім свого основного призначення, модернізована техніка зможе виконувати наступні операції: засипку траншей і котлованів, розробку міцних ґрунтів, транспортування вантажів, зокрема довгомірних, виконання монтажних робіт в стиснених умовах будівельного майданчика.

Машина складається з шарнірно-зчленованого колісного шасі високої прохідності та модернізованого бульдозерного устаткування, забезпеченого захватним пристроєм.

Робоче устаткування (рис. 1) включає, відвал 1 з основним ножом 6, шарнірно змонтовану на відвалі 1 траверсу 3, керовану гідроциліндром 4. На траверсі 3 змонтована та керована гідроциліндром 5 притискна рамка 2.

Працює пропонуване робоче устаткування таким чином:

При копанні ґрунтів традиційним способом зусилля посередництвом штовхаючих брусів передається на відвал 1 і при упровадженні основного ножа 6 в ґрунт відбуваються процес зрізання та ротації ґрунту по відвальній поверхні. При цьому, втягуванням штоків гідроциліндрів 4 і 5, притискна рамка 2 відводиться в крайнє верхнє положення.

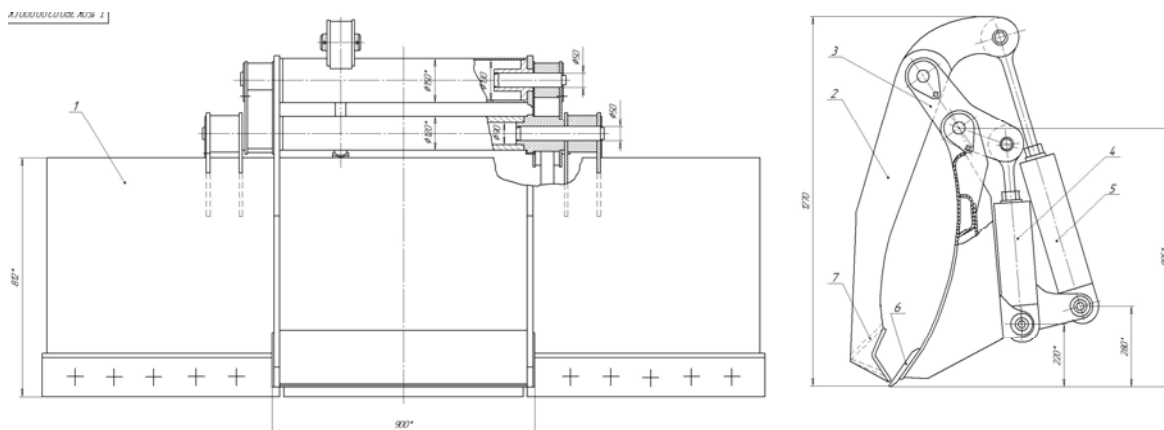


Рисунок 1 – Бульдозерне робоче устаткування з захватним пристроєм

Джерело: [9]

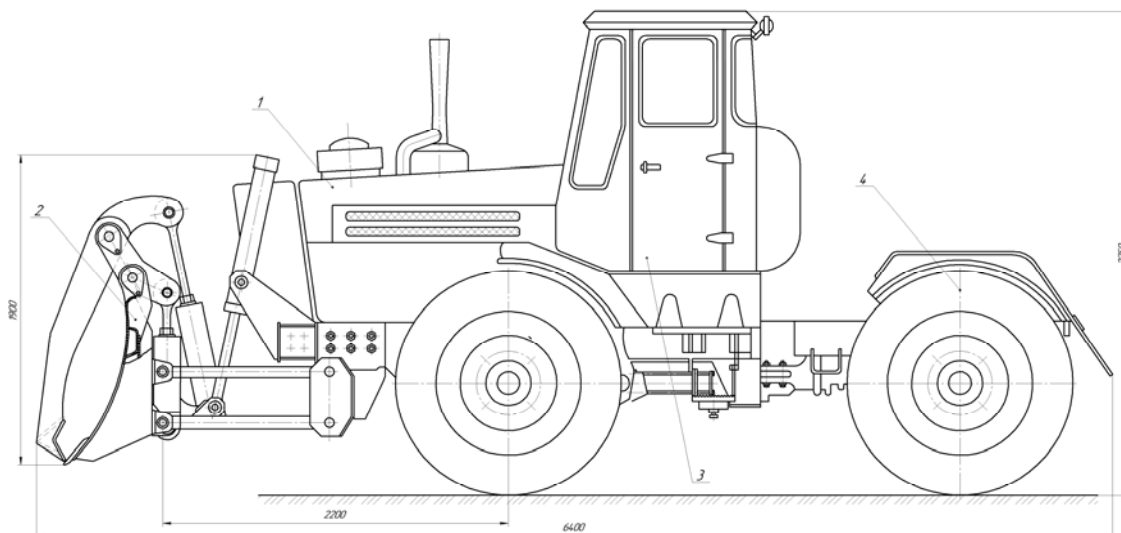


Рисунок 2 – Загальний вид робочого устаткування з захватним пристроєм на базі шарнірно-зчленованого колісного шасі

Джерело: [9]

При виконанні планувальних і зачисних робіт можна гідроциліндрами 4 і 5 і траверсою 3 притиснути рамку 2 до відвала 1, розташувавши додатковий ніж 7 на одному рівні з основним ножом 6, або вище його, досягнувши ефекту «тракторно-зміщеного» різання.



Копання ґрунтів підвищеної міцності проводиться додатковим ножем 7 притискної рамки 2, який гідроциліндрами 4 і 5 і траверсою 3 опущений в крайнє положення і притиснутий до відвала 1. При цьому площа додаткового ножа 7 нахилена до горизонту на кут  $\delta = 45 \dots 50^\circ$ .

При виконанні робіт по монтажу бордюрного каменя елементи устаткування приводяться в таке положення, коли відстань від притискної рамки 2 до ріжучої крайки основного ножа 6 відвала 1 дорівнює ширині бордюрного каменя.

Змінне робоче обладнання забезпечує:

1. Розробку і переміщення ґрунтів I-III категорій на відстань до 100 м, відривку і засипку траншей і котлованів.
2. Зведення насипів, нарізання терас, а також для виконання планувальних робіт: зачисних і підготовчих робіт основним відвалом.
3. Захоплення, фіксування та транспортування вантажів.
4. Розпушення ґрунтів IV-V категорій.
5. Корчування пнів.
6. Виймання і переміщення валунів.
7. Монтаж та демонтаж вертикальних елементів (стійки, стовпи), горизонтальних довгомірних елементів (бордюр, пішохідні плити, трубопроводи,...).

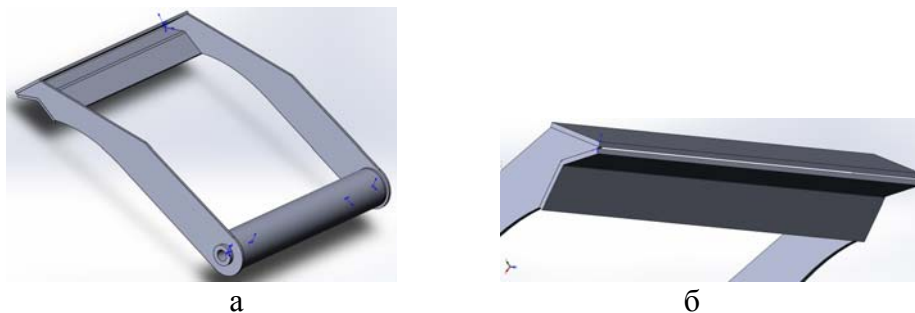
Найбільш ефективно змінне робоче обладнання може застосовуватися для будівельних, ремонтних та реконструкційних робіт.

Дослідження напруженого стану елемента робочого обладнання (притискна рамка рис. 1. поз. 2) проводилось в момент найбільшого опору по лобовій поверхні ножа. Такий стан може спостерігатися, коли притискна рамка 2 під дією робочого тиску в гідросистемі та відповідного гідроциліндра буде утримувати та переміщати необхідний вантаж. В цей момент напруження в матеріалі притискної рамки 2 досягне максимальних значень.

Вихідними даними для моделювання були: конструктивні, зокрема геометричні параметри притискної рамки, матеріал (в даному випадку прийнято сталь 10ХСНД) та зусилля, яке діє на цей елемент робочого обладнання в момент захоплення та транспортування вантажу.

Згідно класичних розрахунків це зусилля знаходиться в межах 690...710 кН.

Сталь 10ХСНД – це низьколегована конструкційна сталь, яка застосовується для виготовлення зварних металоконструкцій підвищеної міцності та корозійної стійкості. Даний матеріал виробляється відповідно до вимог стандартів ДСТУ 8817, ГОСТ 6713. Механічні властивості сталі: тимчасовий опір, 510-670 Н/мм<sup>2</sup>; межа плинності, 390 Н/мм<sup>2</sup>, відносне подовження, 19 %.



а) притискна рамка; б) робочі поверхні притискної рамки

Рисунок 3 – Об'ємне моделювання елемента робочого обладнання

*Джерело: розроблено авторами на основі [16...20]*

Нижче представлені епюри напруженого стану елемента робочого обладнання (притиска рама) під дією статичного навантаження. Епюри побудовані з використанням комп'ютерної програми «SolidWorks» [16, 17, 18, 19, 20].

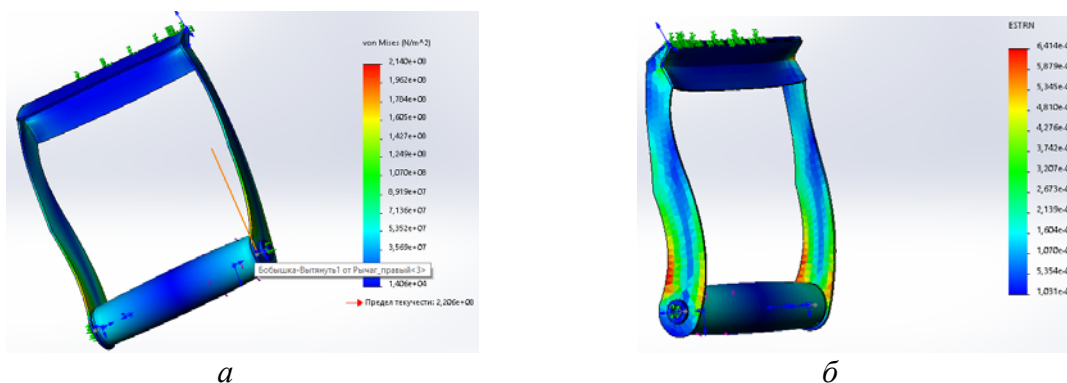


Рисунок 4 – Епюра напружень та деформацій притисної рамки  
 Джерело: розроблено авторами на основі [16...20]

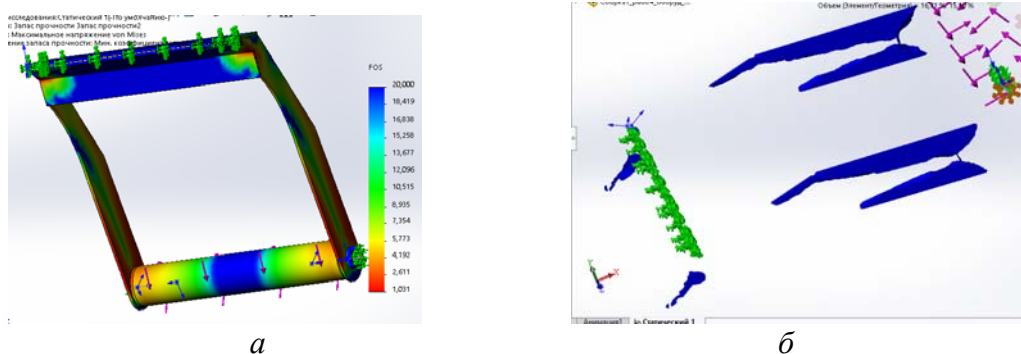
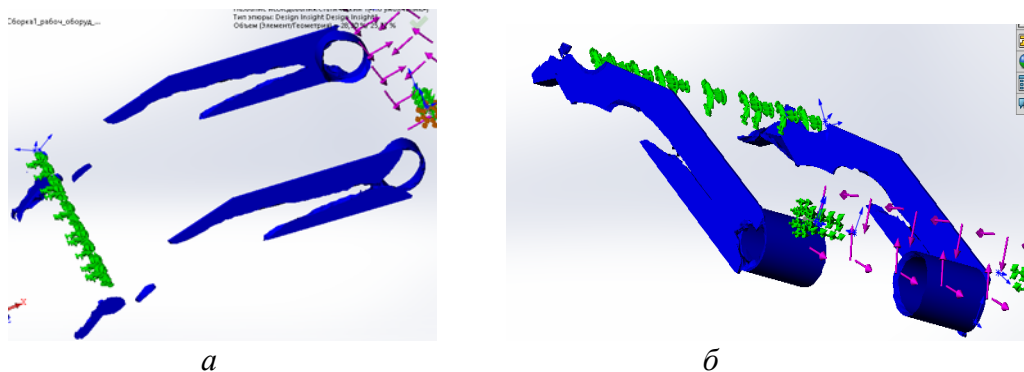


Рисунок 5 – Епюра запасу міцності притисної рамки (а) та комп'ютерна фотограма концентрації напружень при 1000000 циклів навантаження (б)  
 Джерело: розроблено авторами на основі [16...20]

По шкалі значень на епюрі запасу міцності притисної рамки (рис. 5, а), видно, що запас міцності цього елемента достатньо високий. Використання для виготовлення притисної рамки сталі 10ХСНД є доцільним.



а) 1200000 циклів навантаження; б) 1400000 циклів навантаження  
 Рисунок 6 – Комп'ютерні фотограми концентрації напружень  
 Джерело: розроблено авторами на основі [16...20]

З комп'ютерної фотографії концентрації напружень (рис. 5, б) при циклах навантаження величиною в 1000000 видно, що залишкове напруження починається з бокових елементів затискного важеля, які з'єднані трубою за допомогою зварювання, поширюється в напрямі пластин, що утворюють додаткові ножі з іншої сторони. Очевидно, що зони напруження починаються з країв бокових пластин і розповсюджуються в середину. При такій кількості циклів навантаження деталь робочого обладнання ще може деякий час працювати.

При навантаженні величиною 1200000 циклів (рис. 6, а), зони концентрації напружень значно збільшуються та починають охоплювати трубчастий елемент, що з'єднує боковини, в цьому випадку деталь робочого обладнання стає неприцездатною і потребує заміни.

На рис. 6, б комп'ютерна фотографія концентрації напружень при циклі навантаження в 1400000, це дослідження має чисто теоретичний характер тому, що в цьому випадку деталь обладнання повністю зруйнована через втомлюваність матеріалу (сталь 10ХСНД). В цьому випадку деформації досягають великих значень і в цей момент напруження переходить межу плинності матеріалу ( $390 \text{ Н/мм}^2$ ) і починається процес руйнування. А тому притискна рамка може витримувати не більше 1000000 циклів навантаження. Цього достатньо, щоб цей елемент конструкції міг працювати на протязі 8...10 років, що співрозмірно з ресурсом базової машини.

#### **Висновки:**

1. Запропонована конструкція змінного багатоцільового бульдозерно-захватного робочого обладнання розширює базові технологічні можливості класичного бульдозерного обладнання.

2. Моделювання напруженого стану елемента робочого обладнання (притискна рамка) в середовищі «SolidWorks» показало, що при статичному навантаженні в межах 710 кН, матеріал притискної рамки та його конструкція витримують робочі навантаження по всім критеріям програми «SolidWorks»: на втомлююче руйнування, на втрату стійкості, запасу міцності, деформацій та переміщень, що відбуваються при навантаженні. Навантаження, яке діє на цей елемент в процесі роботи визначалось за допомогою сформованих розрахункових схем та стандартних методик.

3. Встановлено, що деталь, яка виготовлена з сталі 10ХСНД витримує без ознак руйнування близько 1000000 циклів навантаження. Подальше збільшення кількості циклів навантаження приводить до руйнації цього елемента конструкції.

4. Як показали дослідження в програмі «SolidWorks» для виготовлення елементів робочого обладнання доцільно використовувати сталь 10ХСНД. Більш тривкі марки сталі використовувати недоцільно з економічної точки зору, а сталі з межею плинності менше ніж  $390 \text{ Н/мм}^2$  не мають достатнього запасу міцності.

#### **Список літератури**

1. Хмара Л.А., Шипілов О.С., Мусійко В.Д., Кузьмінець М.П., Пантелеєнко В.І., Карпушин С.О., Дорожні машини: навч. посіб. НТУ, 2013. 400 с.
2. С.О. Карпушин, А.С. Голуб, М.В. Чуйко. Застосування методу формування нових технічних рішень при розробці багатоцільового робочого обладнання бульдозера. *Збірник «Наука виробництву - 2011»* - Кіровоград, КНТУ, 2011. С.1271-1273.
3. Машини для земляних робіт: Підручник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, М.П. Скоблюк та ін.; за заг. ред. д.т.н., проф. Л.А. Хмари та д.т.н., проф. С.В. Кравця. Х.: ХНАДУ, 2014. 548с.
4. Хмара Л. А., Шипілов О. С., Мусійко В. Д., Кузьмінець М. П. Дорожно-строительные машины и комплексы. Днепропетровськ-Киев, 2011. 416 с.
5. ДБН В.2.3-4:2015. АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ. Ч. І. Проектування; Ч. ІІ. Будівництво, Київ, 2015. 104с.

6. ГОСТ 17.5.3.06-85 Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ (Охрана природы. Земли. Вимоги до визначення норм зняття родючого шару ґрунту при виконанні земляних робіт). Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. С. 60-63. (Межгосударственный стандарт).
7. ДБН В.2.8-9-98. Будівельна техніка, оснастка, інвентар та інструмент і експлуатація будівельних машин. Загальні вимоги. Київ: Держбуд України. 10 с.
8. Голубченко О.І., Хожило М.Е., Огляд та пропозиції конструкцій активного робочого обладнання землерійно-транспортних машин безперервної дії. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2011. Вип. 6-7. С. 48-55.
9. Пантелеенко В. И., Таран М. С. Оборудование для ремонтных и реконструкционных работ на базе колесного трактора. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин: сб. науч. тр.* 2016. №88. С.173–178.
10. Карпушин С.О., Пантелиенко В.І. Бульдозерно-розпушувальне обладнання, як альтернатива двом машинам. *Проблеми розвитку дорожньо-транспортного і будівельного комплексів: зб. тез і статей міжнар. наук.-практ. конф., 03–05 жовтня 2013 року*. Кіровоград, 2013. С.31-35.
11. Карпушин С.О., Бобров О.С. Формування ріжучих елементів робочих органів землерійних та землерійно-транспортних машин. *Проблеми і перспективи практичної реалізації наукових досліджень: матеріали XVIII Міжнар. наук.-практ. конф., Чернівці, 27-28 лютого 2015р.* Київ: Науково-видавничий центр «Лабораторія думки», 2015. С.16-19.
12. Карпушин С.О., Скриннік І.О., Пантелиенко В.І. Гнучкі елементи робочого обладнання землерійних і меліоративних машин ковшового типу. *Проблеми розвитку дорожньо-транспортного і будівельного комплексів: зб. тез і статей Міжнар. наук.-практ. конф., 03–05 жовтня 2013 року*. Кіровоград, 2013. С.35-41.
13. Робоче обладнання однокішового екскаватора: пат. 35362 Україна: МПК E02F 3/28; заявл. 29.04.2008; опубл. 10.09.2008. Бюл. №7.
14. Бульдозер: пат. 62211А Україна: МПК E02F 3/76; заявл. 30.01.2003; опубл. 15.12.2003. Бюл. №12.
15. Методологія підходів до дослідження шляхів і сукупності факторів забезпечення належного рівня ефективності і надійності транспортних систем / В. В. Аулін, В. В. Біліченко, Д. В. Голуб, Д. О. Великодний. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. № 2. С. 4-12.
16. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. BNV, 2012. 445 с.
17. Алямовский А. А., COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks, ДМК Пресс, 2010. 784 с.
18. Алямовский А. А., SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации, ДМК Пресс, 2015. 562 с.
19. Дударева Н. Ю., Загайко С. А., SolidWorks 2011 на примерах, БХВ-Петербург, 2011. 496 с.
20. Новые возможности SolidWorks. Версия 2010, SolidWorks Corporation, 2009. 212 с.

## References

1. Khmara, L.A., Shpylov, O.S., Musiiko, V.D., Kuzminets, M.P., Panteleienko, V.I. & Karpushyn, S.O. (2013). *Dorozhni mashyny [Road cars]*. NTU [in Ukrainian].
2. Karpushyn, S.O., Holub, A.S. & Chuiko, M.V. (2011). Zastosuvannya metodu formuvannya novykh tekhnichnykh rishen pry rozrobtsi bahatotsilovoho robochoho obladdnannya buldozera. *Zbirnyk «Nauka vyrobnytstvu - 2011»*. Kirovohrad, KNTU. 1271-1273 [in Ukrainian].
3. Khmara L.A., Kravets S.V. & Skobliuk M.P. (2014). *Machines for earthworks*. L.A. Khmary, S.V. Kravtsia (Ed.). Kh.: KhNADU [in Ukrainian].
4. Khmara, L. A., Shpylov, O. S, Musyiko, V. D. & Kuzmynets, M. P. (2011). *Dorozhno-stroytelnye mashyny y komplekxy [Road-building machines and complexes]*. Dnepropetrovsk-Kyev [in Russian].
5. DBN V.2.3-4:2015. AVTOMOBILNI DOROHY. Chastyna I. Proektuvannya, Chastyna II. Budivnytstvo [in Ukrainian].
6. Okhrana pryrody. Zemly. Trebovaniya k opredeleniyu norm sniatyia plodorodnoho sloia pochvy pry proyzvodstve zemlianykh rabot [Protection of Nature. Earth. Requirements for determining the norms for removing the fertile soil layer during earthworks]. (1986). HOST 17.5.3.06-85. Moskva: Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam (Mezhgosudarstvennyj standart). [in Russian].
7. Budivelna tekhnika, osnastka, inventar ta instrument i ekspluatatsiia budivelnykh mashyn. Zahalni vymohy [Construction machinery, equipment, inventory and tools and operation of construction machinery]. (1998). DBN V.2.8-9-98. Kyiv: Derzhbut Ukrainy [in Ukrainian].
8. Holubchenko, O.I. & Khozhylo, M.E. (2011). Ohliad ta propozytsii konstrukttsii aktyvnoho robochoho obladdnannya zem-leryino-transportnykh mashyn bezperervnoi dii [Review and proposals of designs of active working equipment of earthmoving machines of continuous action ]. *Visnyk Prydniprovskoi*

- derzhavnoi akademii budivnytst-va ta arkhitektury – Bulletin of the Dnieper State Academy of Civil Engineering and Architecture. Vol. 6-7. 48-55. [in Ukrainian].*
9. Panteleenko, V. Y. & Taran, M. S. (2016). Oborudovanye dlia remontnykh y rekonstruktsyonnykh robot na baze ko-lesnogo traktora [Equipment for repair and reconstruction works based on a wheeled tractor]. *Stroytelstvo. Materialovedeniye. Mashynostroeniye. Yntensyfykatsiya rabochoykh protsessov stroytelnykh y dorozhnykh mashyn - Construction. Materials Science. Mechanical engineering. Intensification of work processes of construction and road machines. 88. 173–178 [in Russian].*
  10. Karpushyn, S.O. & Pantylieiko, V.I. (2013). Buldozerno-rozpushuvalne obladnannya, yak alternatyva dvom ma-shynam [Bulldozer loosening equipment as an alternative to two machines]. *Problems of development of road transport and construction complexes: zb. tez i statei mizh-narodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (03–05 zhovtnia 2013 roku). Kirovohrad, 31-35 [in Ukrainian].*
  11. Karpushyn, S.O. & Bobrov, O.S. (2015). Formuvannya rizhuchykh elementiv robochoykh orhaniv zemlerynykh ta zemle-ryino-transportnykh mashyn [Formation of cutting elements of working bodies of earthmoving and earthmoving machines]. *Problems and prospects of practical implementation of scientific research: Mate-rialy XVIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Chernivtsi, 27-28 liutoho 2015r.). Kyiv: Naukovo-vydavnychiy tsentr «Laboratoriia dumky», 16-19 [in Ukrainian].*
  12. Karpushyn, S.O., Skrynnik, I.O. & Pantylieiko, V.I. (2013). Hnuchki elementy robochoho obladnannya zemlerynykh i melioratyvnykh mashyn kovshovoho typu [Flexible elements of the working equipment of earthmoving and reclamation machines of bucket type]. *Problems of development of road transport and construction complexes: zb. tez i statei mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (03–05 zhovtnia 2013 roku). Kirovohrad, p.35-41 [in Ukrainian].*
  13. Pat. 35362 Ukraina, Roboche obladnannya odnokivshovoho ekskavatora MPK E02F 3/28. Zaiavl. 29.04.2008; Opubl. 10.09.2008. biul. №7 Avt. Karpushyn S.O. [in Ukrainian].
  14. Pat. 62211A Ukraina, Buldozer MPK E02F 3/76. Zaiavl. 30.01.2003; Opubl. 15.12.2003. biul. №12 Avt. Karpushyn S.O., Khmara L.A., Yatsun V.V. [in Ukrainian].
  15. Aulin, V.V., Bilichenko, V.V., Holub, D.V. & Velykodnyi, D.O. (2017). Metodolohiia pidkhodiv do doslidzhennia shliakhiv i sukupnosti faktoriv zabezpechennia nalezh-noho rivnia efektyvnosti i nadiinosti transportnykh system [Methodology of approaches to the study of ways and a set of factors to ensure the appropriate level of efficiency and reliability of transport systems]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. 2. 4-12. [in Russian]*
  16. Aliamovskiy, A. A. (2012). SolidWorks Simulation. Kak reshat praktycheskye zadachy [SolidWorks Simulation. How to solve practical problems]. BNV [in Russian]
  17. Aliamovskiy, A. A. (2010). COSMOSWorks. Osnovy rascheta konstruktsyi na prochnost v srede SolidWorks [COSMOSWorks. Fundamentals of Structural Strength Analysis in SolidWork]. DMK Press [in Russian]
  18. Aliamovskiy, A. A. (2015). SolidWorks Simulation. Ynzhenernyi analiz dlia professionalov [SolidWorks Simulation. Engineering analysis for professionals]. DMK Press [in Russian]
  19. Dudareva, N. Yu. & Zahaiko, S. A. (2011). SolidWorks 2011 na prymerakh [SolidWorks 2011 by Examples]. BKhV-Peterburh [in Russian]
  20. What's New in SolidWorks. (2009). Versiya 2010, SolidWorks Corporation [in Russian]

**Volodymyr Panteleenko**, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Chervonoshtan**, Engineer, **Vadim Pushenko**, student

*State Higher Education Institution «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Dnipro, Ukraine*

**Serhii Karpushyn**, Assos. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

## **Investigation of the Stress State of Multi-purpose Variable Bulldozer-gripping Work Equipment**

The article is devoted to the development and presentation of the design of changeable, bulldozer-gripping, multi-purpose work equipment for the mobile hinge-united wheeled chassis of high passability, modeling the load on work equipment within the software "SolidWorks" to optimize process or to check geometric and weight parameters in order to justify the material for long-term resistance.

The changeable working equipment on the basis of the mobile hinge-united wheeled chassis of high passability, namely the bulldozer dump in combination with the gripping device for performance of a wide range of working operations is presented. Changeable work equipment provides: - development and movement of soils of I-III categories at a distance of up to 100 m, digging up and backfilling of trenches and ditches; - forming of embankments, cutting of terraces, performance of planning, cleaning and preparatory works by the main dump; - capture, fixing and transportation of goods; - loosening of soils of IV-V categories; - uprooting of stumps; -

extraction and movement of boulders; - installation and dismantling of vertical elements (racks, pillars), horizontal long elements (curb, paving slabs, pipeline elements,...). Also the study of the stress state of the most responsible elements of the working equipment was carried out in the software environment "SolidWorks" within the existing loads and the accepted material for their manufacture. The number of load cycles before the loss of these elements of long-term resistance beyond the yield strength of the material was determined.

The conducted researches allowed to establish:

- when modeling the stress state of the element of working equipment (clamping frame) in the environment "SolidWorks" at static load within 710 kN, the clamping frame material and its design withstand working loads according to all criteria of the program "SolidWorks": fatiguing destruction, loss of stability, margin of strength, deformation and displacement that occur under load. The load acting on this element in the process of work was determined using the formed calculation schemes and standard methods;

- the design of the clamping frame made of steel 10HSND withstands without signs of destruction of about 1,000,000 load cycles. A further increase in the number of load cycles leads to the destruction of this structural element;

- for the manufacture of elements of working equipment, it is advisable to use steel 10HSND. More durable grades of steel are inexpedient from an economic point of view, and steels with a yield strength of less than 390 N/mm<sup>2</sup> do not have a sufficient margin of safety.

**working equipment, stress state, static load, strength, «SolidWorks», pressure frame**

*Одержано (Received) 05.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 23.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**УДК 62-192(075)**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).78-87](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).78-87)

**О.І. Алфьоров**, доц., д-р техн. наук, **О.С. Гринченко**, проф., д-р техн. наук  
*Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Харків, Україна*  
*e-mail: alfogor@i.ua*

## Прогнозування і управління надійністю в умовах застосування запобіжних пристроїв з детермінованим навантаженням спрацьовування

Викладено основні теоретичні положення методології прогнозування механічної надійності в умовах багаторазового впливу випадкових екстремальних навантажень. Розглядаються способи прогнозування та управління надійністю в умовах використання запобіжних пристроїв. Наведені моделі надійності елементів і систем, які захищають від багаторазового впливу перевантажень за допомогою ЗП, у якого навантаження спрацьовування практично постійна.

**надійність, запобіжні пристрої, раптова відмова, екстремальні навантаження**

**Постановка проблеми.** В багатьох конструкціях машин та агрегатів в силу багатообразності режимів використання, умов експлуатації та функціональних особливостей елементів, а також необхідності задовольняти вагові, економічні та інші критерії, можливості управління надійністю за рахунок величини коефіцієнтів запасу бувають обмежені. Тому, широке застосування в машинах отримав спосіб запобігання раптових відмов шляхом включення в конструкцію спеціальних елементів – запобіжних пристроїв (ЗП), головне призначення яких полягає в регулюванні та обмеженні величини навантажень, які діють в екстремальних умовах на основні (оберігаємі) елементи.

© О.І. Алфьоров, О.С. Гринченко, 2021

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Поширеними механічними ЗП є запобіжні муфти [1], клапани, обмежувачі деформації пружних елементів та інші пристрої [2], які обмежують величину екстремальних навантажень і сприймаємих запобігачими елементами. Причиною застосування ЗП може бути і необхідність попередження раптових відмов у тих елементів спільно навантажуючої системи, які можуть спричинити за собою відмову решти або мати інші тяжкі наслідки.

При дослідженні системи механічної надійності, у складі яких входить ЗП, ключовим питанням є встановлення кількісних залежностей між параметрами ЗП, які визначають величини максимального навантаження, діючих на основні елементи та ймовірність безвідмовної роботи захищеного об'єкта. Встановлюючи такі залежності, які необхідні для ефективного управління надійністю, слід враховувати, що для більшості реальних механічних ЗП, як правило, характерна наявність випадкового розсіювання рівня, який обмежує максимальне навантаження ("навантаження спрацьовування" ЗП), передаване на запобігачі елементи.

Аналіз відомих конструкцій з механічними ЗП показує, що характер мінливості величини максимального навантаження, при якій спрацьовує ЗП, запобігачи основні елементи, буває двох видів. Для конструкцій з ЗП першого типу (муфти з руйнуючими при перевантаженні штифтами, обмежувачі деформації, запобіжні клапани) характерна постійність у часі навантажень спрацьовування та відсутність її залежності від величини чи чисельності відтворених екстремальних навантажень, а також від усіх інших факторів. Тому, навантаження спрацьовування таких ЗП можна вважати фіксованою у часі випадковою величиною, ступінь початкового розсіювання якої визначається, наприклад, розсіюванням міцності штифтів муфт або жорсткості клапанних пружин.

Другий тип конструкцій з ЗП (фрикційні, кулачкові або шарикові муфти), в яких навантаження спрацьовування визначається величиною сил зчеплення (як правило, сил тертя) між елементами та може залежати від динаміки процесу навантаження, характеризується тим, що тут навантаження на спрацьовування в часі нестабільне і може випадковим способом змінюватися при кожному екстремальному навантаженні. При побудові моделей надійності ці особливості реальних конструкцій з ЗП необхідно враховувати [3-9].

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо простіший варіант конструктивної схеми, яка складається з основного елемента, захищеного від перенавантаження ідеалізованим ЗП з постійною детермінованою величиною навантаження спрацьовування  $D = \text{const}$ . Це відповідає випадку, коли розсіюванням навантажень спрацьовування ЗП першого типу можна нехтувати. Таке ЗП перетворює будь-яке безперервне розподілення екстремальних навантажень з функцією розподілу  $F(P_n)$  в куснево-безперервне [6, 10], функція розподілу якого має вид

$$\tilde{F}(P_n) = \begin{cases} \frac{F(P_n)}{F(D)}, & \text{при } P_n < D; \\ 1, & \text{при } P_n \geq D. \end{cases} \quad (1)$$

Тоді, якщо  $g(P_n)$  і  $G(P_n)$  – щільність і функція розподілу несучої здатності основного елемента, то із застосуванням ЗП його ймовірність безвідмовної роботи при випадковому  $m$ -кратному екстремальному навантаженні буде визначатися виразом:

$$R_m(D) = \int_0^{\infty} [\tilde{F}(P)]^m g(P) dP = \frac{\int_0^D F^m(P) g(P) dP}{F^m(D)} + 1 - G(D). \quad (2)$$

Переходячи до одиничних розподілів можна переписати (2) у вигляді

$$R_m(D) = \frac{\int_0^{G(D)} [F_1(G)]^m dG}{F^m(D)} + 1 - G(D). \quad (3)$$

З огляду на те, що перший доданок в (3) при  $m \rightarrow \infty$  прагне до нуля, ймовірність безвідмовної роботи елемента з ЗП обмежена знизу значенням  $R_\infty(D) = 1 - G(D)$ , яке забезпечується при будь-якому числі екстремальних навантажень і будь-якому законі розподілу екстремальних навантажень.

Якщо екстремальне навантаження і несуча здатність елемента мають однакові коефіцієнти варіації і розподілені за законом Вейбулла, то

$$F(P_H) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{P_H}{a_H}\right)^b\right];$$

$$G(P_H) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{P_H}{a_H}\right)^b\right]. \quad (4)$$

Тоді з (3) випливає, що

$$R_m(D) = \frac{\frac{b}{a_H} \int_0^D \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{P}{a_H}\right)^b\right]\right\}^m \left(\frac{P}{a_H}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{P}{a_H}\right)^b\right] dP}{\left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{D}{a_H}\right)^b\right]\right\}^m} + \exp\left[-\left(\frac{D}{a_H}\right)^b\right]. \quad (5)$$

В окремому випадку при  $m = 1$  після інтегрування з (5) отримуємо вираз для ймовірності безвідмовної роботи при першому навантаженні елемента, захищеного ЗП:

$$R_1(D) = \frac{\frac{a_H^b}{a_H^b + a_H^b} \left(1 - \exp\left[-\left[\left(\frac{D}{a_H}\right)^b + \left(\frac{D}{a_H}\right)^b\right]\right]\right)}{1 - \exp\left[-\left(\frac{D}{a_H}\right)^b\right]}. \quad (6)$$

Введемо відносний параметр, який характеризує настройку ЗП і визначається співвідношенням його навантаження спрацьовування до середнього значення зовнішнього екстремального навантаження, яка діяла б на елемент при відсутності ЗП:

$M = D/P_H$ . При цьому вираз (6) набуває вигляду:

$$R_1(M) = \frac{R_1 \left\{1 - \exp\left[-M^b \Gamma^b\left(1 + \frac{1}{b}\right) / R_1\right]\right\}}{1 - \exp\left[-M^b \Gamma^b\left(1 + \frac{1}{b}\right)\right]}, \quad (7)$$



де  $R_1 = \bar{K}^b / (\bar{K}^b + 1)$  - ймовірність безвідмовної роботи елемента без ЗП при першому навантаженні;

$$\bar{K} = \frac{\bar{P}_n}{P_n} = \frac{a_n}{a_n} - \text{коефіцієнт запасу у елемента без використання ЗП.}$$

У загальному випадку багаторазового навантаження елемента, захищеного ЗП, ймовірність безвідмовної роботи зручно визначати на основі (3), використовуючи чисельне інтегрування, за допомогою виразу

$$R_m(M) = \frac{\int_0^{G(M)} [1 - (1-G)^{\bar{K}^b}]^m dG}{\left\{1 - \exp\left[-M^b \Gamma^b \left(1 + \frac{1}{b}\right)\right]\right\}^m} + \exp\left[-\frac{M^b \Gamma^b \left(1 + \frac{1}{b}\right)}{\bar{K}^b}\right], \quad (8)$$

$$\text{де } G(M) = 1 - \exp\left[-\frac{M^b \Gamma^b \left(1 + \frac{1}{b}\right)}{\bar{K}^b}\right].$$

З (8) випливає, що при будь-якому законі розподілу екстремальних навантажень та функції розподілу несучої здатності виду (4) нижня межа ймовірності безвідмовної роботи при  $m \rightarrow \infty$  визначається формулою

$$R_\infty(M) = \exp\left[-\frac{M^b \Gamma^b \left(1 + \frac{1}{b}\right)}{\bar{K}^b}\right]. \quad (9)$$

За допомогою (9) легко отримати вираз для розрахунку величини параметра настройки ЗП, що гарантує задану ймовірність безвідмовної роботи  $\gamma$  при будь-якому числі екстремальних навантажень

$$M_\gamma = \frac{\bar{K} \left(\ln \frac{1}{\gamma}\right)^{1/b}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{b}\right)}. \quad (10)$$

Розрахунки ймовірності безвідмовної роботи, проведені за допомогою виразів (7) та (8), показують, що зі зменшенням величини параметра настройки  $M$  збільшується ймовірність безвідмовної роботи елемента, захищеного ЗП. В якості ілюстрації цього на рис.1 наведені графіки (суцільні лінії 1, 2 і 3) зміни ймовірності безвідмовної роботи елемента з ЗП в залежності від числа навантажень, які відповідають зменшуваним значенням параметра настройки  $M$ : 1,1; 1,0 і 0,9.

Графіки побудовані для випадку, коли коефіцієнт запасу  $\bar{K} = 1,3$ , а коефіцієнти варіації навантаження і несучої здатності  $V_n = V_n = 0,1$ , що відповідає значенню параметра форми  $b = 12,15$ . Штриховою лінією на рис.1 показаний графік зменшення ймовірності безвідмовної роботи у елемента, який не захищений ЗП.

Як видно з рис.1 використання ЗП при  $M = 0,9 \div 1,0$  в даному випадку дозволяє різко підвищити ймовірність безвідмовної роботи елемента в порівнянні з варіантом, коли захист від перевантажень відсутній. Характерно також, що після деякого числа ( $m \approx 20$ ) екстремальних навантажень рівень ймовірності безвідмовної роботи встановлюється на значенні, яке практично збігається з її нижньою межею і визначається виразом (9).

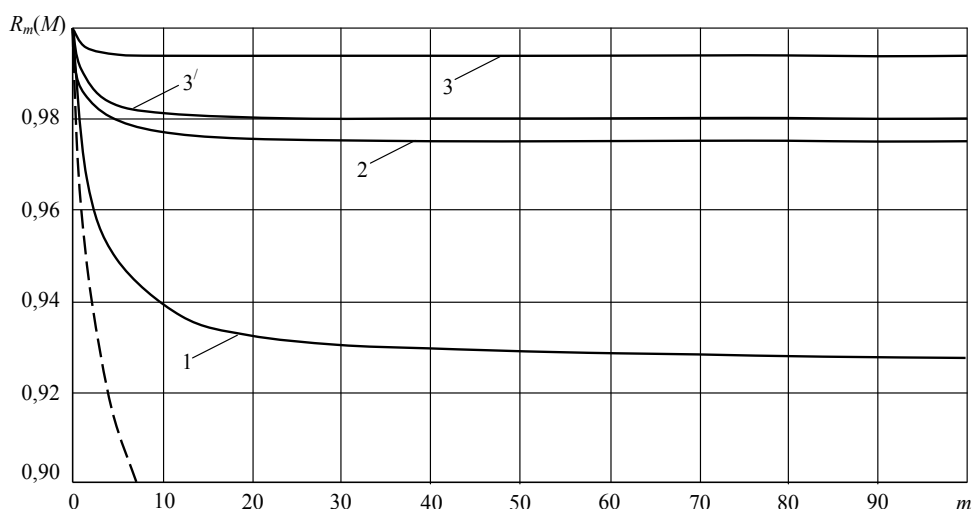


Рисунок 1 – Графіки залежності ймовірності безвідмовної роботи від числа екстремальних навантажень: — 1 – елемент з ЗП, при  $M = 1,1$ ; 2 – елемент з ЗП, при  $M = 1,0$ ; 3 – елемент з ЗП, при  $M = 0,9$ ; 3' – послідовна система з ЗП при  $n = 3$ ;  $M = 0,9$ ; - - - - елемент без ЗП.

Джерело: розроблено автором

При використанні ЗП слід враховувати, що можливості підвищення ймовірності безвідмовної роботи тільки за рахунок зменшення навантаження спрацьовування ЗП (параметра настройки  $M$ ) на практиці бувають обмежені [6]. Це відбувається через те, що при нормальному робочому режимі навантаження елемента ймовірність спрацьовування ЗП повинна бути досить малою, щоб не порушувався технологічний процес, який виконується машиною. Тому, раціональний рівень параметра настройки при проектуванні можна вибрати, керуючи двома величинами:  $M$  і  $\bar{K}$ . Як впливає з (10), відношення  $M_\gamma / \bar{K}$  залежить тільки від заданої ймовірності безвідмовної роботи  $\gamma$ . Отже, можна спочатку визначити мінімальний рівень параметра настройки  $M_{\min}$ , виходячи з допустимої ймовірності спрацьовування ЗП в робочому режимі навантаження елемента, а потім розрахувати величину коефіцієнта запасу  $\bar{K}_\gamma$ , який забезпечує задану ймовірність безвідмовної роботи  $\gamma$  при екстремальному навантаженні [6]:

$$\bar{K}_\gamma = \frac{M_{\min} \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)}{\left(\ln \frac{1}{\gamma}\right)^{1/b}}. \quad (11)$$

Так, наприклад, якщо ордината  $P_o$  ергодичного стаціонарного випадкового процесу навантаження елемента в робочому режимі розподілена в будь-якому перетині процесу за законом Вейбулла з функцією розподілу

$$F(P_o) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{P_o}{a_o}\right)^{b_o}\right],$$

то ймовірність перевищення робочим навантаженням деякого мінімального рівня навантаження спрацьовування  $D_{\min}$  визначається виразом

$$\text{Вер}(P_o > D_{\min}) = \exp \left[ - \left( \frac{D_{\min} \Gamma \left( 1 + 1/b_o \right)}{\bar{P}_o} \right) \right],$$

де  $\bar{P}_o$  – середня величина робочого навантаження на елемент.

Позначимо  $\alpha_o$  – допустиму величину цієї ймовірності, яка збігається з ймовірністю спрацьовування ЗП в робочому режимі. Тоді, відповідний мінімальний рівень параметра настройки ЗП визначається формулою

$$M_{\min} = \frac{D_{\min}}{\bar{P}_n} = \frac{\bar{P}_o \left( \ln 1/\alpha_o \right)^{1/b_o}}{\bar{P}_n \Gamma \left( 1 + 1/b_o \right)}.$$

Ці значення можна потім використовувати при визначенні коефіцієнта запасу  $\bar{K}_\gamma$  за формулою (11).

При детермінованому підході до проектувального розрахунку запобіжних муфт в технічній літературі [1] рекомендують регламентувати тільки величину відносини  $D_{\min}/\bar{P}_o$ , приймаючи його рівним 1,25. Якщо, наприклад, коефіцієнт варіації навантаження в робочому режимі  $V_o = 0,15$ , то при цьому значенні зазначеного відношення ймовірність спрацьовування муфти в робочому режимі навантаження оберігаємого елемента, виходячи з наведених вище виразів становитиме  $\alpha_o = 0,0269 \approx 2,7\%$ . Однак, при такому односторонньому підході до вибору параметрів ЗП залишатиметься невизначеною його ефективність у виконанні основного завдання - захисту охороняємого об'єкту від перевантажень. Тому, забезпечуючи надійність об'єкта, слід узгоджувати рівень навантаження спрацьовування  $D_{\min}$  з коефіцієнтом запасу елемента, що розраховується без врахування впливу ЗП з екстремальних навантажень:  $\bar{K} = \bar{P}_n/\bar{P}_o$ . Необхідно враховувати при цьому і величину коефіцієнта варіації несучої здатності елемента.

Так, наприклад, якщо взяти  $D_{\min}/\bar{P}_o = 1,25$ , то в разі, коли середня величина екстремального навантаження  $\bar{P}_n = 1,5 \bar{P}_o$ , отримаємо, що  $M_{\min} = 0,833$ . Тоді, для гарантованого забезпечення ймовірності безвідмовної роботи елемента, який оберігається,  $\gamma = 0,999$  з (11) впливає, що при коефіцієнті варіації несучої здатності елемента  $V_n = 0,1$  необхідно також, щоб коефіцієнт запасу становив не менше 1,41.

Якщо навантаження і несуча здатність розподілені по логарифмічно логістичному закону з однаковими параметрами форми і, отже, відповідні функції розподілу мають вигляд:

$$F(P_n) = \frac{\left( P_n/C_n \right)^v}{1 + \left( P_n/C_n \right)^v}; \quad G(P_n) = \frac{\left( P_n/C_n \right)^v}{1 + \left( P_n/C_n \right)^v},$$

то з (2) отримаємо, що

$$R_m(D) = \frac{v \cdot \left[1 + \left(\frac{D}{C_n}\right)^v\right]^m}{C_n \left(\frac{D}{C_n}\right)^{vm}} \int_0^D \frac{\left(\frac{P}{C_n}\right)^{vm} \cdot \left(\frac{P}{C_n}\right)^{v-1} dP}{\left[1 + \left(\frac{P}{C_n}\right)^v\right]^m \left[1 + \left(\frac{P}{C_n}\right)^v\right]^2} + \frac{1}{1 + \left(\frac{D}{C_n}\right)^v}. \quad (12)$$

Коли  $m = 1$ , то з (12) після інтегрування, позначивши  $q_o = \left(\frac{C_n}{C_n}\right)^v$ , отримаємо вираз для ймовірності безвідмовної роботи при першому екстремальному навантаженні елемента з ЗП:

$$R_1(D) = \begin{cases} \frac{1}{1 - q_o} + \frac{q_o \left[ q_o + \left(\frac{D}{C_n}\right)^v \right]}{(1 - q_o)^2 \left(\frac{D}{C_n}\right)^v} \ln \frac{q_o \left[ 1 + \left(\frac{D}{C_n}\right)^v \right]}{q_o + \left(\frac{D}{C_n}\right)^v}; & \text{при } q_o \neq 1; \\ \frac{2 + \left(\frac{D}{C_n}\right)^v}{2 \left[ 1 + \left(\frac{D}{C_n}\right)^v \right]}; & \text{при } q_o = 1. \end{cases} \quad (13)$$

У загальному випадку при  $m > 1$  зручно визначати ймовірність безвідмовної роботи, виходячи з (3), з використанням чисельного інтегрування функції одиничного розподілу. Після переходу до відносного параметру настройки  $M$  відповідний вираз набуває вигляду

$$R_m(M) = \frac{\bar{K}^{vm} \left[ 1 + M^v \left( \frac{\pi}{v \sin \frac{\pi}{v}} \right)^v \right]^m}{M^{vm} \left( \frac{\pi}{v \sin \frac{\pi}{v}} \right)^{vm}} \int_0^{G(M)} \frac{G^m dG}{\left[ (1 - G) + \bar{K}^v G \right]^m} + \frac{\bar{K}^v}{\bar{K}^v + M^v \left( \frac{\pi}{v \sin \frac{\pi}{v}} \right)^v}, \quad (14)$$

$$\text{де } \bar{K} = \frac{C_n}{C_n}, \quad G(M) = \frac{M^v \left( \frac{\pi}{v \sin \frac{\pi}{v}} \right)^v}{\bar{K}^v + M^v \left( \frac{\pi}{v \sin \frac{\pi}{v}} \right)^v}.$$

З (14) випливає, що при будь-якому законі розподілу екстремальних навантажень, якщо несуча здатність розподілена логарифмічно логістично, то нижня межа ймовірності безвідмовної роботи визначається з виразу:

$$R_\infty(M) = \frac{\bar{K}^v}{\bar{K}^v + M^v \left( \frac{\pi}{v \sin \frac{\pi}{v}} \right)^v}, \quad (15)$$

а формула для розрахунку величини параметра настройки ЗП, яка гарантує задану ймовірність безвідмовної роботи  $\gamma$ , має вигляд

$$M_{\gamma} = \frac{\bar{K} v \sin \frac{\pi}{v}}{\pi} \left( \frac{1-\gamma}{\gamma} \right)^{\frac{1}{v}}. \quad (16)$$

Порівняльний аналіз результатів розрахунків, проведених за допомогою формул (9) і (15) показав, що в умовах невизначеності щодо виду закону розподілу несучої здатності для того, щоб гарантувати досить високу (нижню межу) ймовірності безвідмовної роботи:  $R_{\infty}(M) > 0,9$  при виборі величин параметра настройки  $M$  і коефіцієнта запасу  $\bar{K}$  слід використовувати вирази (10) і (11).

Для багатьох реальних конструкцій з ЗП буває доцільно розглядати захищаний об'єкт, як систему, що складається з декількох елементів. При побудові моделей надійності в цьому випадку необхідно враховувати структуру системи і кількість її елементів. Найбільш поширеними в машинах є системи з послідовною в сенсі надійності структурою, коли відмова будь-якого елемента призводить до відмови всієї системи. У разі спільно навантаженої послідовної системи, що складається з  $n$  однакових рівнонавантажених елементів і захищених від перевантажень ЗП з постійним навантаженням спрацювання, використовуючи одиничні розподілення, можна за аналогією з (3) отримати вираз для ймовірності безвідмовної роботи у вигляді

$$R_{cm}(D) = \frac{n}{F^m(D)} \int_0^{G(D)} (1-G)^{n-1} [F_1(G)]^m dG + [1-G(D)]^n. \quad (17)$$

Якщо випадкові величини навантаження на систему та міцності її елементів мають розподіл Вейбула з однаковими коефіцієнтами варіації, то з (17) випливає, що

$$R_{cm}(M) = \frac{n \int_0^{G(M)} (1-G)^{n-1} [1 - (1-G)^{K^b}]^m dG}{\left\{ 1 - \exp\left[-M^b \Gamma^b \left(1 + \frac{1}{b}\right)\right]\right\}^m} + \exp\left[-\frac{nM^b \Gamma^b \left(1 + \frac{1}{b}\right)}{\bar{K}^b}\right]. \quad (18)$$

На рис.1 наведені результати розрахунку за допомогою (18) ймовірності безвідмовної роботи послідовної системи (крива 3'), яка складається з трьох рівнонавантажених елементів при  $\bar{K} = 1,3$ ;  $V_n = V_n = 0,1$  та величини параметру настройки ЗП:  $M = 0,9$ . Цей графік показує на скільки зменшується ймовірність безвідмовної роботи послідовної системи, захищеної ЗП, в порівнянні з ймовірністю безвідмовної роботи одного її елемента (крива 3).

У разі, якщо ЗП призначені для захисту спільно навантаженої системи, яка складається з  $n$  рівнонавантажених елементів і має паралельну структуру, то можна отримати вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи цієї системи у вигляді:

$$\tilde{R}_{cm}(D) = \frac{n}{F^m(D)} \int_0^{G(D)} G^{n-1} (F_1(G))^m dG + 1 - G^n(D). \quad (19)$$

**Висновки.** Наведені вище моделі надійності елементів і систем, які захищені від багаторазового впливу перевантажень за допомогою ЗП, у якого навантаження спрацювання практично постійна, можуть слугувати теоретичною основою при проектуванні і модернізації елементів машин для того, щоб раціональним чином управляти надійністю.

## Список літератури

1. Ряховский О.А., Иванов С.С. Справочник по муфтам. Л.: Политехника, 1991. 384 с.
2. Ничке В.В. Надежность прицепного и навесного оборудования тракторов. Вища школа, 1985. 152

- с.
3. Гринченко А.С., Земницкий А.В. Влияние параметров предохранительных муфт на прочностную надежность элементов машин. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2005. Вип. 33. С. 106-112.
  4. Гринченко А.С., Земницкий А.В. Экспериментальное исследование процесса срабатывания фрикционной предохранительной муфты. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2005. Вип. 41. С. 381-386.
  5. Гринченко А.С. Прогнозирование и обеспечение надежности элементов машин при перегрузочных отказах. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. К. 2002. Вип. 49. С. 83-89.
  6. Grynchenko O., Alfyorov O. Mechanical Reliability. Prediction and Management Under Extreme Load Conditions. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 125 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41564-8> (дата звернення 2021)
  7. McPherson J.W. Reliability Physics and Engineering: Time-To Failure Modeling. Springer, Cham 2019
  8. Birolini A. Reliability Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.
  9. S. Woo Reliability Design of Mechanical Systems A Guide for Mechanical and Civil Engineers. 2nd edition: Springer Nature Singapore Pte Ltd.б 2020. 476 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7236-0> (дата звернення: 09.04.2021)
  10. Гринченко А.С. Модели надежности элементов и систем при защите от перегрузок с помощью предохранительных устройств. *Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні: Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2009. Вип. 76. С. 155-161.

## Referencis

1. Ryakhovsky, O.A. & Ivanov, S.S. (1991). *Spravochnik po muftam [Handbook of couplings]*. L .: Polytechnic [in Russian].
2. Nitschke, V.V. (1985) . *Nadezhnost' pricepnogo i navesnogo oborudovanija traktorov [Reliability of trailed and attached equipment of tractors]*. Vishcha school [in Russian].
3. Grynchenko, A.S. & Zemnitsky, A.V. (2005). Influence of safety clutch parameters on the strength reliability of machine elements [The influence of the parameters of safety couplings on the strength reliability of machine elements]. *Visnik KhNTUSG im. Petra Vasilenka – Bulletin of KhNTU of Agriculture. P. Vasilenko. Vol. 33*. 106-112[in Russian].
4. Grynchenko, A.S. & Zemnitsky, A.V. (2005). Jeksperimental'noe issledovanie processa srabatyvanija frikcionnoj predohranitel'noj mufty [Experimental study of the actuation process of a friction safety clutch]. *Visnik KhNTUSG im. Petra Vasilenka - Bulletin of KhNTU of Agriculture. P. Vasilenko. Vol. 41*. 381-386 [in Russian].
5. Grynchenko, A.S. (2002). Prognozirovanie i obespechenie nadezhnosti jelementov mashin pri peregruzochnyh otkazah [Forecasting and ensuring the reliability of machine elements in case of overload failures]. *Naukovyj visnyk Natsional'noho ahrarnoho universytetu – Scientific Bulletin of the National Agrarian University. K. Vip. 49.S. 83-89* [in Russian].
6. Grynchenko O. & Alfyorov O. (2020). Mechanical Reliability. Prediction and Management Under Extreme Load Conditions. Springer Nature Switzerland AG,. 125 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41564-8> [in English].
7. McPherson, J.W. (2019). Reliability Physics and Engineering: Time-To Failure Modeling. Springer, Cham 2019 [in English].
8. Birolini A. (2017). Reliability Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg [in English].
9. Woo S. (2020). Reliability Design of Mechanical Systems A Guide for Mechanical and Civil Engineers. 2nd edition: Springer Nature Singapore Pte Ltd. 476 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7236-0> [in English].
10. Grynchenko A.S. Reliability models of elements and systems for overload protection using safety devices. *Technical service of the agro-industrial complex, technology and technology for the agricultural machinery and equipment: Bulletin of KhNTUSG im. Petra Vasilenka. Kharkiv*. 2009. Vip. 76 .-- S. 155-161 [in Russian].

**Aleksey Alfyorov**, Assoc. Prof., DSc., **Oleksander Grynchenko**, Prof., DSc.  
*Vasylenko National Technical University of Agriculture Kharkov Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

## **Predicting and Managing Reliability in the Application of Safety Devices with Deterministic Tripping Load**

Reliability prediction of machinery parts being designed is primarily aimed at avoiding mechanical failures in service, caused by the influence of force mechanical interaction of parts among themselves and with the environment. Special attention should be given to sudden mechanical failures due to the fact that their development, unlike gradual failures, as a rule, does not lend itself to individual diagnosis and prevention. In addition, as practice shows, sudden failures can often occur in the initial operation period of the equipment, which adversely affects its competitiveness when it is introduced to the market.

Most transport, agricultural, road-building and other mobile machines has operating conditions, use modes, and, therefore, modes of mechanical loads of elements with a wide range of variation. Most time, a machine normally operates under normal (nominal) load conditions, whereby long-term performance and durability should be provided. However, in some relatively rare cases, some parts of machines experience short-term and repeatedly repeated effects of extreme loads close to breaking or inelastic material deforming material details.

The book is devoted to a brief review of the fundamentals of one of the many directions of science of reliability - predicting risks of sudden mechanical failures and associated reliability indicators.

The safety factor is a generalized parameter which in many respects determines the future material consumption and the cost price of the designed product. Therefore, dependencies linking the safety factors of the machine parts with the predicted reliability indexes allows, at the design stage, to choose a rational and economically feasible option to ensure a sufficient level of reliability. The same concerns justification for using safety devices that provide mechanical reliability. Therefore, the use of a set of methods for forecasting and managing reliability stated in the book should improve the efficiency of work related to the design of engineering products.

The above reliability models of elements and systems protected from repeated impact of overloads by means of a safeguard with a nearly constant actuation load can serve as a theoretical basis when being designed and during modernization of machinery elements to manage reliability rationally.

**reliability, safety devices, sudden failure, extreme loads**

*Одержано (Received) 29.03.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 09.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.513.5

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).88-93](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).88-93)**Borys Goncharenko**, Prof., DSc.*National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine***Larysa Vikhrova**, Prof., PhD tech. sci., **Mariia Miroshnichenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.*Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine**e-mail: goncharenkobn@i.ua, vihrovalg@ukr.net*

### Optimal control of nonlinear stationary systems at infinite control time

The article presents a solution to the problem of control synthesis for dynamical systems described by linear differential equations that function in accordance with the integral-quadratic quality criterion under uncertainty. External perturbations, errors and initial conditions belong to a certain set of uncertainties. Therefore, the problem of finding the optimal control in the form of feedback on the output of the object is presented in the form of a minimum problem of optimal control under uncertainty. The problem of finding the optimal control and initial state, which maximizes the quality criterion, is considered in the framework of the optimization problem, which is solved by the method of Lagrange multipliers after the introduction of the auxiliary scalar function - Hamiltonian. The case of a stationary system on an infinite period of time is considered. The formulas that can be used for calculations are given for the first and second variations.

It is proposed to solve the problem of control search in two stages: search of intermediate solution at fixed values of control and error vectors and subsequent search of final optimal control. The solution of -optimal control for infinite time taking into account the signal from the compensator output is also considered, as well as the solution of the corresponding matrix algebraic equations of Riccati type.

**minimax control, robustness, systems with uncertainties, optimization, matrix form**

**Formulation of the problem.** Initially, the main results of research on linear automatic control systems were the concept of stability and its criteria based on characteristic polynomials. With the development of radio engineering and electronic automatic systems, frequency research methods became the main ones, which later spread to pulsed, discrete and nonlinear systems in connection with the development of computer technology. The progress of cosmonautics has led to the study of automatic systems in the space of states, the idea of optimizing control systems with the simultaneous optimization of their quality indicators.

Subsequent progress has made it possible to combine frequencies with methods of state space research, which, in addition to optimization, has made it possible to solve problems with any uncertainties - robust control. In this case, the uncertainty of the frequency response of control objects is limited in the  $H^\infty$ -norm and can be specified in both parametric and matrix form when describing the state in space [1].

**Analysis of recent and publication.** The theory of robust control [4] has intrigued scientists since the 90s, although some fundamental ideas of robustness (for example, the allocation of areas of stability in the parameter space) come from Vyshnegradsky. The first results in this area concerned the analysis of systems with uncertainties – it was possible to construct robust analogs of the main criteria of stability of linear systems. Serious results were obtained in robust synthesis (design of regulators for robust systems).



The practical value of the use of robust control is due to the fact that synthesized by the criteria of stability, the optimal control system may be less sensitive to changes in parameters or greater. In the first case, talk about the roughness of the system or its robustness, in the second - the system is virtually inoperable, because at least the deviation of the parameters (their uncertainty) leads to a loss of stability [5]. Thus, the formulation of the problem of robust control is associated with the requirement to maintain the efficiency of the system in the presence of uncertainties in its description.

There are three types of uncertainties: parametric, when the parameters of the object are inaccurately known; structural, when the exact structure of the object is not known; mixed when both parameters and structure are incorrectly set.

The system will be stable robust if, according to the root criterion of stability, all the roots of its characteristic equation lie in the left complex root half-plane.

In the theory of robust control, the concept of in  $H_\infty$  and  $H^2$  norm stability is used. For one-dimensional systems, the  $H_\infty$  norm is the maximum of the modulus of the frequency transfer function (amplitude-phase characteristic) when the frequency changes from zero to infinity. For example, the oscillation index is the  $H_\infty$  norm of a transfer function that relates a controlled variable to a setpoint [6].

The use of the  $H_\infty$  norm allowed us to use known methods of the theory of functions of a complex variable (Nehari's theorem, Nevanlin-Peak interpolation) to construct an optimal control that provides a minimum of this norm. Later, a construction method was proposed  $H_\infty$ - suboptimal control, the so-called 2-Riccati approach, which develops the results obtained in the development of optimal stochastic systems, in the case where external perturbations and interferences are unknown damping functions with unknown statistical characteristics, or  $H^2$  approach [7,8].

**Statement of the objective.** For uncertainty conditions, it is fruitful to use a minimax approach, when there is an optimal regulator for the state of the object, which operates in conditions of uncertainty so that it minimizes the maximum error (deviation of the current state of the system from the set or desired) from many possible values. perturbations that may affect an object or system. However, the way to solve this problem is not always obvious [2], and its search requires additional research [9].

Consider a dynamic object described by the following system of differential equations [3].

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = A(t)x(t) + B(t)u(t) + F_w(t)w(t), & t_0 < t < T, \\ x(t_0) = F_0x_0, \end{cases} \quad (1)$$

where  $x(t) \in R^{n_x}$  – state vector,  $u(t) \in R^{n_u}$  – control vector,  $w(t) \in R^{n_w}$  – unknown vector of extremal perturbations acting on the object,  $x_0 \in R^{n_0}$  – unknown vector of initial conditions,  $A(t) \in R^{n_x \times n_x}$ ,  $B(t) \in R^{n_x \times n_u}$ ,  $F_w(t) \in R^{n_x \times n_w}$ ,  $F_0 \in R^{n_x \times n_0}$  – given matrices of corresponding dimensions.

Consider and choose an integral-quadratic criterion for the quality of the object in the form

$$I(u) = \int_{t_0}^T \left( x^T(t) G_x(t) x(t) + u^T(t) G_u(t) u(t) \right) dt + x^T(T) G_f x(T), \quad (2)$$

where  $y(t) \in R^{n_y}$  – the result of observation,  $v(t) \in R^{n_v}$  – unknown errors (obstacles) of measurements,  $C(t) \in R^{n_y \times n_x}$ ,  $F_v(t) \in R^{n_y \times n_v}$  – known matrices.

Consider and choose an integral-quadratic criterion for the quality of the object in the form

$$I(u) = \int_{t_0}^T \left( x^T(t) G_x(t) x(t) + u^T(t) G_u(t) u(t) \right) dt + x^T(T) G_f x(T), \quad (3)$$

where  $G_x(t) \in R^{n_x \times n_x}$ ,  $G_u(t) \in R^{n_u \times n_u}$ ,  $G_f \in R^{n_x \times n_x}$  – given symmetric weight matrices, and it is assumed that they satisfy the conditions  $G_x(t) = G_x^T(t) \geq 0$ ,  $G_u(t) = G_u^T(t) > 0$ ,  $G_f = G_f^T \geq 0$ .

Here "  $T$  " – means the operation of transposing the matrix,  $G = G^T$  – means that the matrix  $G$  is symmetric,  $G > 0$  ( $G \geq 0$ ) – the condition of positive (non-negative) certainty of the matrix, i.e. the matrix  $G$  has positive or non-negative eigenvalues.

Regarding the unknown vector of external perturbations  $w(t)$ , the vector of measurement errors  $v(t)$  and the vector of initial conditions  $x_0$ , it is assumed that they belong to the next set of permissible perturbations (unsertainties).

$$\Omega_\xi = \left\{ \xi : \xi = (w(t), v(t), x_0), w(t) \in L_2(t_0, T), v(t) \in L_2(t_0, T), x_0 \in R^{n_0}; \|\xi\|^2 \leq 1 \right\}, \quad (4)$$

where the norm  $\|\xi\|$  of the vector-valued function  $\xi$  is determined by the following expression

$$\|\xi\|^2 = \int_{t_0}^T \left( w^T(t) R_w(t) w(t) + v^T(t) R_v(t) v(t) \right) dt + (x_0 - \hat{x}_0)^T R_0 (x_0 - \hat{x}_0), \quad (5)$$

in which  $R_w(t) \in R^{n_w \times n_w}$ ,  $R_v(t) \in R^{n_v \times n_v}$ ,  $R_0 \in R^{n_0 \times n_0}$  – given weight matrices, and  $R_w(t) = R_w^T(t) \geq 0$ ,  $R_v(t) = R_v^T(t) > 0$ ,  $R_0 = R_0^T \geq 0$ ,  $\hat{x}_0 \in R^{n_0}$  – known vector, in the vicinity of which is an unknown vector of the initial condition  $x_0$  [4].

In addition, in (4) through  $L_2(t_0, T)$  the denoted set of vector-integrated square functions, ie

$$L_2(t_0, T) = \left\{ f(t) \in R^n : \int_{t_0}^T f^T(t) f(t) dt = \int_{t_0}^T \|f(t)\|^2 dt < \infty \right\}.$$

**Main material.** Consider the case of a stationary system (1) over an infinite period of time.  $H^\infty$  – optimal control of linear stationary systems at infinite control time.

Consider a stationary system:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + F_w w(t), & t_0 < t < \infty, \\ x(t_0) = F_0 x_0, \end{cases} \quad (6)$$

in the equation of observation

$$y(t) = Cx(t) + F_v v(t), \quad (7)$$

and quality criteria

$$I(u) = \int_{t_0}^{\infty} (x^T(t) G_x x(t) + u^T(t) G_u u(t)) dt, \quad (8)$$

Regarding the unknown vector of external perturbations  $w(t)$ , the vector of measurement errors  $v(t)$  and the vector of initial conditions  $x_0$ , it is assumed that they belong to the next set of permissible perturbations (uncertainties)

$$\Omega_{\xi} = \left\{ \xi : \xi = (w(t), v(t), x_0), w(t) \in L_2(t_0, \infty), v(t) \in L_2(t_0, \infty), x_0 \in R^{n_0}; \|\xi\|^2 \leq 1 \right\}, \quad (9)$$

where the norm норма  $\|\xi\|$  of the vector-valued function  $\xi$  is determined by the following expression

$$\|\xi\|^2 = \int_{t_0}^{\infty} (w^T(t) R_w w(t) + v^T(t) R_v v(t)) dt + (x_0 - \hat{x}_0)^T R_0 (x_0 - \hat{x}_0). \quad (10)$$

Then  $H^{\infty}$  - the optimal solution to the problem of minimax control

$$\inf_u \sup_{\xi \in \Omega_{\xi}} I(u) = \gamma_{\min}^2, \quad (11)$$

presentable in the form

$$u(t) = -G_u^{-1} B^T Q x_c(t), \quad (12)$$

where  $x_c(t)$  – compensator output

$$\begin{cases} \frac{dx_c(t)}{dt} = A_c x_c(t) + B_c y(t), \\ x_c(t_0) = x_c^0, \end{cases} \quad (13)$$

in which it is marked

$$A_c = A - B G_u^{-1} B^T Q + \gamma^{-2} F_w R_w^{-1} F_w^T Q - (E - \gamma^{-2} P Q)^{-1} P C^T R C, \quad (14)$$

$$B_c = (E - \gamma^{-2} P Q)^{-1} P C^T R, \quad (15)$$

$$x_c^0 = (E - \gamma^{-2} F_0 R_0^{-1} F_0^T Q(t_0))^{-1} F_0 \hat{x}_0, \quad R = (F_v^{-1})^T R_v F_v^{-1}. \quad (16)$$

Matrices  $P = P^T > 0$  i  $Q = Q^T > 0$  are solutions of the following matrix algebraic equations of the Ricatti type

$$AP + PA^T - P(C^T R C - \gamma^{-2} G_x)P + F_w R_w^{-1} F_w^T = 0, \quad (17)$$

$$-A^T Q - QA + Q(B G_u^{-1} B^T - \gamma^{-2} F_w R_w^{-1} F_w^T)Q - G_x = 0, \quad (18)$$

in which the parameter  $\gamma^2$  must satisfy the condition

$$E - \gamma^{-2} Q P > 0. \quad (19)$$

The minimum value  $\gamma_{\min}^2$  of the parameter  $\gamma^2$ , under which the condition is met (19), corresponds to optimal control.

The worst (most unfavorable) perturbations are given by formulas

$$w(t) = \gamma^{-2} R_w^{-1} F_w^T Q x_c(t), \quad v(t) = 0, \quad x_0 = \left( E - \gamma^{-2} R_0^{-1} F_0^T Q F_0 \right)^{-1} \hat{x}_0. \quad (20)$$

Estimation of the state vector  $\hat{x}(t)$  can be found by the formula

$$\hat{x}(t) = \left( E - \gamma^{-2} P Q \right) x_c(t). \quad (21)$$

**Conclusions.** Thus, the purpose of the article, declared at the beginning of the work, is achieved, the proposed solution of the problem of finding the optimal control as output feedback, which minimizes the integral-quadratic criterion of operation under uncertainty under the most adverse perturbations. The results of the research are presented in the form of practical formulas, according to which the corresponding calculations are allowed when modeling control processes in the considered linear dynamic non-stationary object with uncertainties. The theory of automatic control moves in the direction of complicating the studied phenomena, processes and reducing information about the control system, object, its features, properties, characteristics, operating conditions, uncertainties and external influences. Given all the above, the chosen area of research is promising and has a high level of relevance.

## Список літератури

1. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств . М.: Физматлит, 2007. 281 с.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Физматлит, 2004. 560 с.
3. Поляк Б.Т., Хлебников М.В. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. М.: ЛЕНАНД, 2014. 560 с.
4. Якубович В.А. Решение некоторых матричных неравенств, встречающихся в теории автоматического регулирования . *ДАН СССР*. 1962. Т. 143, №6. С. 1304-1307.
5. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. LinearMatrix Inequalities in System and Control Theory. Philadelphia: SIAM, 1994. 193 p.
6. Chilali M., Gahinet P.  $H^\infty$  design with pole placement constraints: An LMI approach. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1996. Vol.41. Pp. 358–367.
7. Ghaoui L.E., Niculescu S.I. Advances in linear matrix inequality methods in control. Advances in Design and Control. Philadelphia, PA: SIAM, 2000. 372 p.
8. Masubuchi I., Ohara A., Suda N. LMI-based controller synthesis: A unified formulation and solution. *Int. J. Robust Nonlinear Contr.* 1998. Vol. 8. Pp. 669–686.
9. Лобок О.П., Гончаренко Б.М., Віхрова Л.Г. Зведення задачі мінімаксного керування лінійними нестационарними системами до  $H^\infty$  робастного шляхом динамічної гри . *Центрально український науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип.3(34). С.143-162.

## References

1. Balandin, D.V. & Kogan, M.M. (2007). *Sintez zakonov upravlenija na osnove linejnyh matrichnyh neravenstv* [Synthesis of control laws based on linear matrix inequalities] . Moscow: Fizmatlit [in Russian].
2. Gantmaher, F.R. (2004). *Teorija matric* [Matrix theory]. Moscow: Fizmatlit [in Russian].
3. Poljak, B.T. & Hlebnikov, M.V. (2014). *Upravlenie linejnymi sistemami pri vneshnih vozmushhenijah: Tehnika linejnyh matrichnyh neravenstv*. Moscow: LENAND [in Russian].
4. Jakubovich, V.A. (1962). Reshenie nekotoryh matrichnyh neravenstv, vstrechajushhihsja v teorii avtomaticheskogo regulirovanija [Solution of some matrix inequalities found in automatic control theory]. *DAN SSSR*. Vol. 143, 6, 1304-1307 [in Russian].
5. Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E. & Balakrishnan, V. (1994). *LinearMatrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia: SIAM [in English].

6. Chilali, M. & Gahinet, P. (1996).  $H^\infty$  design with pole placement constraints: An LMI approach. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol.41, 358–367 [in English].
7. Ghaoui, L.E. & Niculescu, S.I. (2000). *Advances in linear matrix inequality methods in control*. Advances in Design and Control. Philadelphia, PA: SIAM [in English].
8. Masubuchi I., Ohara A., Suda N. (1998). LMI-based controller synthesis: A unified formulation and solution. *Int. J. Robust Nonlinear Contr.*, Vol. 8, 669–686 [in English].
9. Lobok, O.P. Honcharenko, B.M. & Vikhrova, L.H. (2020). Zvedennia zadachi minimaksnoho keruvannia liniynymy nestatsionarnymy systemamy do robastnoho shliakhom dynamichnoi hry [Reducing the Problem of Minimax Control of Linear non-Stationary Systems to a - Robust One by the Way of Dynamic Game]. *Tsentral'no ukrains'kuj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific Bulletin. Technical Sciences*, Vol.3(34), 143 – 162 [in Ukrainian]

**Б.М. Гончаренко**, проф., д-р техн. наук

*Національний університет харчових технологій, м.Київ, Україна*

**Л.Г. Віхрова**, проф., канд. техн. наук, **М.С. Мірошніченко**, доц., канд. техн. наук

*Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

### **Оптимальне керування нелінійними стаціонарними системами на нескінченному часі регулювання**

В статті наведено вирішення проблеми синтезу керування для динамічних систем, які описуються лінійними диференціальними рівняннями, що функціонують у відповідності з інтегрально-квадратичним критерієм якості в умовах невизначеності.

Зовнішні збурення, похибки та початкові умови при цьому належать певній множині невизначеностей. Тому проблема пошуку оптимального керування у вигляді зворотного зв'язку за виходом об'єкта представлена у вигляді мінімаксної задачі оптимального керування за умов невизначеностей. Завдання пошуку оптимального керування і початкового стану, які максимізують критерій якості, розглянуто в рамках оптимізаційної задачі, яку розв'язано методом множників Лагранжа після введення допоміжної скалярної функції – гамільтоніана. Розглянуто випадок стаціонарної системи на нескінченному відтинку часу. Приведені для перших та других варіацій формули, які можуть використовуватися для розрахунків.

Запропоновано задачу пошуку керування розв'язувати в два етапи: пошук проміжного розв'язку при фіксованих значеннях векторів керування та похибки і наступний пошук остаточного оптимального керування. Розглянуте також розв'язання  $H^\infty$ -оптимального керування на нескінченному часі з врахуванням сигналу з виходу компенсатора, а також – розв'язання відповідних матричних алгебраїчних рівнянь типу Рікатті.

**мінімаксне керування, робастність, системи з невизначеностями, оптимізація, матрична форма**

*Одержано (Received) 15.01.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 28.01.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 37.018.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).94-99](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).94-99)

**О. П. Голик**, доц., канд. техн. наук, **В. М. Каліч**, проф., канд. техн. наук, **Р. В. Жесан**, доц., канд. техн. наук, **І. В. Волков**, викл.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна*  
e-mail: [dego@ukr.net](mailto:dego@ukr.net)

## Технології організації дистанційного навчання в Україні

В статті виконано огляд та аналіз технологій для дистанційної форми навчання в Україні, їх переваги та недоліки. Запропоновано заходи для покращення ефективності організації дистанційної форми навчання.

**методика, дистанційне навчання, цифрові технології, освітня платформа, онлайн-навчання**

**Постановка проблеми.** В роботі [1] проведено аналіз переваг та недоліків дистанційного навчання. Автор зазначає, що недоліків більше. І головними недоліками є обмеження соціальної взаємодії та необхідність використання цифрових технологій, які для деяких студентів можуть бути складними.

В [2] наведено поради стосовно організації дистанційної освіти за допомогою різних видів забезпечення дистанційного навчання. Автори пропонують вчителям засвоювати програмне забезпечення для дистанційного навчання та організовувати заходи ознайомлення учнів з необхідними технологіями, надавати учням інструкції та рекомендації і роз'яснювати правила. Технології для дистанційного навчання повинні поєднувати різні типи інтерактивних програм (аудіо-, відео конференції, освітні платформи тощо), які дають змогу перевірити результати та досягнення.

В статті [3] автори вказують про необхідність створення в університетах власного освітньо-інформаційного середовища. Авторами виділено три форми освітньо-інформаційної взаємодії для підтримки самостійної роботи студентів, а саме: хмарні технології, соціальні мережі, технології дистанційного навчання. Наведено їх переваги та недоліки. Зазначено, що дистанційна форма навчання має більше переваг.

**Постановка завдання.** Аналіз наведених вище робіт показав, що дистанційна форма навчання має більше недоліків, ніж переваг. Однак стосовно процесу дистанційного навчання та способам його організації в Україні інформації дуже мало. Для визначення переваг та недоліків дистанційної форми навчання в Україні, необхідно ознайомитись з організацією дистанційного навчання та шляхам його впровадження в Україні.

**Виклад основного матеріалу.** В Україні впровадження дистанційної освіти почалось ще в 2002 році. Першим закладом загальної середньої освіти в Україні, який отримав ліцензію на провадження освітньої діяльності без очного формату став Центр освіти «Дистанційна школа «Оптіма»» [4]. В 2004 році Міністерством освіти і науки (МОН) України було затверджено «Положення про дистанційне навчання» [5]. З розвитком технологій та необхідністю дотримання умов карантину в 2020 році МОН України затвердило «Положення про дистанційну форму здобуття повної загальної середньої освіти» [6, 7] в якому наведено порядок організації та запровадження дистанційного навчання у закладах освіти.

Згідно даного Положення [7], педрада затверджує використання конкретних інформаційних, цифрових, мережевих та телекомунікаційних систем (освітніх платформ) за допомогою яких організовується навчальний процес під час дистанційної форми навчання. Необхідно дотримуватись щоб освітньо-навчальний процес забезпечував постійну та ґрунтовну взаємодію між викладачами та студентами і їх батьками. Передбачено дві форми дистанційної форми навчання: синхронна та асинхронна. Вибір тієї чи іншої форми викладач здійснює самостійно, але необхідно передбачити що в синхронному режимі треба забезпечити не менше 30% навчальних годин для певної дисципліни, що зазначено в освітній програмі. Синхронний режим передбачає одночасне перебування викладача та студентів в освітньому середовищі або за допомогою відеоконференцій.

Для осіб, які з поважних причин не мають можливості брати участь у синхронному режимі взаємодії (за станом здоров'я, через відсутність доступу до мережі Internet або технічних засобів тощо) зазначено порядок організації дистанційного навчання [7]. Для таких учнів навчальний заклад повинен передбачити застосування засобів комунікації, які доступні для студентів, наприклад, телефонний та/або поштовий зв'язок. Для осіб з особливими освітніми потребами розроблено процедуру організації дистанційної форми занять.

Контроль та оцінювання результатів навчання студентів необхідно проводити відповідно до критеріїв, які запропоновані МОН України, з використанням можливостей дистанційних технологій [7].

В 2020 році МОН України було розроблено та оприлюднене на офіційному сайті Методичні рекомендації щодо організації дистанційного навчання [8]. Дані методичні вказівки містять інформацію щодо методології, засобів, методів та інструментарію дистанційного навчання, а також корисні поради для вчителів, учнів та їх батьків. На рис. 1 показані види online-комунікацій, які пропонуються у [8].

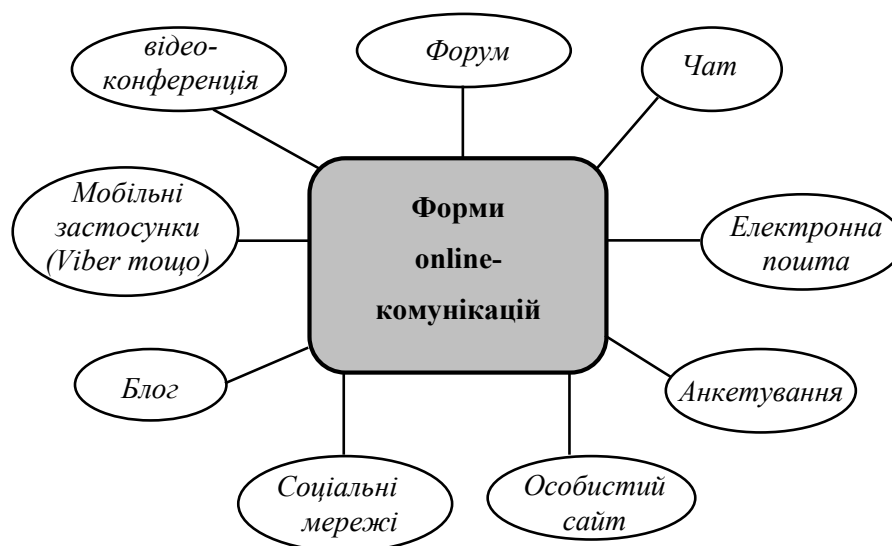


Рисунок 1 – Основні форми online-комунікації

Джерело: [8]

На рис. 2 показані найпоширеніші web-ресурси для дистанційної форми навчання є [8].

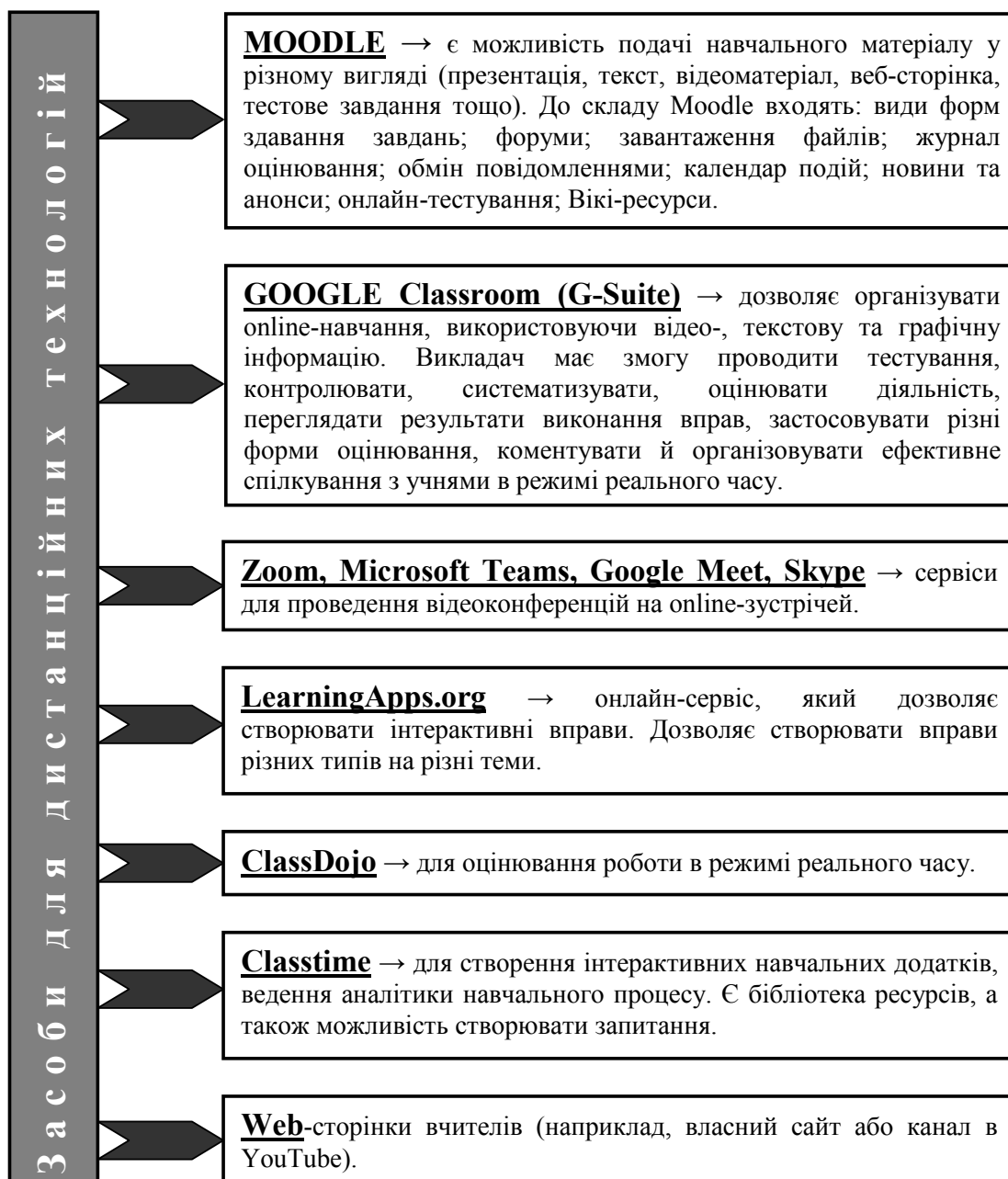


Рисунок 2 – Цифрові технології для дистанційного навчання

Джерело: [8]

Використання таких технологій для дистанційного навчання вимагає певного інструментарію: наявність доступу до мережі Internet; аудіо- та відеозасоби (мікрофон, навушники, веб-камера тощо); відповідна техніка (ноутбук, персональний комп'ютер, планшет, смартфон тощо).

11 грудня 2020 року МОН України спільно з Українським інститутом розвитку освіти та Міністерством цифрової трансформації України запустили платформу для дистанційного навчання «Всеукраїнська школа онлайн» (e-school.net.ua) [9, 10]. За даними МОН України за перший місяць роботи в даній платформі зареєстровано понад 100 тисяч осіб.

Крім того на офіційному сайті МОН України (mon.gov.ua) постійно оновлюється інформація щодо нових роз'яснень та рекомендацій проведення дистанційного



навчання в умовах карантину. Наприклад, в січні 2021 р. МОН України було надано роз'яснення щодо тривалості навчального заняття під час дистанційного формату [11], у зв'язку з тим, що з 1 січня 2021 року набув чинності Санітарний регламент для закладів загальної середньої освіти. Даний документ передбачає вимоги до організації роботи технічними засобами навчання, зокрема час безперервної роботи з технічними засобами навчання окремо для учнів початкової, середньої та старшої школи.

Зважаючи на вище наведене можна виділити переваги та недоліки дистанційної форми навчання в умовах класичної освіти, наведені на рис. 3.

<u>ПЕРЕВАГИ</u>	<u>НЕДОЛІКИ</u>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1) internet-класи настільки ж, якщо не більше, ефективні для навчання учнів, ніж традиційний стиль навчання в класі (аудиторії);</li> <li>2) дистанційне навчання може бути не ідеальним варіантом для всіх, але в умовах карантину – це єдина форма здійснення навчального процесу;</li> <li>3) забезпечення доступності інформації;</li> <li>4) можливість проводити інтерактивне моделювання;</li> <li>5) розвиток самодисципліни та самоконтролю;</li> <li>6) ефективне використання часу (за умов дотримання графіка навчання та дисципліни), відсутня необхідність пересування до закладу освіти;</li> <li>7) розвиток навичок цифрової грамотності.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) менше часу на соціальну взаємодію між однолітками, викладачем та студентами;</li> <li>2) учня/студенти не мають часу на перерву для спілкування та/або гри;</li> <li>3) навантаження на опорно-руховий апарат та органи зору (попри зменшення фізичних навантажень), внаслідок тривалого перебування за комп'ютером;</li> <li>4) учні/студенти можуть не мати вдома необхідних ресурсів та навичок (програмне забезпечення, обладнання, доступ до мережі Internet тощо);</li> <li>5) велика імовірність того, що учні/студенти будуть відволікатись та невчасно виконувати завдання;</li> <li>6) «приховані» витрати, наприклад, придбання веб-камери, мікрофону, навушників, принтеру, більші витрати на електричну енергію тощо;</li> <li>7) надмірна залежність від технологій. Будь-яке несправне програмне або апаратне забезпечення може зупинити/перервати процес навчання;</li> <li>8) порушується якість викладацького складу. Існують випадки, коли викладачу незручно, а іноді й неможливо, в повній мірі передати необхідні знання в дистанційній формі;</li> <li>9) недостатній контроль над засвоєнням учнями/студентами знань;</li> <li>10) можливість хакерського вторгнення в електронну базу даних;</li> <li>11) в багатьох випадках неможливість одночасного навчання багатьох дітей в сім'ї (якщо комп'ютер один, а дітей двох і більше);</li> <li>12) проблема ідентифікації студента.</li> </ol>

Рисунок 3 – Переваги та недоліки дистанційної форми навчання

*Джерело: розроблено авторами*

**Висновки.** Врахувавши наведені вище переваги та недоліки можна сказати, що дистанційна форма навчання має більше недоліків, ніж переваг, що знижує якість освіти в цілому. Але попри це організація дистанційної навчання з боку МОН України та закладів освіти дозволяє учням навчатися в дистанційному форматі. Також треба враховувати значення політики. Необхідно вирішувати питання переслідування під час онлайн-обговорень, конфіденційності, захисту даних та враховувати рівень цифрової грамотності та доступі до технологій. Однак для досягнення результатів навчання повинна виконуватись головна умова – відповідальне ставлення учнів/студентів до такої форми навчання. Оскільки дорослих (батьків) немає вдома, і як наслідок, відсутність належного контролю, то багато учнів вдома не навчаються на тому ж рівні, ніж безпосередньо у закладі освіти. Тому для організації дистанційного навчання також доцільно на державному рівні вирішувати проблему відсутності контролю дорослих (батьків) при безпосередньому дистанційному навчанні. Тобто, щоб дорослі (батьки) могли бути присутніми під час дистанційних занять своїх дітей, і при цьому мали можливість зберегти своє робоче місце та заробітну плату.

## Список літератури

1. Nishatha Abraham Bijesh. Advantages and disadvantages of distance learning! *College Education Guide: Career Options, Planning & Information Portal*. URL: <https://www.indiaeducation.net/online-education/articles/advantages-and-disadvantages-of-distance-learning.html> (date of access: 02.03.2021).
2. Gorenko Y. How to use distance learning software effectively - elearning industry. *eLearning Industry*. URL: <https://elearningindustry.com/how-teachers-use-distance-learning-software-effectively> (date of access: 02.03.2021).
3. Maliataki V. V., Kirichek K. A., Vendina A. A. Distance Learning Technologies as a Modern Resource of Implementing Active and Interactive Methods of Education for the Organization of Independent Work of Students. *Open Education*. 2020. Vol. 24, no. 3. P. 56–66. URL: <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2020-3-56-66> (date of access: 02.03.2021).
4. Учасники проєктів Вікімедіа. Дистанційне навчання – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: <https://cutt.ly/QvImOhU> (дата звернення: 11.03.2021).
5. Про затвердження Положення про дистанційне навчання : Наказ МОН України від 21.01.2004 р. № 40 : станом на 24 трав. 2013 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0464-04> (дата звернення: 11.03.2021).
6. Міністерство освіти і науки України - Деякі питання організації дистанційного навчання (zareєстровано в Міністерстві юстиції України №941/35224 від 8 вересня 2020 року). *Головна | Міністерство освіти і науки України*. URL: <https://mon.gov.ua/ua/npa/deyaki-pitannya-organizaciyi-distancijnogo-navchannya-zareyestrovano-v-ministerstvi-yusticiyi-ukrayini-94735224-vid-28-veresnya-2020-roku> (дата звернення: 11.03.2021).
7. Деякі питання організації дистанційного навчання : Наказ МОН України від 08.09.2020 р. № 1115. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0941-20> (дата звернення: 11.03.2021).
8. Metodichni recomendazii-dustanciyna osvita-2020. *Головна | Міністерство освіти і науки України*. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/metodichni%20recomendazii/2020/metodichni%20recomendazii-dustanciyna%20osvita-2020.pdf> (date of access: 11.03.2021).
9. Міністерство освіти і науки України - МОН та Мінцифри запустили платформу «Всеукраїнська школа онлайн». *Головна | Міністерство освіти і науки України*. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/mon-ta-mincifri-zapustili-platformu-vseukrayinska-shkola-onlajn> (дата звернення: 11.03.2021).
10. Про проєкт. *Всеукраїнська школа онлайн*. URL: <https://lms.e-school.net.ua/about> (дата звернення: 11.03.2021).
11. Міністерство освіти і науки України - Тривалість навчального заняття під час дистанційного формату лишається незмінною – роз'яснення МОН. *Головна / Міністерство освіти і науки України*. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/trivalist-navchalnogo-zanyattya-pid-chas-distancijnogo-formatu-lishayetsya-nezminnoyu-rozuyasnennya-mon> (дата звернення: 11.03.2021).

## References

1. Nishatha Abraham Bijesh. Advantages and disadvantages of distance learning! *College Education Guide: Career Options, Planning & Information Portal*. [www.indiaeducation.net](http://www.indiaeducation.net). Retrieved from <https://www.indiaeducation.net/online-education/articles/advantages-and-disadvantages-of-distance-learning.html> [in English].
2. Gorenko, Y. How to use distance learning software effectively - elearning industry. *eLearning Industry*. [elearningindustry.com](http://elearningindustry.com). Retrieved from <https://elearningindustry.com/how-teachers-use-distance-learning-software-effectively> [in English].
3. Maliataki, V.V., Kirichek, K.A. & Vendina, A. A. (2020). Distance Learning Technologies as a Modern Resource of Implementing Active and Interactive Methods of Education for the Organization of Independent Work of Students. *Open Education, Vol. 24, 3*, 56–66. Retrieved from <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2020-3-56-66> [in English].
4. Uchasnyky proektiv Vikimedia. Dystantsiine navchannia – Vikipediia. *Vikipediia*. Retrieved from <https://cutt.ly/QvImOhU> [in Ukraine].
5. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro dystantsiine navchannia : Nakaz MON Ukrainy vid 21.01.2004 r. № 40 : stanom na 24 trav. 2013 r. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0464-04> [in Ukraine].
6. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy - Deiaki pytannia orhanizatsii dystantsiinoho navchannia (zareiestrovano v Ministerstvi yustytzii Ukrainy №941/35224 vid 8 veresnia 2020 roku). *Holovna | Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy*. Retrieved from <https://mon.gov.ua/ua/npa/deyaki-pitannya->

- organizaciyi-distancijnogo-navchannya-zareyestrovano-v-ministerstvi-yusticiyi-ukrayini-94735224-vid-28-veresnya-2020-roku in Ukraine].
7. Deiaki pytannia orhanizatsii dystantsiinoho navchannia : Nakaz MON Ukrainy vid 08.09.2020 r. № 1115. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0941-20> [in Ukraine].
  8. Metodichni rekomendazii-dustanciyna osvita-2020. Holovna | Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy. Retrieved from <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/metodichni%20rekomendazii/2020/metodichni%20rekomendazii-dustanciyna%20osvita-2020.pdf> [in Ukraine].
  9. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy - MON ta Mintsyfry zapustyly platformu «Vseukrainska shkola onlain». Holovna | Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy. Retrieved from <https://mon.gov.ua/ua/news/mon-ta-mincifri-zapustili-platformu-vseukrayinska-shkola-onlajn> [in Ukraine].
  10. Pro proekt. Vseukrainska shkola onlain. Retrieved from <https://lms.e-school.net.ua/about> [in Ukraine].
  11. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy - Tryvalist navchalnogo zaniattia pid chas dystantsiinoho formatu lyshaietsia nezminnoiu – roziasnennia MON. Holovna | Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy. Retrieved from <https://mon.gov.ua/ua/news/trivalist-navchalnogo-zanyattya-pid-chas-distancijnogo-formatu-lyshaietsya-nezminnoyu-rozyasnennya-mon> [in Ukraine].

**Olena Holyk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Kalich**, Prof., PhD tech. sci., **Roman Zhesan**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ihor Volkov**, Instructor

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Technologies for Distance Education in Ukraine**

To prevent the spread of coronavirus infection, educational institutions from time to time switch to distance learning. The article reviews the ways of organizing distance learning in Ukraine, existing technologies for distance learning, electronic resources, and educational platforms. The most common web services for online learning are considered.

The advantages and disadvantages of distance learning in the conditions of classical education are determined. As a result, it was found that the disadvantages outweigh the advantages, which significantly affects the quality of education as a whole. The main disadvantages: the low level of digital literacy, insufficient control over the acquisition of knowledge, and lack of social interaction between peers.

Despite these shortcomings, the organization of distance learning by the Ministry of Education and Science of Ukraine and educational institutions is performed at a sufficient level. However, this process needs to be improved in terms of privacy, data protection and digital literacy. To address the lack of proper parental control, it is proposed at the state level to provide parents with the opportunity to be present directly during their children's distance learning, while being able to maintain their jobs and wages.

**methodology, distance learning, distance education, digital technologies, educational platform, online learning**

*Одержано (Received) 10.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 18.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**В.В. Щепін**

*Кіровоградська Мала академія наук учнівської молоді, м. Кропивницький, Україна*  
**Д.В. Трушаков**, доц., канд. техн. наук, **О.І. Сіріков**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: kaf.etsen@gmail.com*

## Пристрій для корекції психоемоційного стану людини

Статтю присвячено результатам розробки електронного пристрою, що випромінює різнокольорові світлові ефекти для покращення психоемоційного стану людини. На основі проведеного аналізу існуючих пристроїв запропонована та виготовлена власна конструкція електронного приладу, що випромінює різнокольорові світлові ефекти, а також вимірює основні параметри навколишнього середовища - температуру, вологість та атмосферний тиск. Він здатний, за даними цих вимірювань, керувати пристроями зміни мікроклімату в середині приміщення, наприклад, кондиціонером, зволожувачем повітря, опаленням. Проведені експериментальні клінічні дослідження виготовленого пристрою в лікарні КНП «Обласна клінічна психіатрична лікарня Кіровоградської обласної ради» шляхом зняття енцефалограм головного мозку. Отримані позитивні результати, що підтверджують здатність розробленого пристрою впливати на психоемоційний стан людини.

**електронний пристрій, мікроконтролер, різнокольорові світлові ефекти, психоемоційний стан людини, енцефалограма головного мозку**

**Постановка проблеми.** Останнім часом усе більше людей скаржаться на депресію, швидко втому, погіршення морального або психоемоційного стану [1]. Це пов'язано з інтенсифікацією життя людей, збільшенню робочого часу, зменшення часу відпочинку, одноманітною повсякденністю. Про зростання цієї недуги в Україні говорять фахівці та наголошують, що це загальносвітова тенденція [2]. Для покращення психоемоційного стану багато людей декілька раз на день п'ють каву, вживають лікарські препарати (антидепресанти), палять. Але це шкідливо впливає на організм людини. У разі наявності вільного часу для покращення психоемоційного стану можна займатися спортом, йогою або різними хобі (охота, рибальство, вишивання і т.п.), заводити домашніх тварин. Але відсутність вільного часу або наявність інших причин, які не дозволяють приділити увагу психоемоційному «релаксу» і призводить до появи вказаних проблем.

З давніх часів відомо, що сидячи біля каміну і спостерігаючи за полум'ям людина заспокоюється. Спостереження за яскравими зеленими кольорами рослин та дерев, грою сонячних променів у листві також сприяє покращенню психоемоційного стану людини, не марно лікарі радять перед сном робити короткі прогулянки парком. Також заспокоює спостереження за невеликими хвилями на морі. Але, нажаль не завжди є можливість скористатися подібними природними явищами для покращення психоемоційного стану.

На наш погляд досягти покращення психоемоційного стану людини без нанесення шкоди організму можливо завдяки використанню спеціально створеного електронного пристрою, який випромінює світлові потоки різного кольору та інтенсивності, імітуючи при цьому гру світла та кольорів природних явищ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Мозок людини сприймає різні кольори через окремі схеми активності. Вченим вдалося з'ясувати, що мозок різних людей обробляє кольори схожим чином кожний відтінок викликає різну активізацію мозку [3]. Крім цього вже відомо, як кольори впливають на психофізіологічний стан людини [4-6]. В теперішній час для медичних цілей застосовують LED-терапію або так звану світлову терапію. LED-терапію широко застосовують лише для дерматології та косметології [7]. Найчастіше для лікування використовуються синій, червоний, зелений і помаранчевий колір, кожен з яких проникає на різну глибину верхніх шарів шкіри і вирішують різні завдання. Серед промислових серійних пристроїв немає тих, що призначені для впливу на психоемоційний стан людини.

**Постановка завдання.** Запропоновано розробити LED електронний пристрій для корекції психоемоційного стану людини, який буде створювати та випромінювати різнокольорові світлові ефекти, що впливатимуть на психоемоційний стан людини з метою його покращення. Необхідно передбачити можливість дистанційного керування пристроєм, а також він повинен вимірювати основні параметри мікроклімату навколишнього середовища (температуру, вологість, атмосферний тиск), та за даними цих вимірювань, керувати пристроями зміни мікроклімату в середині приміщення, наприклад, кондиціонером, зволожувачем повітря, опаленням, для створення комфортних умов перебування людини в ньому.

**Виклад основного матеріалу.** На людський психофізіологічний стан впливають фактори світлового походження: мерехтіння яскравих і кольорових плям на екрані, часті зміни зображення тощо. Гра світла та кольору впливає на зорову систему в цілому, на серце і мозок, оскільки частоти мерехтіння можуть збігатися з частотами електричних коливань різних структур людського тіла. Ефект особливо сильний, коли ці вібрації резонують. Але, як і будь-які ліки, залежно від дози та правильного прийому, це може спричинити як позитивні, так і негативні наслідки. [3, 4]

Наші очі здатні розрізнити і фіксувати більше мільйона кольорів і відтінків, що, як вже давно довели вчені, активно впливає на наше самопочуття, настрої, емоції. Деякі кольори можуть підвищити активність, інші почуття щастя, радості, спокою, комфорту та безпеки. Червоний колір може покращити активність та продуктивність роботи. Його вплив на людину найсильніший у порівнянні з іншими кольорами палітри. Зелений колір дуже позитивно впливає на нервову систему людини, заспокоює, дарує відчуття затишку і спокою, символізує свіжість. Він надає відчуття ясності, знижує апетит. Синій – це холодний колір, який може створити ділове робоче середовище в приміщенні. Блакитний колір налаштовує на мир, споглядання та обережність [3].

Найбільш близьким та відомим пристроєм до того, що розробляється є світломузика. Аналог також випромінює різнокольорові світлові ефекти, які впливають на психоемоційний стан людини під час танцю, але існує ряд істотних відмінностей, які закладені в пристрої, що розробляється. По-перше, світломузика, як правило, не здатна змінювати яскравість світла, тобто працює за релейним принципом (включено-виключено). Натомість в пристрої, що розробляється завдяки ШІМ модуляції є можливість керування яскравістю світіння. По-друге, джерелом вибору кольору та тривалості світіння є музика, а в пристрої, що розробляється наперед задана програма. По-третє, в світломузиці, як правило, є джерела окремих кольорів, які конструктивно рознесені в просторі. В пристрої, що розробляється завдяки застосуванню світлодіодної стрічки з світлодіодами різних кольорів, які керуються окремо, є можливість одним і тим самим освітлювачем випромінювати різні кольори, а також створювати різні світлові ефекти на кшталт плавного переходу від кольору до кольору по усім кольорам веселки.

Блок схема запропонованого пристрою для корекції психоемоційного стану людини складається з двох функціональних електронних блоків. Перший електронний блок пристрою призначений для створення та демонстрації різнокольорових світлових ефектів, а також він вимірює і відображає на дисплеї основні параметри мікроклімату (температуру, вологість і атмосферний тиск), та відправляє їх на другий електронний блок по bluetooth. Блок схема з'єднання модулів першого функціонального блоку пристрою представлена на рис. 1. Вона містить наступні функціональні елементи: мікроконтролер atmega328 (Arduino NANO), модуль реального часу ds3231, датчик збору даних мікроклімату BME280 світлодіодну стрічку WS2812b, модуль що керує світлодіодною стрічкою SP110E, LCD дисплей 2004 i2c, bluetooth модуль hc-06.

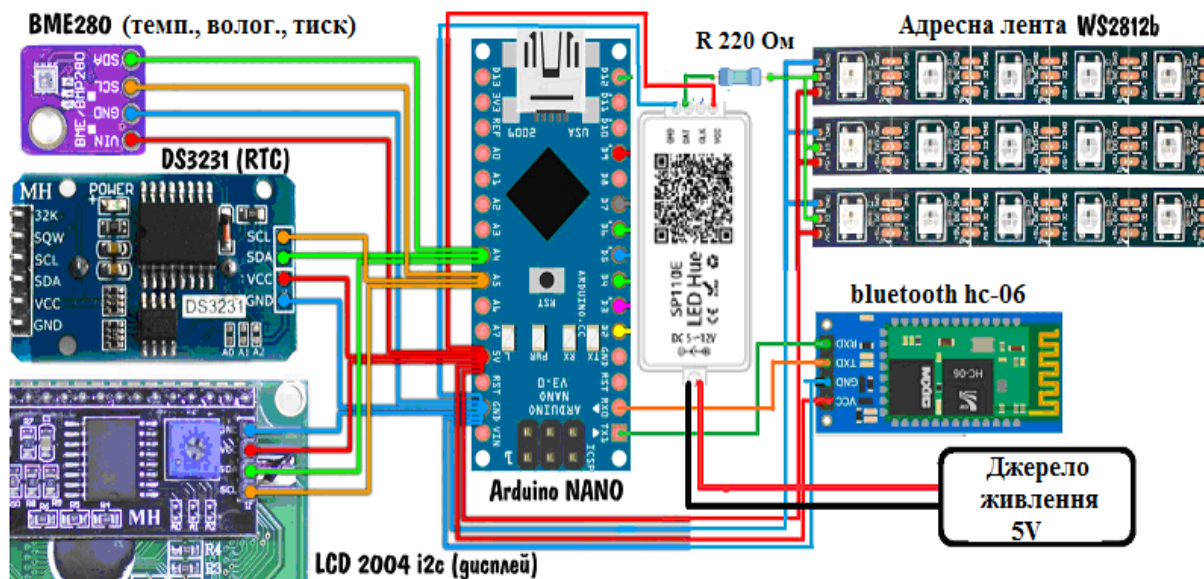


Рисунок 1 – Блок схема першого електронного блоку для створення та демонстрації різнокольорових світлових ефектів, а також вимірювання і відображення параметрів мікроклімату

*Джерело: розроблено авторами*

Другий електронний блок призначений для керування пристроями зміни мікроклімату в середині приміщення, наприклад, кондиціонером, зволожувачем повітря, опаленням і т.п. Другий електронний блок працює на основі параметрів мікроклімату виміряного першим електронним блоком та отриманих по радіоканалу bluetooth. Керування пристроями зміни мікроклімату виконується за допомогою реле та мікроконтролера. Блок схема другого функціонального блоку пристрою представлена на рис. 2. Вона містить наступні функціональні елементи: мікроконтролер atmega328 (Arduino UNO), bluetooth модуль hc-06, n-канальне реле та підключені до реле побутові прилади – зволожувач повітря, кондиціонер тощо.

Керування пристроями, які не дозволяють здійснювати це шляхом включення і відключення живлення, а також не мають спеціального входу (наприклад, газові котли мають спеціальний релейний вхід для підключення термостату) можуть керуватися через пристрої спряження. Наприклад, кондиціонером не можна керувати шляхом включення та відключення живлення, натомість можна використати спеціальні пристрої, які можуть відтворювати інфрачервоні команди пульта дистанційного керування ним.

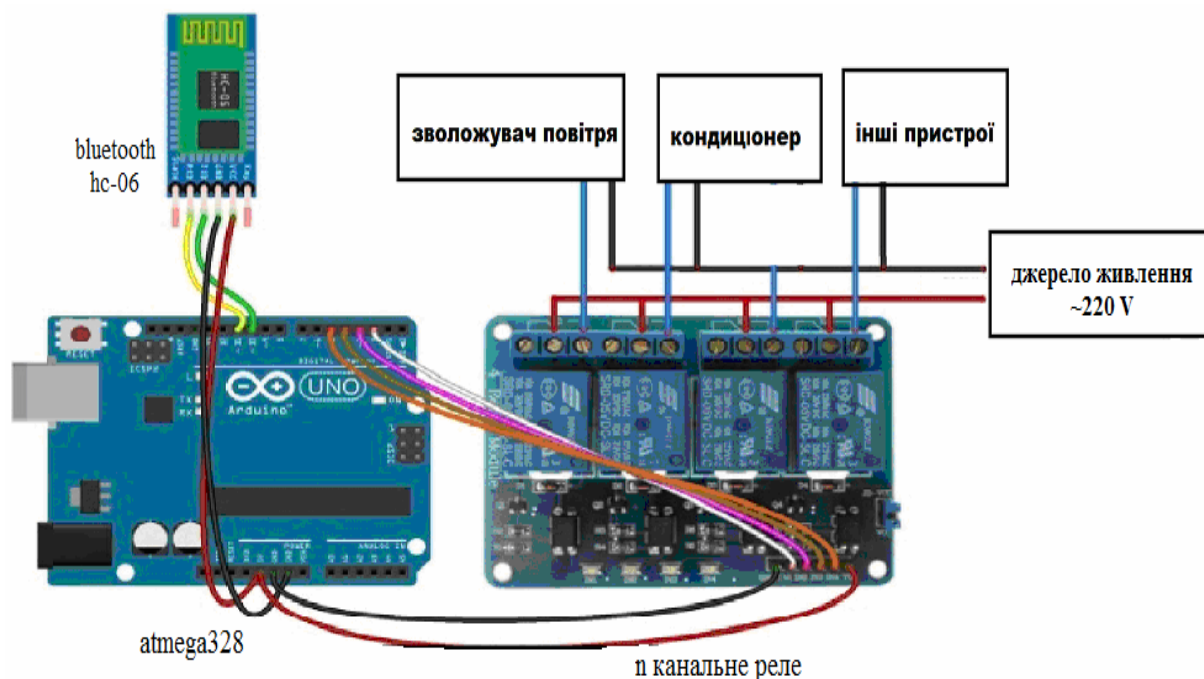


Рисунок 2 - Блок схема другого електронного блоку для керування пристроями зміни мікроклімату в середині приміщення

*Джерело: розроблено авторами*

Структурна схема пристрою для корекції психоемоційного стану людини представлена на рис. 3. Структурна схема складається з двох функціональних електронних блоків. Перший електронний блок пристрою призначений для створення та демонстрації різнокольорових світлових ефектів, а також він вимірює і відображає на дисплеї основні параметри мікроклімату (температуру, вологість і атмосферний тиск). Другий електронний блок пристрою призначений для керування побутовими приладами – зволожувачем повітря та кондиціонером. Пристрій працює наступним чином. В першому електронному блоці пристрою датчик вимірювання параметрів мікроклімату BME280 (вимірювач температури, вологості та атмосферного тиску) та датчик реального часу ds3231 підключені до мікроконтролера atmega328 (Arduino NANO), який обробляє отримані дані та виводить отриману інформацію на LCD дисплей 2004 i2c. Також виміряні параметри мікроклімату відправляються з допомогою bluetooth модулю hc-06 у другий електронний блок. Модуль SP110E керує адресною світлодіодною стрічкою WS2812b. Керування різними кольорами та світловими ефектами стрічки, яких понад 120, здійснюється по bluetooth за допомогою стандартного додатку на смартфоні «LED Hue». В другому електронному блоці сигнал, що містить інформацію про температуру та вологість надходить з bluetooth hc-06 модулю першого блоку на модуль bluetooth hc-06 другого блоку до мікроконтролера atmega328, який керує n канальним реле. У мікроконтролері інформація про температуру та вологість опрацьовується по закладеному алгоритму на основі якого приймається рішення щодо вмикання або вимикання окремого реле, яке керує роботою під'єднаних до нього пристроїв зміни мікроклімату в середині приміщення – кондиціонеру, зволожувачу повітря.

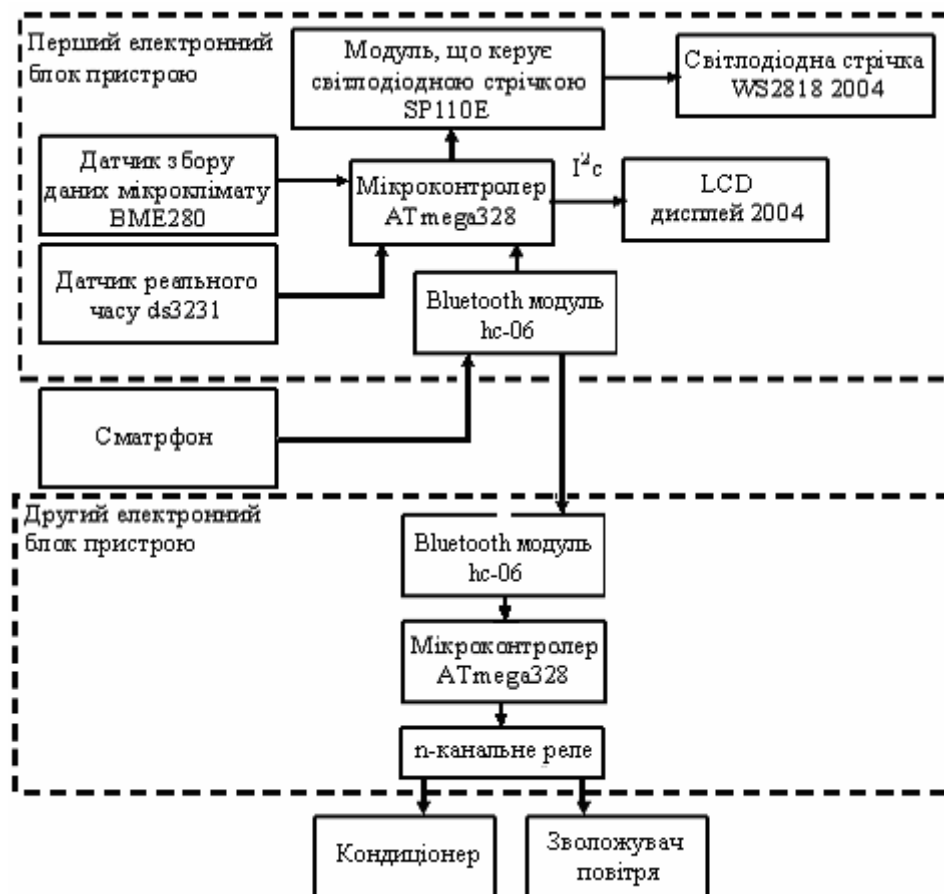


Рисунок 3 – Структурна схема пристрою для корекції психоемоційного стану людини  
Джерело: розроблено авторами

Алгоритм роботи пристрою представлено на рис. 4. Він полягає у наступному. Користувач за порадою психолога, іншого спеціаліста або на власний розсуд установлює потрібний світловий ефект та комфортні умови навколишнього середовища (у звичайних умовах температура  $t = 20-22^{\circ}\text{C}$ , вологість повітря  $\varphi = 30\%$  [8-10]).

У пристрої виконується очікування надходження команди зі смартфона що до зміни кольору, частоти світлового ефекту або вибір наперед заданої програми. Якщо цю команду не отримано, очікується її отримання. Після отримання команди здійснюється зміна кольору та/або частоти світлового ефекту, або вибір наперед заданої програми для отримання бажаного світлового ефекту.

Проводиться опитування датчику мікроклімату, якщо дані не отримано запит повторюється. Отриманні з датчика дані про температуру, вологість та атмосферний тиск виводяться на дисплей. Далі ці данні передаються для подальшого аналізу та обробки радіоканалом bluetooth до другого електронного блоку.

Якщо температура  $t = 20-22^{\circ}\text{C}$  (наперед задана користувачем) тоді повторюється запит, якщо температура інша, тоді вмикається реле 1, що керує кондиціонером та обігрівачем для отримання потрібного параметру температури.

Якщо вологість повітря  $\varphi \geq 30\%$  тоді повторюється запит, якщо  $\varphi < 30\%$  тоді вмикається реле 2 що керує зволожувачем повітря, до отримання потрібного параметру вологості  $\varphi = 30\%$ .



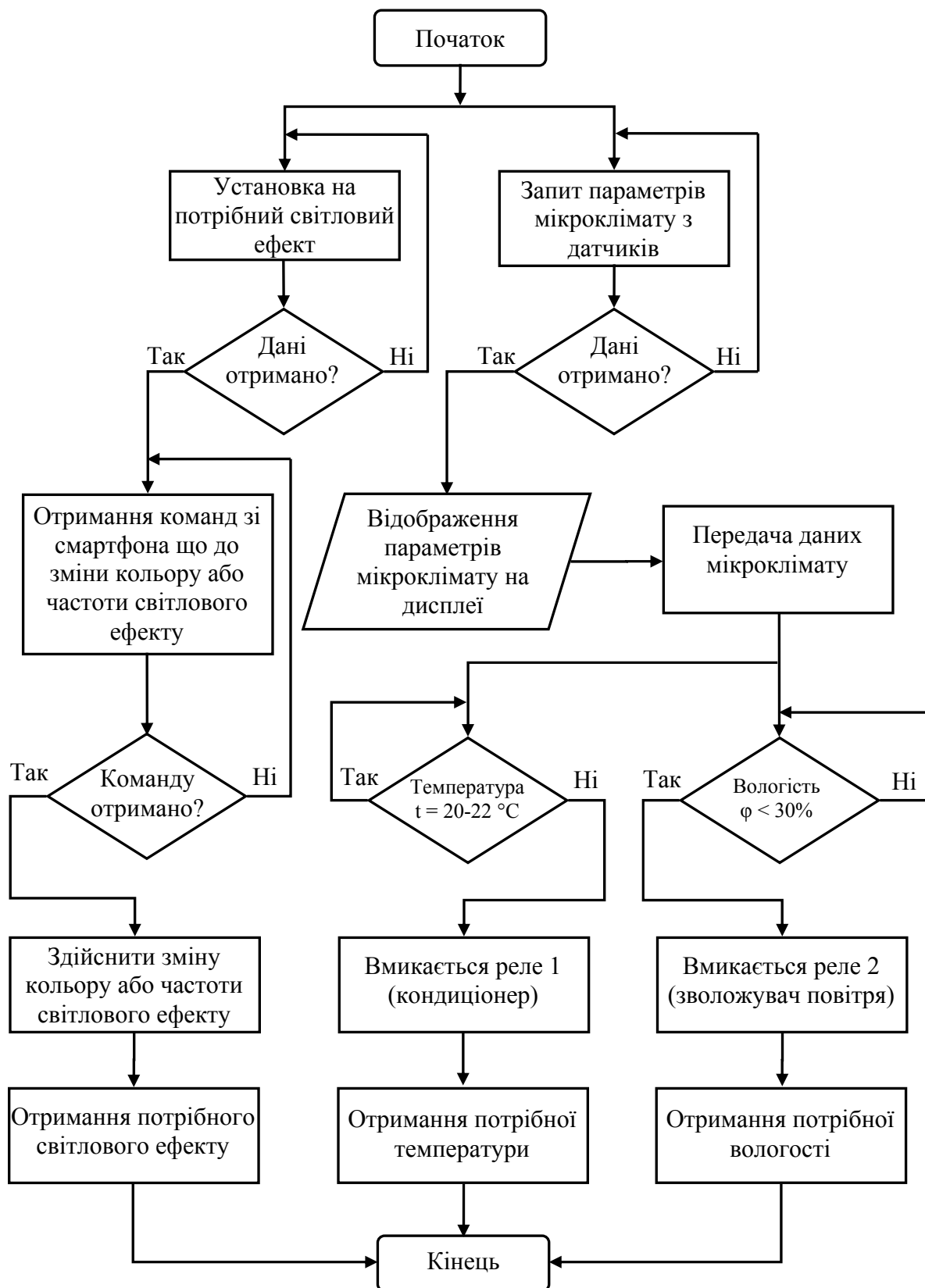


Рисунок 4 – Алгоритм роботи пристрою

*Джерело: розроблено авторами*

Для доведення працездатності виготовленої діючої моделі пристрою, а саме можливості впливу демонстрації різнокольорових світлових ефектів на психоемоційний стан людини, проведені експериментальні клінічні дослідження в КНП «Обласна клінічна психіатрична лікарня Кіровоградської обласної ради». В ході проведення дослідження спочатку у добровольця знята енцефалограма головного мозку без застосування приладу у звичайному режимі – первинна енцефалограма. Потім знята серія енцефалограм (рис. 5) з застосуванням пристрою, який випромінював по черзі світлові ефекти наступних кольорів: блакитного, фіолетового, жовтого, синього, червоного та зеленого кольорів, що були спрямовані на дослідну людину.

З розшифровки енцефалограм головного мозку отриманих під час проведення експериментальних клінічних досліджень отримані наступні результати:

1. Голубий колір мав найбільший вплив на бета-ритм при порівнянні з початковою електроенцефалограмою – знизилася амплітуда, поліпшилася якість міжзональної активності, що може свідчити про зниження рівня схвильованості (в порівнянні з початковим рівнем);

2. Фіолетовий колір: реакція з мінімальними змінами (в порівнянні з початковим рівнем), яка не дає можливості трактувати як значну реакцію для даної людини;

3. Жовтий колір: під час обстеження спостерігається збільшення хвильової активності, при допустимих для норм межах (збуджуючий ефект);

4. Синій колір: спостерігається зниження частоти (в межах допустимих норм), зміна форми хвильової активності (від загостреної на синусоїдальну для бета-ритму);

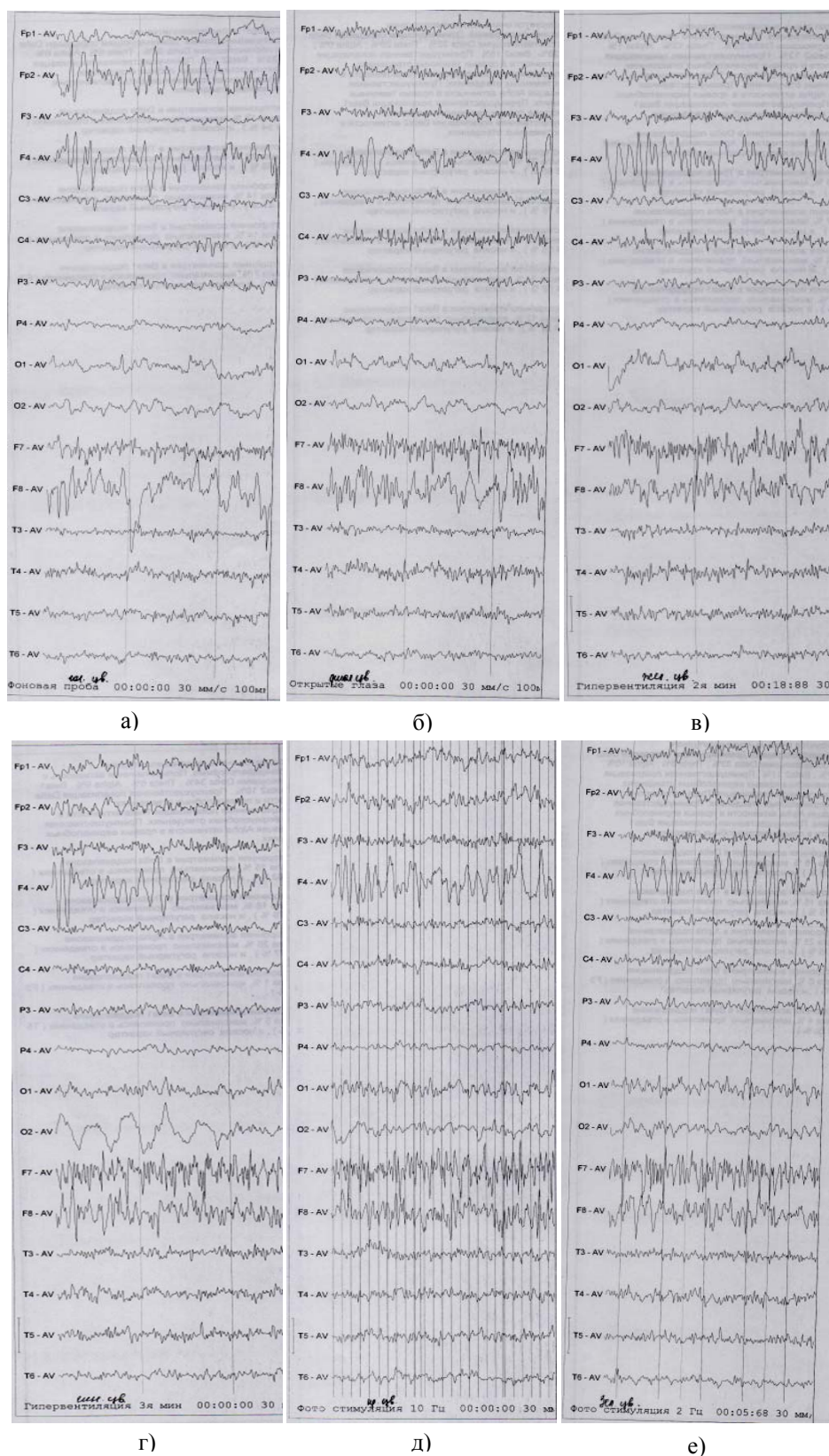
5. Червоний колір: відмічена дуже високочастотна електроенцефалограма зі збільшенням бета-індексу до критичних значень (стурбованість, стрес), а також одинична спайк-активність (епіактивність);

6. Зелений колір: спостерігається зниження амплітуди (але збереження в межах нижніх норм) відновлення зонних відмінностей, поліпшується модуляція хвиль, що можна розглядати як заспокійливий вплив.

За результатами проведених клінічних експериментальних досліджень виготовленого пристрою отримано акт проведення науково-дослідної роботи.

Отже, за результатами клінічних досліджень можна зробити наступні висновки: дійсно демонстрація різнокольорових світлових ефектів впливає на психоемоційний стан людини та у разі підбору спеціальної програми або ефекту в змозі його покращити. Звісно можливий і зворотній ефект – некоректно підібрана програма може навпаки погіршити психоемоційний стан. Наприклад, демонстрація швидкого мерехтіння червоного кольору може посилити дратівливість та стурбованість людини, або навпаки плавна зміна синього кольору буде посилювати бажання спати. Перевагою є те, що в даному випадку можна змінити програму на бажану або в гіршому випадку вимкнути прилад зовсім.

В цілому застосування приладу передбачає наступне. Розроблений прилад розміщується в кімнаті на стіні (рис. 6). Користувач обирає потрібну для себе програму або світловий ефект. Так, наприклад, вранці демонстрація збудливих програм з високими частотами зміни кольорів і переважанням червоного та жовтого кольору дозволить швидше прокинутися. У вечері, навпаки, демонстрація програм з плавними змінами кольорів і переважанням синього та зеленого кольорів дозволить швидше заспокоїтися і налаштуватися на нічний сон. Протягом дня можлива демонстрація «нейтральних» програм, що створить робочу атмосферу та налаштує на працю.



а) блакитного кольору; б) фіолетового кольору; в) жовтого кольору; г) синього кольору;  
д) червоного кольору е) зеленого кольору

Рисунок 5 – Енцефалограми головного мозку дослідної людини під час застосування пристрою корекції психоемоційного стану

Джерело: КНП «Обласна клінічна психіатрична лікарня Кіровоградської обласної ради»



а)



б)

а) зовнішній вигляд розробленого пристрою в робочому стані; б) портативна версія розробленого пристрою без вимірювання і відображення параметрів мікроклімату

Рисунок 6 – Зовнішній вигляд розробленого пристрою корекції психоемоційного стану  
*Джерело: розроблено авторами*

Використання приладу не передбачає постійне пряме спостереження за демонстрацією світлових ефектів, адже вплив на психоемоційний стан можливий і у так званому «фоновому» режимі, коли світлові ефекти спостерігаються бічним зором.

**Висновки.** Сукупність проведених у роботі досліджень являє собою рішення задач в області створення електронних пристроїв для медичних цілей. В результаті проведеного дослідження розроблено електронний пристрій для корекції психоемоційного стану людини, який створює різнокольорові світлові ефекти, що впливатимуть на психоемоційний стан людини. Реалізовано дистанційне керування пристроєм, що випромінює різнокольорові світлові ефекти по bluetooth за допомогою смартфона. Пристрій вимірює основні параметри мікроклімату навколишнього середовища (температуру, вологість, атмосферний тиск) та керуватиме побутовими приладами (зволожувач повітря, кондиціонер, опалення тощо) для створення комфортних умов людини у приміщенні. Виготовлена діюча модель розробленого

пристрою для корекції психоемоційного стану людини. Доведена дієвість розробленого пристрою для корекції психоемоційного стану людини шляхом проведення клінічних експериментальних досліджень на базі КНП «Обласна клінічна психіатрична лікарня Кіровоградської Обласної Ради». Зняті енцефалограми головного мозку без застосування та з застосуванням виготовленого пристрою та отримані позитивні результати. За результатами проведених клінічних експериментальних досліджень виготовленого пристрою отримано акт проведення науково-дослідної роботи.

## Список літератури

1. Задорожна Мар'яна. Хронічна втома — ще не хвороба, але вже й не здоров'я . *Охорона праці і пожежна безпека: журнал*. 2016. № 12. URL: <https://oppb.com.ua/content/hronichna-vtoma-shche-ne-hvoroba-ale-vzhe-y-ne-zdorovya> (дата звернення: 21.12.2020)
2. Інна Набока. Модний діагноз. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/969682.html> (дата звернення: 23.12.2020)
3. Мозок сприймає різні кольори через окремі схеми активності. URL: <https://www.nauka.ua/news/mozok-spriymaye-rizni-kolori-cherez-okremi-shemi-aktivnosti?fbclid=IwAR1PqOxLE049UfUtBm6OeRxLGnqPH-CeKxgcr2aBjXEljGV4XjJly3id8> (дата звернення: 23.12.2020)
4. Татьяна Филиппова. Школа жизни . *Познавательный журнал*. 2011. Вып. 22. URL: <https://shkolazhizni.ru/psychology/articles/44255/> (дата звернення: 21.12.2020)
5. Гете И. В. К учению о цвете. Хроматика. Очерк учения о цвете. Москва, 1957. URL: <https://psyfactor.org/lib/gete.htm> (дата звернення: 27.12.2020)
6. Петренко В. Ф. Взаимосвязь эмоций и цвета. *Вестник Московского университета. Серия психология*, 3. 1998. С. 132-141.
7. LED-терапия в уходе за лицом: как работает и кому подойдет. URL: <https://www.make-and-up.com/how-led-therapy-works/> (дата звернення: 27.12.2020)
8. Мікроклімат та його вплив на працездатність людини. URL: <https://consumerhm.gov.ua/956-mikroklimat-ta-jogo-vpliv-na-pratsezdattnist-lyudini> (дата звернення: 27.12.2020)
9. Вплив параметрів мікроклімату на самопочуття людини. URL: <https://buklib.net/books/29817/> (дата звернення: 17.01.2021)
10. Вплив погоди та клімату на самопочуття людини. URL: <https://www.lookfantastic.com/nuface-trinity-wrinkle-reducer-twr-attachment/11395162.html> (дата звернення: 15.01.2021)

## References

1. Zadorozhna Mar'yana. (2016). Khronichna vtoma — sche ne khvoroba, ale vzhe j ne zdorov'ia [Chronic vtoma - not sickness yet, even if not healthy]. *Okhorona pratsi i pozhezhna bezpeka – Protection of pratsi and pozhna bezpeka*, 12, Retrieved from <https://oppb.com.ua/content/hronichna-vtoma-shche-ne-hvoroba-ale-vzhe-y-ne-zdorovya> [in Ukrainian].
2. Inna Naboka. Fashion diagnosis. *www.radiosvoboda.org*. Retrieved from <https://www.radiosvoboda.org/a/969682.html> [in Ukrainian].
3. Mozok spriymae izni colori through okremi schemes of activity. *www.nauka.ua*. Retrieved from <https://www.nauka.ua/news/mozok-spriymaye-rizni-kolori-cherez-okremi-shemi-aktivnosti?fbclid=IwAR1PqOxLE049UfUtBm6OeRxLGnqPH-CeKxgcr2aBjXEljGV4XjJly3id8> [in Ukrainian].
4. Tat'jana Filippova. (2011). Shkola zhizni [School of Life] . *Poznavatel'nyj zhurnal – Cognitive magazine*. Vol. 22. Retrieved from <https://shkolazhizni.ru/psychology/articles/44255/> [in Russian].
5. Gete, I. V. (1957). *K ucheniju o cvete. Hromatika. Ocherk uchenija o cvete. [To the doctrine of color. Chromatics. Essay on the doctrine of color.]* Moskva. Retrieved from <https://psyfactor.org/lib/gete.htm> [in Russian].
6. Petrenko, V. F. (1998). Vzaimosvjaz' jemocij i cveta [The relationship of emotion and color.]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija psihologija – Moscow University Bulletin. Psychology series*, 3, 132-141 [in Russian].
7. LED-therapy in facial care: how it works and who is it for. *www.make-and-up.com*. Retrieved from <https://www.make-and-up.com/how-led-therapy-works/> [in Russian].
8. Mikroklimat and yogo injected onto the patriotic status of the people. *consumerhm.gov.ua*. Retrieved from <https://consumerhm.gov.ua/956-mikroklimat-ta-jogo-vpliv-na-pratsezdattnist-lyudini> [in Ukrainian].

9. Infusion of parameters into microclimate for self-esteem of people. *buklib.net*. Retrieved from <https://buklib.net/books/29817/> [in Ukrainian].
10. Inspire, wait and see the klimata on the self-esteem of the people. *www.lookfantastic.com*. Retrieved from <https://www.lookfantastic.com/nuface-trinity-wrinkle-reducer-twr-attachment/11395162.html> [in Ukrainian].

**Valerii Shchiepin**

*Junior Academy of Sciences of Ukraine Kirovograd Region, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Dmytro Trushakov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Sirikov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Creating a Device for the Correction of Psycho-Emotional State of People**

The article is devoted to the process of correction (improvement) of a person's psycho-emotional state by creating an electronic device that emits multicolored light effects.

The set of researches carried out in the work represents the solved problems in the field of creation of electronic devices for medical purposes. On the basis of the analysis of existing devices, an own design of an electronic device is proposed, based on the emission of various light effects, which allows you to correct the psychoemotional state of a person. A working model of an electronic device has been manufactured, it emits multi-colored light effects, and also measures the main parameters of the environment - temperature, humidity and pressure. Experimental clinical studies of the manufactured device were conducted in the hospital of the Regional Clinical Psychiatric Hospital of the Kirovohrad Regional Council. Experimental clinical studies of the manufactured device were performed by taking encephalograms of the brain.

Obtained positive results, confirming the ability of this device to improve the psycho-emotional state of a person.

**electronic device, microcontroller, multicolored light effects, psycho-emotional state of a person**

*Одержано (Received) 05.02.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ**

УДК 621.869

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).111-119](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).111-119)**С.Л. Хачатурян**, доц., канд. техн. наук*Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: serg130354@gmail.com***О.І. Іваненко**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Щербак**, доц., канд. техн. наук*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна**e-mail: kaf\_bdm@ukr.net, olegcherbak@gmail.com*

## Дослідження впливу навантаженості на конструктивні елементи шарнірних машин для дорожнього будівництва

Останнім часом у дорожньому будівництві зростає номенклатура дорожньо-будівельної техніки, базовими агрегатами котрих є шарнірно-зчленовані тягачі. Виникає гостра необхідність у дослідженні робочих процесів таких машин. Характерним для робочого режиму шарнірно-зчленованих будівельно-дорожніх машин є виникнення значних динамічних навантажень на робоче обладнання та елементи конструкції при виконанні ними різноманітних технологічних операцій. У зв'язку з цим нагальним є проведення досліджень, спрямованих на визначення впливу динамічних навантажень на найбільш вразливі елементи конструкції шарнірно-зчленованої машини, а саме – шарнірне з'єднання піврам і гідроциліндрів рульового механізму. Проведено дослідження навантаженості конструктивних елементів шарнірно-зчленованих машин (шарнірного з'єднання та гідроприводу рульового керування) в робочому режимі, який відповідає явищу нищпорення. Дослідження виконано на базі узагальненої математичної моделі з використанням комп'ютерного моделювання. Саме такий підхід дозволяє використовувати результати досліджень при проектуванні та виготовленні шарнірно-зчленованих будівельно-дорожніх машин для забезпечення високого рівня надійності.

**навантажувач, шарнірна рама, гідропривід, рульове керування, нищпорення, дослідження, математичне моделювання**

**Постановка проблеми.** Шарнірно-зчленовані машини знаходять все більш широке застосування завдяки можливості створення на їх базі комплексу машин для дорожнього будівництва, ремонту та утримання доріг. Тому виникає необхідність їх всебічного дослідження з метою підвищення їх надійності та довговічності. Одним з основних вузлів шарнірно-зчленованих машин є шарнірне зчленування та гідропривід рульового управління, котрі забезпечують обертання напіврам навколо вертикального шарніра. У зв'язку з цим необхідне проведення дослідження навантаженості цих елементів, надійність і довговічність роботи котрих визначає якість виконання технологічного режиму шарнірно-зчленованих машин.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** На початку 90-х років минулого століття було запропоновано створення комплексу будівельно-дорожніх машин для будівництва, ремонту та утримання доріг на базі трактора К-701 з шарнірно-зчленованою рамою [1, 2]. У подальшому вирішувалися питання доцільності модульного формування будівельно-дорожніх машин [3] і обґрунтовувалась концепція

модульного проектування машин будівельного та дорожнього призначення [4], яка повинна була б містити не тільки конструктивний пошук, але й вирішувати питання їх аналітичного дослідження з метою встановлення екстремальних навантажень і режимів навантаження.

Як показали експериментальні дослідження [5], найбільш навантаженими машинами комплексу, які сприймають значні динамічні навантаження є машини напірної дії – фронтальний навантажувач та колісний бульдозер. При виконанні технологічних операцій можливо різке стопоріння машини, іноді супроводжувальне ударом робочого обладнання о перешкоду, яку важко подолати. При цьому виникають значні динамічні навантаження, які передаються на конструктивні елементи машини.

При оцінці динамічного навантаження, в якості розрахункового приймався випадок, коли навантажувач чи бульдозер при виконанні робочих операцій зустрічаються ковшем (відвалом) з перешкодою. Аналіз отриманої математичної моделі показує що істотний вплив на навантаженість гідروприводу рульового керування здійснює місце прикладення зусилля до ковша, кут складання напіврам і початкова швидкість руху машини. При цьому недостатньо дослідженими залишилися питання визначення впливу характеристик матеріалу, котрий розроблюється, та жорсткості шин, які вимагають подальшого вивчення.

**Постановка завдання.** На основі відомих досліджень отримати математичну модель і дослідити динамічні навантаження на шарнірне з'єднання напіврам і гідроциліндри рульового керування за допомогою комп'ютерного моделювання.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо вирішення поставленої задачі на прикладі шарнірно-зчленованого навантажувача у два етапи: створення та дослідження математичної моделі динамічної взаємодії робочого обладнання з розроблюваним середовищем і проведення машинного експерименту з метою визначення навантаження на несучу систему.

Навантаження, які сприймає навантажувач у випадку зустрічі ківша з перешкодою, максимальні, а іноді близькі до аварійних. При цьому ударна взаємодія передається на шарнірне з'єднання напіврам і гідроциліндри рульового керування, викликаючи їхнє передчасне руйнування. Для проведення всебічного дослідження цього режиму була розроблена математична модель, яка базується на фізичній моделі навантажувача, котра являє собою систему, що складається з трьох елементів: напіврама, на котрій встановлена силова установка (енергетичний модуль), напіврама з спеціальним обладнанням (технологічний модуль) і з'єднувально-керуючий модуль. Положення еквівалентної розрахункової динамічної моделі в горизонтальній площині (рис. 1) визначається трьома узагальненими координатами: поздовжнім переміщенням навантажувача ( $y$ ); кутами повороту його напіврам у горизонтальній площині щодо початкового положення ( $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ ).

У якості математичного апарату моделювання динаміки розглянутої механічної системи скористаємося рівняннями Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} = Q_k, \quad (1)$$

де  $T$  – кінетична енергія;

$\Pi$  – потенційна енергія розглянутої механічної системи;

$Q_k$  – узагальнені сили системи;

$q_k$  – узагальнені можливі переміщення системи.

За узагальнені координати розглянутої механічної системи приймемо:  $q_1=y$ ,  $q_2=\varphi_1$ ,  $q_3=\varphi_2$  – кутові переміщення напіврам щодо осі вертикального шарніру. Кінетична енергія системи дорівнює:



$$T = T_1 + T_2, \quad (2)$$

де  $T_1$  – кінетична енергія технологічного модуля;

$T_2$  – кінетична енергія енергетичного модуля.

Оскільки енергетичний і технологічний модулі виконують плоский рух, їхня кінетична енергія визначається залежностями:

$$T_1 = \frac{1}{2}(m_1 \cdot V_1^2 + J_1 \cdot \dot{\varphi}_1^2) \quad (3)$$

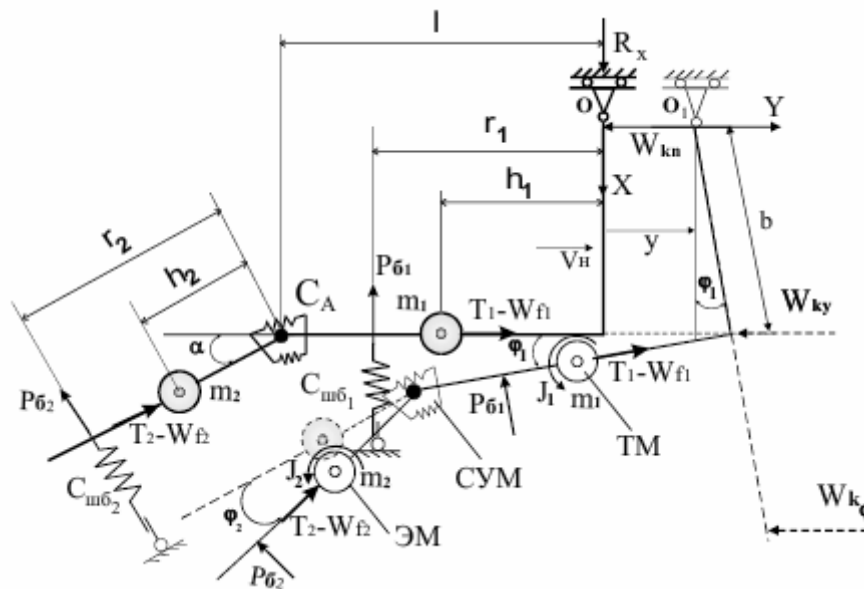
$$T_2 = \frac{1}{2}(m_2 \cdot V_2^2 + J_2 \cdot \dot{\varphi}_2^2)$$

де  $m_1, m_2$  – маса відповідно технологічного та енергетичного модуля;

$V_1, V_2$  – абсолютні швидкості центрів мас відповідно технологічного та енергетичного модуля;

$J_1, J_2$  – власні моменти інерції відповідно технологічного та енергетичного модуля;

$\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$  – кутові швидкості відповідно технологічного та енергетичного модуля.



$T_1, T_2$  – окружні зусилля на ведучих колесах;  $W_k$  – опір копанню;  $W_{f1}, W_{f2}$  – опір переміщенню;  $P_{61}, P_{62}$ , – бічні зусилля в області контакту шин з опорною поверхнею;  $m_1, J_1$  – маса й момент інерції щодо осі, що проходить перпендикулярно до опорної площини через центр мас  $O_1$  технологічного модуля;  $m_2, J_2$  – маса й момент інерції щодо осі, що проходить перпендикулярно опорної площини через центр мас  $O_2$  енергетичного модуля; СУМ – з'єднувально-керуючий модуль; ТМ – технологічний модуль; ЕМ – енергетичний модуль

Рисунок 1 – Еквівалентна розрахункова динамічна модель

Джерело: [6]

Потенційна енергія обумовлена круговою жорсткістю  $C_A$  рульового механізму:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_A (\varphi_2 - \varphi_1)^2. \quad (4)$$

Після підстановки формул узагальнених сил у рівняння Лагранжу отримуємо систему диференціальних рівнянь, що описують робочий процес навантажувача:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & (m_1 + m_2)\ddot{y} + (m_1 + m_2)b \cdot \ddot{\varphi}_1 + m_2 \cdot h_2 \cdot \sin\alpha \cdot \ddot{\varphi}_2 = T_1 + T_2 \cdot \cos\alpha - P_{b2} \cdot \sin\alpha - \\
 & \quad - W_{kn} - W_{ky} - W_{k\varphi}; \\
 & (m_1 + m_2)b \cdot \ddot{y} + [J_1 + m_1(h_1^2 + b^2) + m_2(l^2 + b^2)]\ddot{\varphi}_1 + m_2(l \cdot h_2 \cdot \cos\alpha + \\
 & \quad + b \cdot h_2 \cdot \sin\alpha)\ddot{\varphi}_2 = T_1 \cdot b + T_2(b \cdot \cos\alpha - l \cdot \sin\alpha) - P_{b1} \cdot r_1 - P_{b2}(l \cdot \cos\alpha + \\
 & \quad + b \cdot \sin\alpha) + C_A(\varphi_2 - \varphi_1) - W_{ky} \cdot 2/3 \cdot \left(b + \frac{b_k}{2}\right); \\
 & m_2 \cdot h_2 \cdot \sin\alpha \cdot \ddot{y} + m_2(l \cdot h_2 \cdot \cos\alpha + b \cdot h_2 \cdot \sin\alpha)\ddot{\varphi}_1 + (J_2 + m_2 \cdot h_2^2)\ddot{\varphi}_2 = \\
 & \quad = -P_{b2} \cdot r_2 - C_A(\varphi_2 - \varphi_1).
 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

У результаті розв'язання системи диференціальних рівнянь були отримані значення всіх шуканих величин: час процесу; швидкість і переміщення навантажувача; кутова швидкість і кутове переміщення технологічного модуля; кутова швидкість і кутове переміщення енергетичного модуля; сили тяги, що розвивають енергетичний і технологічний модулі; бічні реакції на колесах; складові сили опору копанню на робочому обладнанні  $t, V_y, y, \omega_1, \varphi_1, \omega_2, \varphi_2, T_1, T_2, P_{b1}, P_{b2}, W_{kn}, W_{ky}, W_{k\varphi}$ .

Особливістю створеної математичної моделі є можливість оцінити навантаження гідроприводу рульового керування в процесі зіткнення ківша з масивною перешкодою при його зануренні в розроблювальний матеріал.

Для цього в середовищі *MathCAD* створений розрахунковий блок, що дозволяє на базі аналізу роботи рульового механізму оцінити рівень навантаженості гідроприводу рульового керування.

При різкому стопорінні навантажувача відбувається поворот задньої напіврами (енергетичного модуля) відносно осі вертикального шарніра на кут  $\varphi_2$  (рис. 2). Це спричиняє різкий стрибок тиску в гідроприводі механізму рульового керування. На розрахунковій схемі гідроциліндри замінені еквівалентними їм пружинами із жорсткістю  $C_1, C_2$ . Жорсткість гідроциліндрів рульового керування, а на навантажувачі Т-156 у гідроприводі рульового керування встановлені гідроциліндри ЦС-80, прийнята  $2 \cdot 106 \text{ Н/м}$  на основі експериментально визначених даних [5].

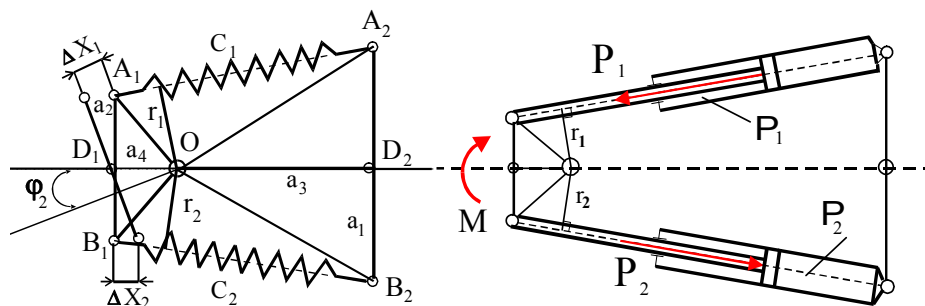


Рисунок 2 – Розрахункова схема для визначення тиску та кругового моменту у механізмі складання напіврам

Джерело: розроблено авторами з використанням [6]

Виконавши аналіз геометрії механізму рульового керування за методикою [5], що дозволяє розрахунковим шляхом визначити тиск у гідроциліндрах рульового керування, та відповідно зусилля котрі передаються на несучу систему базового тягача, отримана залежність для визначення тиску в гідроприводі механізму:

$$P = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 (r_1 + r_2) - \pi \cdot d^2 \cdot r_1}, \quad (6)$$

де  $M$  – круговий момент, що виникає в рульовому механізмі;  
 $r_1, r_2$  – плечі зусиль (рис. 2);

$D$  – діаметр поршня гідроциліндра;

$d$  – діаметр штока гідроциліндра.

Круговий момент  $M$  визначається залежністю

$$M = C_A (\varphi_2 - \varphi_1). \quad (7)$$

Результатом розрахунку математичної моделі була оцінка ступеня навантаженості гідроприводу рульового керування в момент занурення ковша навантажувача в розроблювальний масив, супроводжуваного зустріччю його із перешкодою яку важко подолати. Аналіз математичної моделі показав, що істотний вплив на формування навантаженості з'єднувально-керуючого модуля здійснює координата прикладення –  $b$ , сили копання –  $W_k$ , швидкість занурення –  $V_n$ , кут складання напіврам –  $\alpha$ . У випадку прикладення зовнішньої сили опору копанню  $W_k$  по центру ковша (центральный удар), зміна тиску в гідроприводі механізму керування залежить від кута складання  $\alpha$ .

Зі збільшенням кута  $\alpha$  зростає й тиск. При центральному ударі максимальне значення величини тиску досягає в крайньому положенні  $\alpha=30^\circ$  і становить  $17\text{МПа}$ . Збільшення  $\alpha$  веде також і до збільшення часу циклу  $t_{\text{ц}}$ . Якщо при взаємодії з кутом  $\alpha=5^\circ$ , тиск досягає найбільшого значення за  $0,324\text{с}$ , а весь процес триває  $0,486\text{с}$ , тоді як у крайньому положенні  $\alpha=30^\circ$ , максимум досягається за  $0,441\text{с}$ , а процес протікає  $0,729\text{с}$ . Істотний вплив на величину навантаження гідроприводу рульового керування здійснює місце прикладення сили до ковша. Якщо розглянути процес удару краєм ківша об перешкоду при прямолінійному русі ( $\alpha=0^\circ$ ) з початковою швидкістю  $1,2\text{м/с}$ , то тиск при цьому становить  $26,3\text{МПа}$ . Цей процес можна розділити на три фази: перший пік відповідає удару об тверду перешкоду, наступні стрибки тиску пов'язані з продовженням занурення в масив матеріалу й третя фаза – сталий стаціонарний тиск.

У ході математичного моделювання було проведено ранжирування факторів, які впливають на навантаженість гідроприводу з'єднувально-керуючого модуля.

У загальному випадку тиск залежить від таких факторів:  $P=f(B, \alpha, V_n, C_A, C_{\text{шб}}, C_{\text{ро}})$ , де  $B$  – координата прикладення опору копанню;  $\alpha$  – кут між напіврамами навантажувача;  $V_n$  – початкова швидкість, при якій відбувалося занурення в масив;  $C_A$  – кругова жорсткість рульового механізму;  $C_{\text{шб}}$  – бічна жорсткість шин;  $C_{\text{ро}}$  – жорсткість робочого обладнання. Ступінь вплив всіх вказаних факторів представлена на рис. 3.

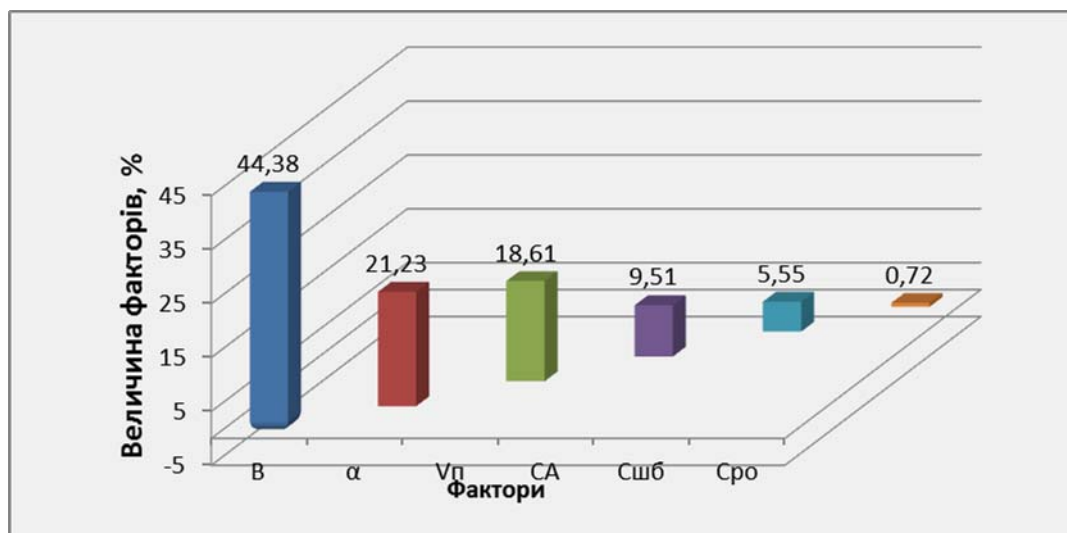


Рисунок 3 – Значимість впливу факторів, що визначають навантаженість гідроприводу з'єднувально-керуючого органу

Джерело: розроблено авторами

При виконанні технологічних операцій машинами напірного дії (фронтальний навантажувач, колісний бульдозер) виникає явище рискання, котре обумовлюється асиметричним додатком зовнішнього навантаження з боку ґрунту на ківш фронтального навантажувача чи відвал колісного бульдозера, що викликає кутовий зсув енергетичного модуля машини [6]. За характеристику рискання нами був прийнятий круговий момент, що виникає в з'єднувально-керуючому механізмі, котрий лінійно залежить від кругової жорсткості та кута рискання. При цьому величина кута рискання в першу чергу визначається круговою жорсткістю  $C_A$  з'єднувально-керуючого модуля й бічною жорсткістю шин, яка входить у бічну силу  $P_{b1}$ , а також характеристикою ґрунту, що розроблюється.

Для визначення навантаження на несучу систему був проведений машинний експеримент, який дозволив вивчити вплив дії ударних навантажень від робочого обладнання на шарнірне з'єднання напіврам.

Машинний експеримент був проведений при постійному значенні кругової жорсткості, що дорівнює  $500\text{кНм}$ , і різних значеннях жорсткості шин, які приймалися рівними  $500$ ,  $750$  і  $1000\text{кН/м}$ , і таких характеристиках ґрунту:  $A=23\text{кН/м}$ ,  $C=15,27\text{кН/м}^2$ ,  $D=20\text{кН/м}^3$ . На рис. 4÷6 представлені графіки зміни кругового моменту при цих параметрах.

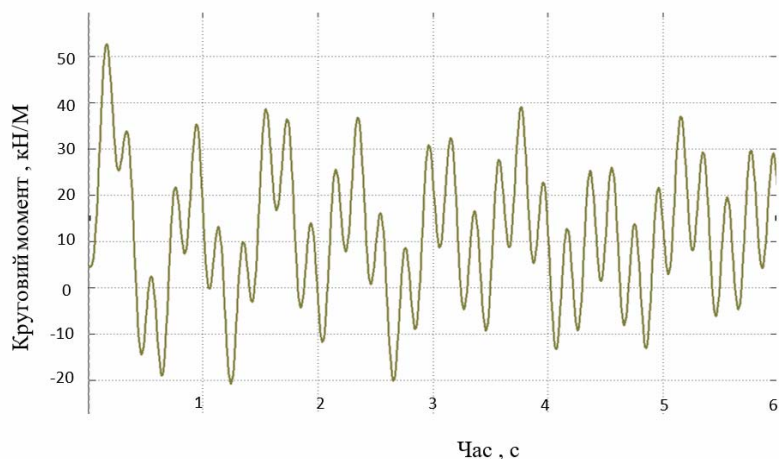


Рисунок 4 – Зміна кругового моменту при жорсткості шини  $500\text{кН/м}$

Джерело: розроблено авторами

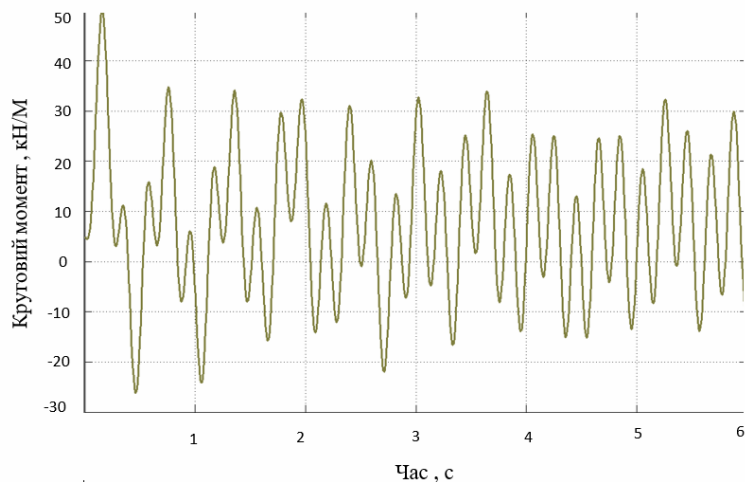


Рисунок 5 – Зміна кругового моменту при жорсткості шини  $750\text{кН/м}$

Джерело: розроблено авторами

На рис. 7÷9 наведені графіки зміни кругового моменту при рівних значеннях кругової жорсткості та шин, але з іншими характеристиками ґрунту:  $A=95\text{кН/м}$ ,  $C=63\text{кН/м}^2$ ,  $D=83\text{кН/м}^3$ , які характеризують найбільш важкий ґрунт.

З графіків видно, що на характер зміни величини кругового моменту впливає як кругова жорсткість, так і характеристики ґрунту що розробляється. Все це свідчить про необхідність подальших досліджень з метою вироблення практичних рекомендацій.

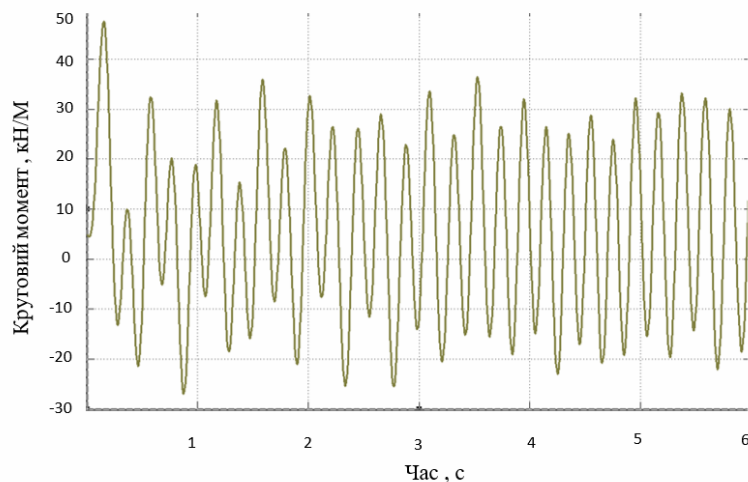


Рисунок 6 – Зміна кругового моменту при жорсткості шини  $1000\text{кН/м}$

Джерело: розроблено авторами

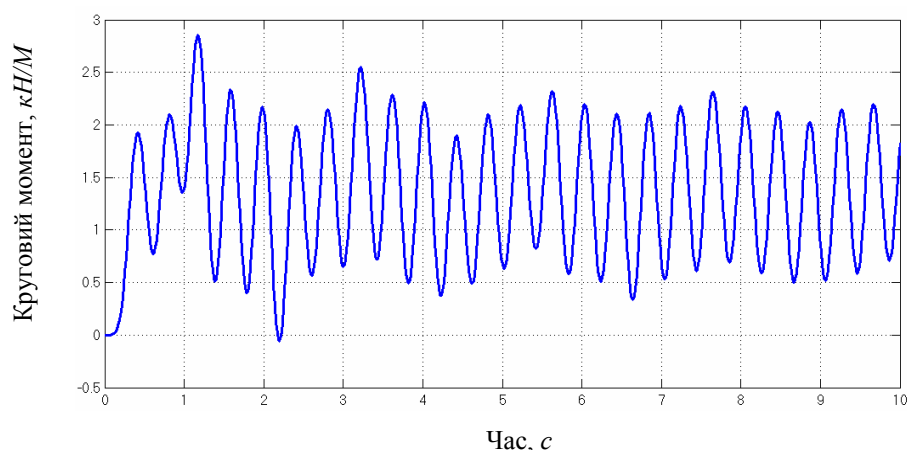


Рисунок 7 – Зміна кругового моменту при  $C=250\text{кН}\cdot\text{м/рад}$

Джерело: розроблено авторами

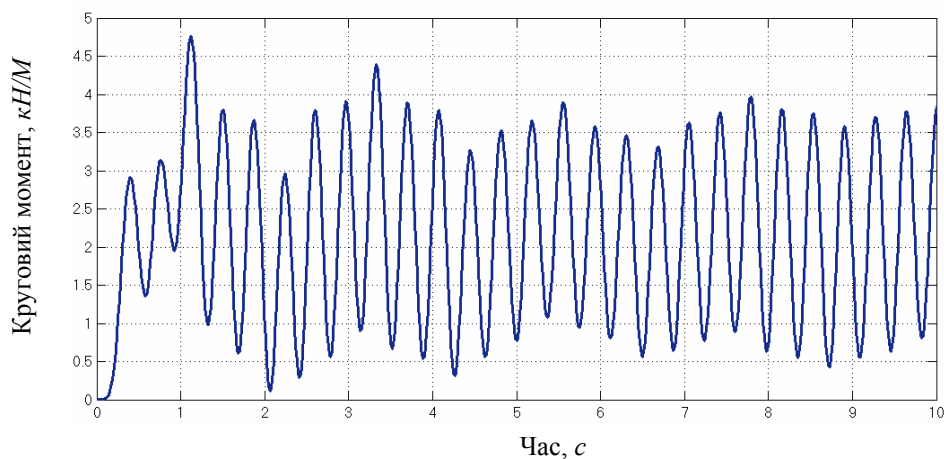
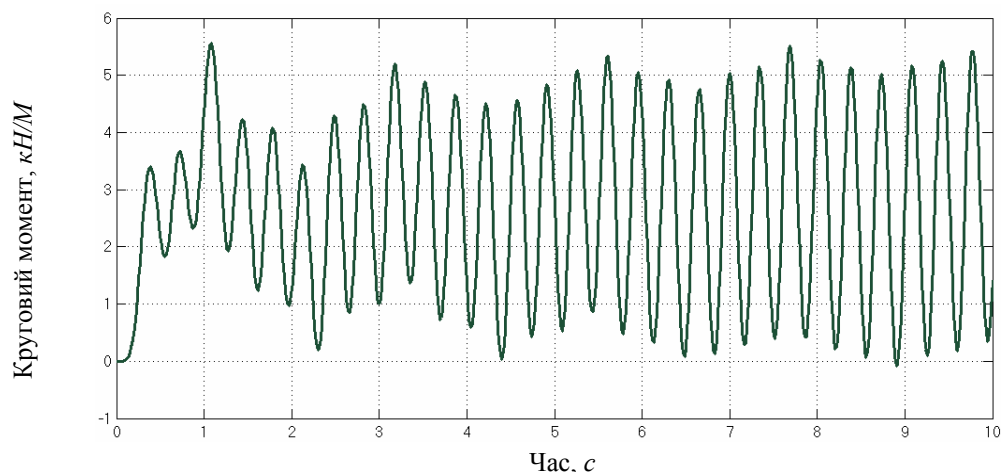


Рисунок 8 – Зміна кругового моменту при  $C=500\text{кН}\cdot\text{м/рад}$

Джерело: розроблено авторами

Рисунок 9 – Зміна кругового моменту при  $C=750\text{кН}\cdot\text{м/рад}$ 

Джерело: розроблено авторами

**Висновки.** 1. Розглянута можливість створення комплексу машин для дорожнього будівництва на базі колісного трактора Т-150К з шарнірно-з'єднаною рамою. Встановлено необхідність врахування особливостей технологічного процесу будівництва доріг і експлуатаційних режимів навантаження.

2. Прийнята еквівалентна динамічна модель навантажувача адекватно відображає фізичну сутність процесів, які відбуваються в гідроприводі рульового механізму з'єднувально-керуючого пристрою. Аналіз математичної моделі показав, що істотний вплив на навантаженість гідроприводу рульового керування здійснює місце прикладення сили до ковша, кут складання напіврам і початкова швидкість руху навантажувача.

3. У ході дослідження встановлено, що місце прикладення сили до ківшу визначає, який з гідроциліндрів повороту буде навантажений. При взаємодії середньою частиною й краєм ковша, протилежним напрямку повороту, навантаженим виявляється гідроциліндр  $P_2$ . А при взаємодії місцем від середини й до краю в бік повороту – гідроциліндр  $P_1$ . Збільшення кута складання напіврам веде до росту величини тиску, так при взаємодії середньою частиною ковша (центральному удару) зміна кута з  $0^\circ$  до  $15^\circ$  викликає ріст значення тиску від  $0$  до  $17\text{МПа}$ .

4. Результати аналітичного дослідження дають можливість розробити практичні рекомендації зі зниження навантаженості гідроприводу рульового керування й металоємкості з'єднувально-керуючого пристрою. Проведені дослідження зміни кругового моменту з'єднувально-керуючого модуля з урахуванням характеристик матеріалу, який розроблюється, та жорсткості шин, засвідчили необхідність урахування цих додаткових навантажень при розрахунку рами шарнірної машини та гідроприводу керування.

## Список літератури

1. Попов Н.С., Баловнев В.И. Развитие дорожно-строительного машиностроения на конвертируемых предприятиях: Строительные и дорожные машины, 1994. №10. С.2-8.
2. Попов Н.С., Баловнев В.И. Перспективные отечественные дорожно-строительные машины и комплексы. *Строительные и дорожные машины*. 1996. №6. С. 2-6.
3. Кухтов В.Г., Щербак О.В. Модульное формирование строительно-дорожных машин. *Труды первой городской конференции «Актуальні проблеми сучасної науки у дослідженнях молодих вчених м. Харкова»*, АТ Бізнес Інформ», 1997. С. 50-52.
4. Кириченко И.Г. Модульная концепция проектирования технологических машин для строительного производства. Харьков: Издательство ХНАДУ, 2002. 119 с.
5. Щербак О.В. Разработка рациональных параметров соединительно-управляющего модуля фронтального погрузчика: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Харьков, 2000. 130 с.

6. Іваненко О.І., Щербак О.В. Дослідження впливу навантаженості на конструктивні елементи шарнірних машин для дорожнього будівництва. (Частина 1. Теоретичні дослідження) . *Наукові вісти Давіського університету* (Електронне видання). 2019. №16.

## References

1. Popov, N.S., Balovnev, V.I.(1994). Razvitiye dorozhno-stroitel'nogo mashinostroyeniya na konvertiruyemykh predpriyatiyakh [Development of road-building machine-building at convertible enterprises]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny – Building and road machines. 10, 2–8* [in Russian].
2. Popov, N.S., Balovnev, V.I.(1996). Perspektivnyye otechestvennyye dorozhno-stroitel'nyye mashiny i komplekсы [Promising domestic road-building machines and complexes]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny – Building and road machines. 6, 2–6* [in Russian].
3. Kukhtov, V.G., Shcherbak, O.V.(1997). Modul'noye formirovaniye stroitel'no-dorozhnykh mashin [Modular formation of road construction machines]. *Trudy pervoy gorodskoy konferentsii «Aktual'ni problemy suchasnoyi nauky u doslidzhennykh molodykh vchenykh m. Kharkova» – Proceedings of the first city conference "Actual problems of modern science in the research of young scientists in Kharkiv". 50-52* [in Russian].
4. Kirichenko, I.G.(2002). Modul'naya kontsepsiya proyektirovaniya tekhnologicheskikh mashin dlya stroitel'nogo proizvodstva [Modular concept for the design of technological machines for the construction industry]. Kharkiv: Izdatel'stvo KHNADU [in Russian].
5. Shcherbak, O.V.(2000). Razrabotka ratsional'nykh parametrov soyedinitel'no-upravlyayushchego modulya frontal'nogo pogruzchika [Development of rational parameters of the front loader connecting and control module]: *Candidate's thesis*. Kharkiv [in Russian].
6. Ivanenko, O.I., Shcherbak, O.V.(2019). Doslidzhennya vplyvu navantazhenosti na konstruktyvni elementy sharnirnykh mashyn dlya dorozhn'oho budivnytstva. (Chastyna 1. Teoretychni doslidzhennya) [Investigation of the influence of load on the structural elements of articulated machines for road construction. (Part 1. Theoretical research)]. *Naukovi visti Daliv's'koho universytetu (Elektronne vydannya)*. – *Scientific news of Daliv University (Electronic edition)*. 16 [in Ukrainian].

**Serhiy Khachatryan**, Assoc. Prof., PhD in tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Oleh Ivanenko**, Assoc. Prof., PhD in tech. sci., **Oleh Shcherbak**, Assoc. Prof., PhD in tech. sci.

*National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

## **Research of the Effect of Loading on Structural Elements of Articulated Machines for Road Construction**

On the basis of machines with an articulated frame it is possible to create a complex of machines for road construction, repair and maintenance. Therefore, a number of comprehensive studies are needed to increase their reliability and durability. This is especially true of the main joints of the articulated joint and the hydraulic steering, which ensure the rotation of the frame parts around the vertical hinge.

The research was performed in two stages. At the first stage the mathematical model of dynamic interaction of the working equipment of the car with the developed environment was created and investigated. In the second stage, a machine experiment was performed to determine the loads on the bearing system. The mathematical model is based on the physical model of the loader, which consists of three elements: two hinged parts of the frame, one installed energy module, the other – the technological module and the connecting and control module. The Lagrange equation of the second kind served as a basis for modeling the dynamics of the equivalent calculated dynamic model. The solution of the complex system of differential equations allowed to obtain all the required values, which have a significant impact on the formation of the load of the coupling-control device. According to the results of mathematical modeling, the ranking of factors that affect the load of the hydraulic drive of the coupling and control device. The machine experiment allowed to determine the load on the load-bearing system and to study the effect of the impact loads from the working equipment on the hinged connection of the frame parts.

As the analysis of the mathematical model showed, the place of application of force to the bucket, the angle of assembly of the frame parts and the initial speed of the loader have a significant effect on the load of the hydraulic drive. The load of the hydraulic cylinders is determined by the place of application of force to the bucket. The change in the circular torque of the coupling and control module, taking into account the characteristics of the material being developed and the stiffness of the tires, must be taken into account when calculating the frame of the articulated machine and the hydraulic drive.

**loader, articulated frame, hydraulic drive, steering, dredging, research, mathematical modeling**

*Одержано (Received) 06.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 628.14

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).120-126](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).120-126)

**В.В. Клименко**, проф., д-р техн. наук, **Н.В. Ковальчук**, викл., **В.І. Гуцул**, доц., канд. техн. наук, **Р.В. Телюта**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: klymvas@ukr.net*

## Проблема надійності водопровідних мереж на прикладі міста Кропивницького

В статті проаналізовано причини аварій та витоків на водопровідних трубах розподільчої мережі м. Кропивницького та обраховано статистичні дані експлуатаційної організації по аварійним ситуаціям при експлуатації трубопроводів діаметром від 25 до 1100 мм протягом останніх п'яти років. Встановлено, що основними видами пошкоджень труб водопровідної мережі є: наскрізні свищі сталевих труб – 54,4%; корозія сталевих труб – 25,6%; розчekanка стиків чавунних труб – 9,7%, переломи та тріщини чавунних труб – 6,1%; тріщини на стиках пластикових труб та інші – 4,2%. Отримано аналітичні залежності середнього значення параметра потоку відмов трубопроводу  $\omega_{0cp}$  від діаметра труб  $D$  та підтверджено тенденцію зменшення  $\omega_{0cp}$  при збільшенні  $D$ .

Рекомендовано для підвищення надійності водопровідних мереж проводити заміну 2% мережі на рік та використовувати пластикові труби. Для зменшення  $\omega_{0cp}$ , зокрема на ділянках труб з понаднормовим терміном експлуатації, показана доцільність установлення парціально безпосередньо в трубопровод водоповітряних гасників коливань тиску, в яких відбувається поступове і повне гасіння ударної хвилі.

**водопровідна мережа, труби, аварії, надійність, потік відмов**

**Постановка проблеми.** Масове будівництво систем водопостачання в нашій країні припало на 80–90-ті роки ХХ-го сторіччя. Термін експлуатації більшості з них вийшов і в останнє десятиріччя спостерігається високий рівень аварійності зношених мереж, що приводить до великої частки втрати води [1]. На причини аварій впливають, зокрема, перепади тиску в системах водопостачання, які можуть викликати гідроудари [2], неналежна якість будівельних робіт при прокладанні трубопроводів. Крім того на ліквідацію аварій потрібні додаткові матеріально-технічні та фінансові затрати експлуатаційних організацій.

Отже, дослідження надійності роботи системи водопостачання і розробка рекомендацій для її підвищення є актуальними. Для цього доцільно застосувати метод статистичного аналізу даних експлуатаційної організації по аварійним ситуаціям та обстеженню технічного стану діючих систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В напрямку встановлення причин відмов систем водопостачання, зокрема трубопроводів розподільчої мережі, відомі роботи авторів О.А. Ткачука, В.Г. Новохатнього, О.В. Матяша та інших [1,3,5]. Ними були проведені якісні та кількісні аналізи надійності водопровідних труб і порівняння з показниками як вітчизняних так і закордонних досліджень.

Як показав аналіз літературних джерел, показники надійності водопровідних мереж різні у кожному місті чи регіоні України, що потребує додаткових досліджень у кожному конкретному випадку.

**Постановка завдання.** Метою роботи є визначення основних видів пошкоджень труб розподільчої мережі системи водопостачання міста Кропивницький, аналіз потоку відмов цієї системи та надання рекомендацій для їх зменшення.



**Виклад основного матеріалу.** За даними експлуатаційної організації міста Кропивницький загальна протяжність міської водопровідної мережі 854,414 км. В тому числі: сталеві труби – 348,84 км, чавунні – 367,576 км, залізобетонні – 28,424 км, азбестоцементні – 8,6 км, пластикові – 100,96 км. У водопровідній розподільчій системі використовуються труби діаметром від 25 до 1100 мм.

Сегментарний розподіл видів пошкоджень водопровідної системи м. Кропивницький, що були причиною аварійних ситуацій за останні п'ять років, приведено на рис. 1

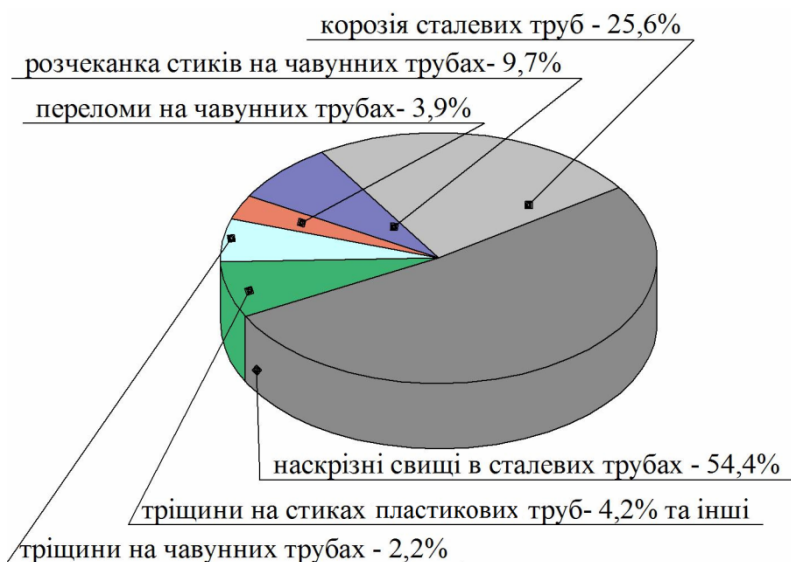


Рисунок 1 – Сегментарний розподіл видів пошкоджень водопровідної системи м. Кропивницький  
Джерело: розробка авторів

В результаті проведеного аналізу було виділено основні види пошкоджень водопровідних мереж, серед яких найбільшу частину складають наскрізні свищі в сталевих трубах – 54,4% та корозія – 25,6%. Вагомі втрати води виникають внаслідок витоків при розчеканці стиків на чавунних трубах, які складають – 9,7% від загальної кількості основних пошкоджень. Решта відсотків припадає на: переломи на чавунних трубах – 3,9%; тріщини на чавунних трубопроводах – 2,2%; тріщини на стиках пластикових труб та інші – 4,2%.

Такий розподіл можна пояснити тим, що основна частина водопровідних розподільчих мереж прокладена зі сталевих та чавунних труб (84%). Це характерно для більшості міст України. Тому в подальшому аналізі надійності розподільчої системи водопостачання бралися до уваги саме сталеві та чавунні труби.

Одним з основних показників надійності водопровідної мережі прийнято параметр потоку відмов  $\omega$  трубопроводу [4]. Для розрахунку середнього значення параметру потоку  $\omega_{0cp}$  використана наступна формула:

$$\omega_{0cp} = \frac{n}{t \cdot \sum L}, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість відмов ділянки водопровідної мережі;

$t$  – термін спостереження;

$\sum L$  – протяжність ділянок водопровідної мережі відповідного діаметра, км.

Інтервальні оцінки для параметра потоку відмов обчислювались за формулами:

Верхня інтервальна оцінка параметра потоку відмов  $\omega_{sp}$  :

$$\omega_{ep} = \frac{\omega_0}{r_2}. \quad (2)$$

Нижня інтервальна оцінка параметра потоку відмов:

$$\omega_{np} = \frac{\omega_0}{r_1}, \quad (3)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – коефіцієнти для визначення інтервальних оцінок при експоненціальному розподілі (таблиці 6 і 7) [4].

Довірча ймовірність прийнята  $\gamma = 0,95$ .

Результати розрахунку інтервальних оцінок для параметра потоку відмов  $\omega_0$  водопровідної мережі міста Кропивницький діаметром від 50 мм до 300 мм виконані в табличній формі (табл.1).

Таблиця 1 – Розрахунок інтервальних оцінок для параметра потоку відмов  $\omega_0$  водопровідної мережі міста Кропивницький

Матеріал труб	Діаметр, мм	Об'єм вибірки, $n$	Коефіцієнти для визначення інтервальних оцінок		Параметр потоку відмов $\omega_0$ , 1/рік·км		
			$r_1$	$r_2$	Середнє значення	Інтервальна оцінка	
						нижня	верхня
Сталеві	50	1186	1,05	0,953	4,21	4,01	4,42
	100	1184	1,05	0,953	8,95	8,24	9,39
	150	352	1,095	0,916	6,94	6,34	7,58
	200	168	1,142	0,881	3,68	3,22	4,18
	250	81	1,21	0,83	1,306	1,08	1,57
	300	132	1,163	0,866	5,52	4,75	6,37
Чавунні	50	65	1,24	0,815	1,18	0,95	1,45
	100	408	1,087	0,922	0,51	0,47	0,55
	150	192	1,132	0,888	0,59	0,52	0,66
	200	129	1,165	0,865	0,66	0,57	0,76
	250	37	1,34	0,76	0,27	0,20	0,36
	300	134	1,161	0,867	0,58	0,5	0,67

Джерело: розробка авторів

Для розрахунку середніх значень потоку відмов  $\omega_{0cp}$  отримано вирази:

- для чавунних труб

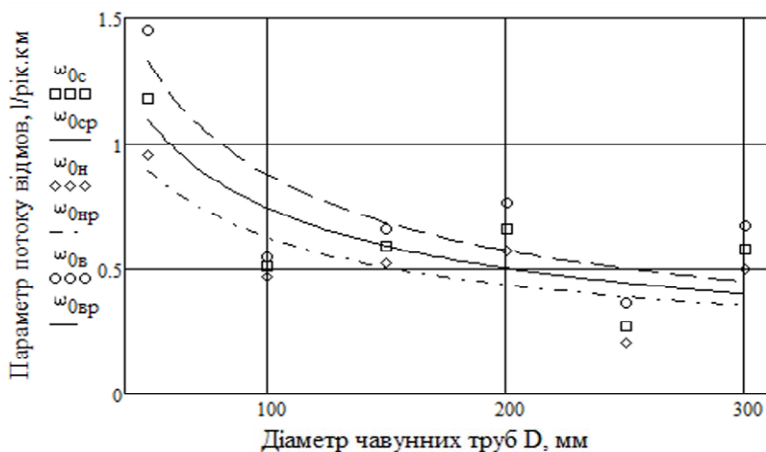
$$\omega_{0cp} = 9,909 \cdot D^{-0,503}, \quad (4)$$

- для сталевих труб

$$\omega_{0cp} = 12,907 \cdot D^{-0,186}. \quad (5)$$

На рисунках 2 і 3 приведено графіки залежності  $\omega_0 = f(D)$  для чавунних і сталевих труб відповідно.

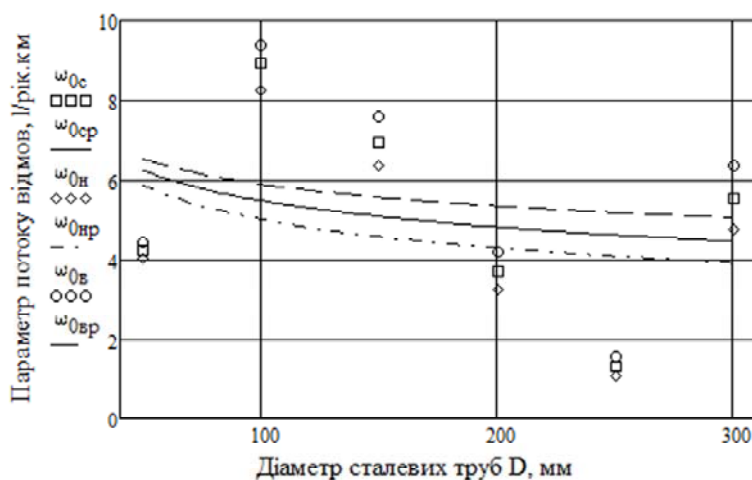
Для розрахунків при обробці статистичних даних та побудові графіків використовувався пакет прикладних програм MathCAD.



$\omega_{0ср}$ ,  $\omega_{0нр}$ ,  $\omega_{0вр}$  – відповідно середнє значення, нижня та верхня інтервальні оцінки параметру потоку відмов, знайдені за аналітичною формулою (4)  $\omega_{0с}$ ,  $\omega_{0н}$ ,  $\omega_{0в}$  – ті ж самі величини для табличних точок.

Рисунок 2 – Графік залежності  $\omega_0 = f(D)$  для чавунних труб

Джерело: розробка авторів



$\omega_{0ср}$ ,  $\omega_{0нр}$ ,  $\omega_{0вр}$  – відповідно середнє значення, нижня та верхня інтервальні оцінки параметру потоку відмов, знайдені за аналітичною формулою (5),  $\omega_{0с}$ ,  $\omega_{0н}$ ,  $\omega_{0в}$  – ті ж самі величини для табличних точок

Рисунок 3 – Графік залежності  $\omega_0 = f(D)$  для сталевих труб

Джерело: розробка авторів

Аналіз отриманих результатів показує тенденцію зменшення параметру потоку відмов при збільшенні діаметру, що добре узгоджується з даними в роботах [3,5,6]. Але за нашими даними середньозважені значення потоку відмов незалежно від діаметра складають:

- для чавунних труб  $\omega_{0ср} = 0,48$  1/рік км
- для сталевих труб  $\omega_{0ср} = 5,21$  1/рік км

а за даними [3,5,6] ці значення коливаються в межах від 0,1 1/рік км до 3,59 1/рік км.

Суттєво більші значення  $\omega_{0ср}$  в нашому випадку, порівняно з аналогічними, наведеними в літературних джерелах для інших міст, можна пояснити значним перевищенням нормативних строків експлуатації сталевих та чавунних труб водопровідної мережі м. Кропивницький.

Розподіл протяжності мереж міста в залежності від терміну експлуатації надано в табл.2.

Таблиця 2 – Розподіл протяжності водопровідних мереж м. Кропивницький в залежності від терміну їх експлуатації

Матеріал труб	Строк експлуатації (років)					
	<5	6-15	16-25	26-35	36-50	>50
Сталь	10,322	20,701	21,826	65,675	147,089	83,228
Чавун	0,092	10,912	7,97	60,721	194,97	92,911

*Джерело: розробка авторів*

Згідно з нормативними документами строк експлуатації сталевих трубопроводів становить – 25 років, чавунних – 30-40 років [6]. З таблиці 2 випливає, що для 85% сталевих та для 50% чавунних труб цей термін перевищено майже в 2-а рази. В результаті старіння і втрати міцності матеріалу труб значно збільшується кількість аварійних ситуацій при робочому навантаженні незалежно від діаметру труб.

Рішенням цієї проблеми в першу чергу є заміна труб на труби з більш сучасних пластикових матеріалів, що підвищить нормативний термін експлуатації труб до 50 років. Іншою частиною рішення в цьому напрямку може бути впровадження практики європейських країн – обов'язкова заміна 2% мережі на рік, тобто оновлення за 50 років всієї систем трубопроводів.

Для зменшення фактору відмов водопровідних мереж міста внаслідок гідравлічних ударів, які можуть виникати при наповненні труб після ліквідації аварій на них, доцільно встановлювати гасники коливань тиску. Але їх наявність не завжди може забезпечити повне гасіння ударної хвилі, а разом з тим і надійність роботи водопровідних мереж. Це пояснюється тим, що більшість гасників встановлюється зовні на трубопроводі. Тому ударна хвиля встигає частково повз нього проскочити через сповільнену швидкість спрацьовування запобіжника в порівнянні з швидкістю гідроудару. Іноді робоча діафрагма самого гасника, яка являє собою жорстку систему, приймає участь в коливальному процесі і не забезпечує гасіння коливань тиску.

Підвищення ефективності запобігання гідроудару можна досягти за рахунок гасників, що встановлюються парціально в трубопроводі при русі через який відбувається поступове і повне гасіння ударної хвилі.

Одним з таких є гасник коливань тиску на основі винаходу Ніколи Тесли [7]. Крім того, сам клапан Тесли [8] є альтернативою звичайному зворотному клапану, який є обов'язковою запобіжною арматурою на насосних станціях при аварійній зупинці насосів. Обидва пристрої набагато менше схильні до зносу, так як їхні конструкції не містять рухомих частин, що підвищує надійність роботи трубопроводів.

В роботах [2,9] розглянуто водоповітряний гасник коливань тиску, який також встановлюється парціально в трубопроводі і запобігає гідроудару. Апробацію дослідного зразка цього гасника проведено в лабораторії гідравліки Центральноукраїнського національного технічного університету і підтверджено його працездатність та ефективність.

### **Висновки.**

1. Виконано аналіз статистичних даних причин аварій та витоків на водопровідних трубах розподільчої мережі м. Кропивницького за даними експлуатаційної організації на протязі останніх п'яти років.

2. В результаті сегментарного аналізу встановлено, що основними видами пошкоджень труб мережі є : наскрізні свищі сталевих труб – 54,4%; корозія сталевих

труб – 25,6%; розчekanка стиків чавунних труб – 9,7%, переломи та тріщини чавунних труб – 6,1%; тріщини на стиках пластикових труб та інші – 4,2%.

3. Проведено розрахунок інтервальних оцінок параметра потоку відмов  $\omega_0$  для сталевих та чавунних труб водорозподільчої мережі м. Кропивницький, оскільки саме з цих труб прокладено 84% мережі та отримано аналітичні вирази для визначення середніх значень  $\omega_{0cp}$  в залежності від їх діаметру.

4. Суттєво більші значення  $\omega_{0cp}$  водорозподільчої мережі м. Кропивницький порівняно з аналогічними, наведеними в літературних джерелах для інших міст, можна пояснити перевищенням  $\sim$  в 2-а рази нормативних строків експлуатації 85% сталевих та 50% чавунних труб водопровідної мережі м. Кропивницький.

5. Для підвищення надійності водопровідних мереж доцільно проводити заміну 2% мережі на рік та використовувати пластикові труби.

6. Для зменшення фактору відмов водопровідних мереж, зокрема на ділянках, де експлуатуються труби з понаднормовим терміном експлуатації, доцільно установлювати парціально безпосередньо в трубопровід водоповітряних гасників коливань тиску, в яких відбувається поступове і повне гасіння ударної хвилі.

7. В цілому аналіз статистики пошкоджень та параметрів відмов водопровідних мереж дає можливість більш обґрунтовано планувати ремонтні роботи та заходи по заміні труб з метою запобігання виникнення аварій.

## Список літератури

1. Ткачук О. А. Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів. Рівне : НУВГП, 2008. 301 с.
2. Ковальчук Н.В., Мещишена Л.Г. Порівняльна характеристика конструктивних параметрів водоповітряних гасників коливань тиску. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2009. Вип. 22. С. 49-52.
3. Матяш О. В. Висока надійність водопровідних мереж – шлях до зменшення втрат води. *Комунальне господарство міст.* 2013. Вип. 110. С.126-130.
4. ГОСТ 11.005-74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров экспоненциального распределения и распределения Пуассона. Москва : Издательство стандартов, 1974. 29 с.
5. Новохатній В.Г. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання : дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.23.24 / Київ. нац. ун-т. буд. і арх-ри. Київ, 2012. 351 с.
6. ДБН В.2.5–74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. [Чинний від 2014–01–01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України, 2013. 281 с. (Національні стандарти України).
7. Пат. US10808874B2 США, F16L 55/04; F16L 55/05; F02M 37/00; F16L 11/26; F15D 1/00. Inline fluid damper device / Samarasinghe R. J., Magina N. A., Wickersham A., Cross A., Han F. (США) – № 15/827,587; заявл. 30.11.17; опубл. 20.10.20. 26 с.
8. Пат. 1329559 США. Valvuar conduit / Tesla N. заявл. 21.02.16; опубл. 3.02.20. 6 с.
9. Ткач А.А., Мещишена Л.Г., Кулеба Н.В. Результаты исследований гидроударов в длинных и коротких гидромагистралях. *Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2001. Вип. 8. С.134-138.

## References

1. Tkachuk, O.A. (2008). Udoskonalennia system podachi ta rozpodilennia vody naselenykh punktiv [Improvement of water supply and distribution systems of settlements]. Rivne: NUWN [in Ukrainian].
2. Kovalchuk, N.V. & Meshchysheva, L.H. (2011). Porivnialna kharakterystyka konstruktyvnykh parametriv vodopovitrianykh hasnykiv kolyvan tysku [Comparative characteristics of design parameters of water-air dampers of pressure fluctuations]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia,*

- avtomatyzatsiia - Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation, Vol. 22, 49-52 [in Ukrainian].*
3. Matiash, O. V. (2013). Vysoka nadiinist vodoprovodnykh merezh – shliakh do zmeshennia vtrat vody [High reliability of water supply networks is a way to reduce water losses]. *Komunalne hospodarstvo mist - Municipal utilities. Vol. 110, 126-130 [in Ukrainian].*
  4. Applied statistics. Rules for determining estimates and confidence limits for parameters of exponential distribution and Poisson distribution. (1974). *HOST 11.005-74*. Moscow : Publishing house of standards. [in Russian].
  5. Novokhatnii V.H. (2012). Nadiinist funktsionuvannia podavalno-rozpodilnoho kompleksu system vodopostachannia [eliability of functioning of supply and distribution complex of water supply systems]. *Doctor's thesis*. Kiev [in Ukrainian].
  6. Vodopostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia. [Water supply. External networks and structures. Basic design provisions.]. (2013). *DBN V.2.56-74:2013 from 01 January 2014*. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine [in Ukrainian].
  7. Samarasinghe R. J., Magina N. A., Wickersham A., Cross A., Han F., (2020). U.S. Patent No. US10808874B2 [in English].
  8. Tesla N., (1920). U.S. Patent No. 1.329.559 [in English].
  9. Tkach, A.A., Meshchysheva, L.H. & Kuleba, N.V. (2001). Rezultaty issledovaniy gidroudarov v dlennykh i korotkikh gidromagistralyakh [Results of studies of water hammer in long and short hydraulic lines]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia - Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation, Vol. 8, 134-138 [in Ukrainian].*

**Vasyl Klymenko**, Prof., DSc., **Nataliia Kovalchuk**, lecturer, **Vasyl Hutsul**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Teliuta**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **The Problem of Reliability of Water Supply Networks on the Example of the City of Kropyvnytskyi**

The article presents the analysis of statistical data of the causes of breakages and leaks in water pipes of the distribution network of Kropyvnytskyi. Breakage statistics for pipelines with a diameter of 25 to 1100 mm during the last five years were calculated.

As a result of segmental analysis, it was found that the main types of damage to the pipes of water supply system are through fistulas of steel pipes – 54.4% and corrosion – 25.6%; loss of integrity of cast iron pipes on joints – 9.7%, fractures and cracks of cast iron pipes – 6.1%; fractures in joints of polyethylene pipes and other damages – 4.2%.

To characterize the reliability of the municipal water supply networks, the pipeline failure flow parameter  $\omega$  was used. It was defined as the ratio of the number of failures of the water supply network section to the observation period and the length of pipe network sections of the corresponding diameter.

The calculation of interval estimates for the failure rate parameter  $\omega_0$  for steel and cast iron pipes of the water distribution network of Kropyvnytskyi was carried out. According to the operational organization 84% of the network was laid using these pipes and analytical expressions were obtained to determine average values of  $\omega_{0cp}$  depending on their diameter.

Significantly higher values of  $\omega_{0cp}$  were noted in comparison with similar ones given in the literature for other cities, which can be explained by a significant excess of the standard service life of 85% of steel and 50% of cast iron pipes in the water supply network of Kropyvnytskyi.

To increase the reliability of water supply networks, it is recommended to implement the experience of European countries and replace 2% of the network per year and use polyethylene pipes.

To reduce the failure factor of water supply networks, particularly in those areas where overtime pipes are used, the expediency of partial installation of water-air dampers for pressure fluctuations directly in the pipeline, in which there is a gradual and complete damping of the shock wave. Approbation of a prototype of a hydraulic shock absorber of this design was carried out in the hydraulics laboratory at Central Ukrainian National Technical University and its efficiency and high efficiency at full shock wave damping was confirmed.

**breakages, steel pipelines, distribution network, reliability, failure**

*Одержано (Received) 07.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 621.863.2

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).127-133](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).127-133)

Г. Д. Портнов, доц., канд. техн. наук, А.А. Тихий, доц., канд. техн. наук,  
В.В. Дарiєнко, доц., канд. техн. наук, В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук  
Центральнорайнський нацiональний технiчний унiверситет, м. Кропивницький,  
Україна  
e-mail: budkom999@gmail.com

## Вплив форми кованого однорогого гака на його ефективнiсть

Виконано аналіз геометричних параметрів вантажного кованого однорогого гака. Обґрунтовано конструктивні параметри виробу шляхом дослідження напруженого стану твердотiльної моделi гака. Запропонована лiнійка вантажних гакiв зi змiненою формою перерiзiв, яка теоретично дозволяє зменшити масу на 10% при збереженнi вантажопiдйомностi. Запропонована заміна прямолiнійних сторiн трапецiї перерiзiв на криволiнійнi.

**вантажних гак, iнженерний аналіз, модель, показник ефективностi використання матерiалу**

**Постановка проблеми.** Вантажнi гаки застосовуються при виконаннi вантажно - розвантажувальних робiт як унiверсальнi вантажозахоплювальнi пристрої.

В бiльшостi вантажопiдймальних машинах i механiзмах знаходять застосування кованi (штампованi) гаки. Кованi i штампованi гаки подiляють на однорогi i дворогi. Їх виготовляють куванням або штампуванням. Застосування литих сталевих гакiв обмежено, однак з розвитком засобiв дефектоскопiї їх застосування стає перспективним.

Гаки за ГОСТ 6627-76 [1, чинний] при стандартних навантаженнях мають значну масову частину мало навантажених дiлянок. Виходячи з технологiчних умов виготовлення показники ефективностi використання матерiалу гака можуть бути суттєво полiпшенi за рахунок змiни форм перерiзiв. Показники ефективностi використання матерiалу гака можуть бути полiпшенi при збереженнi розмiрiв частин поверхонь гака, якi взаємодiють з вантажними елементами.

**Аналіз останнiх досліджень i публiкацiй.** Обґрунтування необхідностi iнженерного аналізу конструкцiй гакiв вантажопiдймальних машин, що випускаються в Україні, виконали О.В. Григоров, Е.І. Сердюков, Л.М. Степочкин [7, 8].

Випуск i застосування вантажопiдймальних гакiв в Україні регламентується нормативними документами, розробленими бiльше 40 рокiв тому [1, 2, 3].

В той же час при експлуатацiї закордонної вантажопiдймальної технiки використовуються крановi гаки, виконанi за стандартами DIN [4, 5, 6].

Порiвняння стандартiв показує, що при рiвнiй вантажопiдйомностi при однакових класах i групах класифiкацiї розмiрно-масовi характеристики виробiв вiдрiзняються в рази, причому не у всiх випадках на користь гакiв, виконаних по ГОСТ [8].

У дослідженнях [8] обґрунтована перспективнiсть удосконалення розрахункiв гакiв з урахуванням використання пластичних властивостей матерiалу i опору втоми. Вiдзначається, що створення i впровадження нових методiв розрахунку гакiв може забезпечити значне зменшення їх маси. Важливими резервами економiї є оптимiзацiя розмiрiв стандартизованих гакiв i використання для їх виготовлення легованих сталей.

**Постановка завдання.** Приведені факти вказують на актуальність проведення аналізу вантажопідіймальних гаків, які випускаються в Україні, зокрема однорогих гаків ГОСТ 6627-74 [2] з метою визначення можливості вдосконалення конструкції.

**Виклад основного матеріалу.** Основним фактором ефективності гака є його форма, яка обумовлює зв'язок маси з напружено – деформованим станом (НДС) конструкції. У стандартних гаках вертикальні і горизонтальні розрахункові поперечні перерізи зіву гака однакові (рис. 1а).

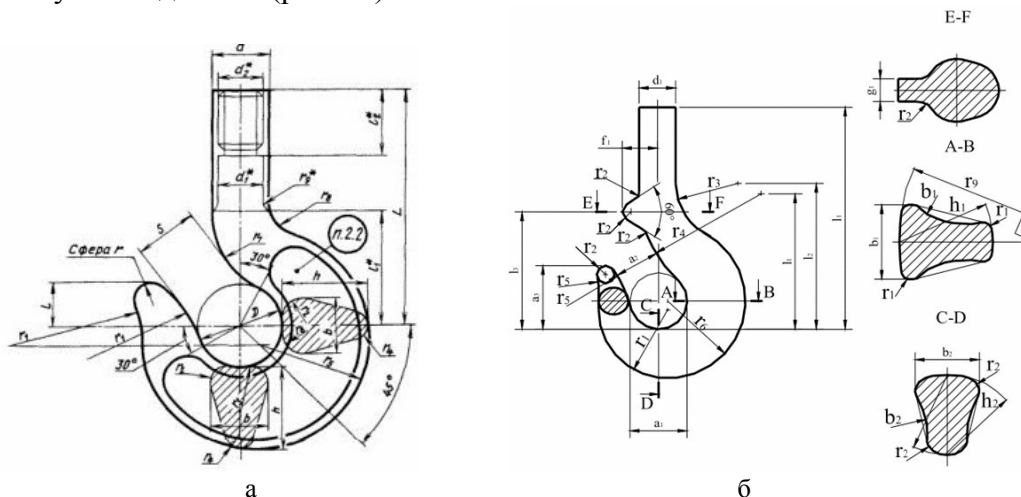


Рисунок 1 – Форми перерізів гаків: а – гак ГОСТ 6627-74 (заготовка); б – гак DIN 15401 форми RSN  
Джерело: [2,5]

Згідно міжнародних стандартів у гаках по DIN 15401 (рис. 1б) горизонтальний поперечний переріз, де діє максимальний згинальний момент, істотно більше вертикального, а переріз зіву плавно збільшується від вертикального до горизонтального. Експлуатаційні випробування свідчать, що форма гака повинна забезпечити його мінімальну масу при достатній міцності, по можливості однаковій по всіх перерізах при виконанні умов експлуатації та технології виготовлення. Вихідним розміром при конструюванні однорогого гака є діаметр зіву  $D$  (рис. 1а), який приймають з урахуванням умов розміщення в ньому двох гілок прядив'яного канату або зварного ланцюга. Передбачається, що досвід експлуатації стандартизованих гаків визначив ергономічність поверхонь, які контактують зі стропильним обладнанням.

Виявлено, що контури верхньої і нижньої частин перерізів гаків змінюються. Геометричні співвідношення розмірів перерізу гаків, а також нарізної частини можна вважати визначеними теоретично і експериментально як оптимальні.

Суттєвими є зміни параметрів бокових поверхонь четвертого квадранта криволінійної частини гака.

Сучасні CAD комплекси (SOLIDWORKS, CREO) дозволяють обґрунтувати параметри гаку шляхом побудови твердотільної моделі за ГОСТ6627-75 [1,чинний], визначення її НДС (статичний аналіз), візуалізації розподілення напружень [9, 11]. Вивчення картини розподілення напружень дало можливість запропонувати форми перерізів з подальшим розрахунком НДС знов створеної моделі. Представлені результати геометричних параметрів вантажного кованого однорогого гака ГОСТ 6627-74, № 26. НДС моделі досліджувався для двох варіантів навантаження (рис. 2):

- вага вантажу  $G$  прикладена в центрі зіву гака (рис. 2а);
- вага вантажу  $G_{sp}$  розподілена між двома похилими стропами під кутом  $\alpha = 45^\circ$  (рис. 2б).



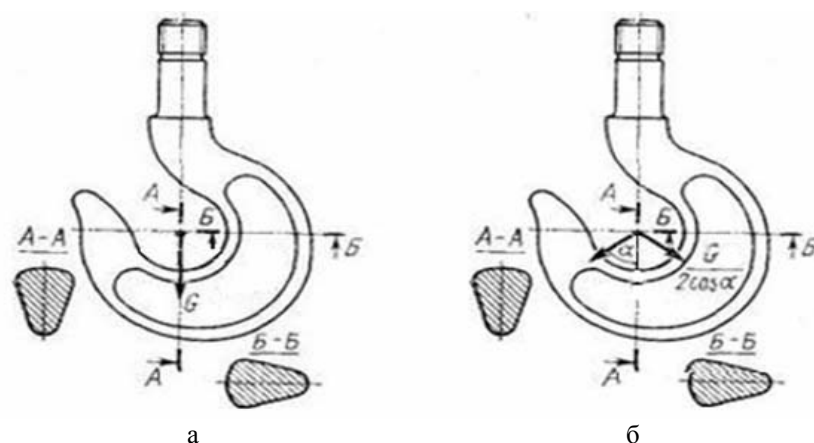


Рисунок 2 – Схеми навантаження гака: а – одна стропа; б – дві стропи

Джерело: [2]

Подано кріплення моделі: фіксований торець хвостовика. При дистанційно прикладеному навантаженні на відстані 1000 мм від вантажної грані гака (рис. 3).

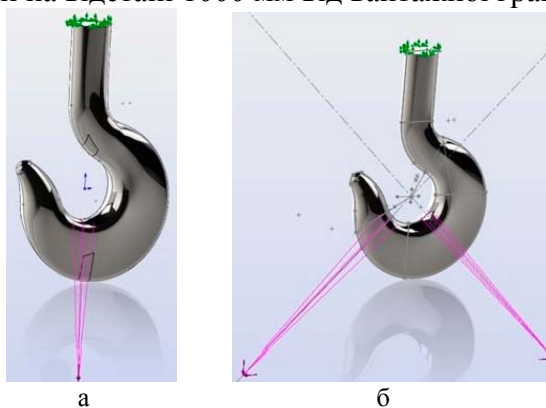


Рисунок 3 – Дистанційне навантаження моделі: а – схема 1; б – схема 2

Джерело: розроблено автором

Значення навантаження  $G$  обиралося як таке, що призводить до максимальних напружень в моделі стандартного гака при  $\sigma = 220$  МПа; (ГОСТ 2105 [1, чинний] вимагає (п. 1.4), щоб гаки після кування і штампування були нормалізовані. Межа текучості після нормалізації - 220-250 МПа). З використанням САД комплексу SOLIDWORKS, створена візуалізація (рис. 4) найбільш навантажених елементів гака та виділені елементи, навантажені менше 25% від  $\sigma_m = 220$  МПа.

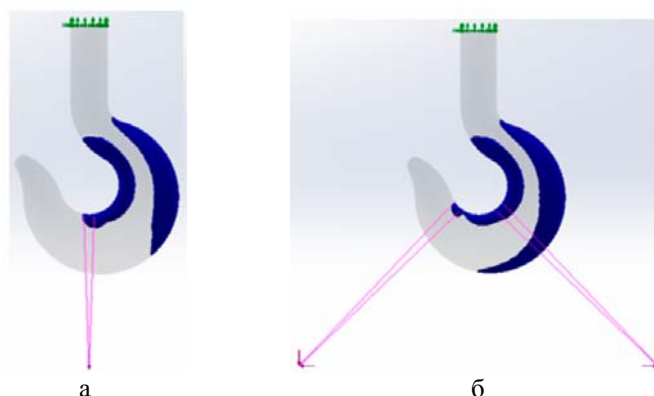


Рисунок 4 – Картина візуалізації напружень моделі: а – схема 1 (рис.2); б – схема 2

Джерело: розроблено автором

Аналіз картини розподілення напружень в тілі гака дає підстави для вибору шляху оптимізації конструкції в напрямку зміни контурів екваторіального і, переважно, меридіонального перерізів четвертого квадранта контуру гака. Запропонована зміна контуру здійснюється заміною прямолінійних сторін трапеції перерізів (рис. 5а) на криволінійні (рис. 5б).

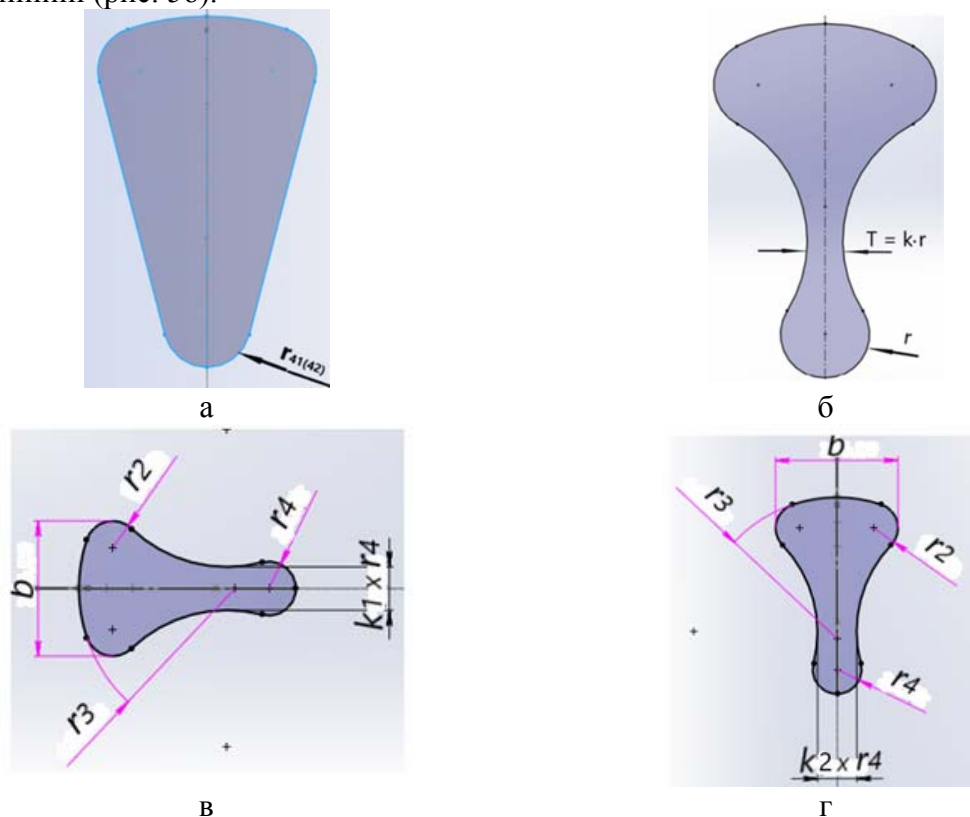


Рисунок 5 – Форми перерізів: а – стандартні прямолінійні сторони; б – криволінійні; в – екваторіальний переріз; г – меридіональний переріз

Джерело: розроблено автором

Керуючим параметром зміни контуру обрана товщина стінки  $T$ , пов'язана з класом складності поковки. Позначення товщини стінок екваторіального перерізу Б-Б (рис. 2а)  $T_1 = k_1 \cdot r_4$  (рис. 5 в) та меридіонального перерізу А-А (рис. 5 г)  $T_2 = k_2 \cdot r_4$ , де  $k_1, k_2$  - безрозмірні коефіцієнти.

Ефективність конструкції визначалася відношенням  $G/M$ , де  $G$  - мінімальне значення за одним з варіантів навантаження;  $M$  - маса моделі. Для гака №26 ГОСТ 6627-74 отримане значення  $G/M = 148 \text{ кг/кг}$ . Результати чисельних експериментів з навантаженням гаків з різними комбінаціями перерізів представлені графіками рис. 6.

При аналізі гака ГОСТ 6627-74 [2,чинний], що містить 26 конфігурацій виникає питання подібності. Постає потреба параметризації моделі з вирішенням завдання щодо застосування на основі однієї дослідженої конфігурації на всю лінійку виробів.

Відповідно до теорії подібності твердих тіл [11], стан працюючих в межах пружності, навантаження  $G$  в подібних елементах знаходяться в певному зв'язку з характерним параметром  $A$ , який визначає співвідношення розмірів:

$$G \sim A^2. \quad (1)$$

Маса подібних елементів:

$$M \sim A^3. \quad (2)$$

Геометричні співвідношення розмірів перерізу гаків  $h \approx D$ ;  $b \approx 3b_1$ ;  $D \approx h$  [7], тому можна прийняти:

$$A \sim D. \quad (3)$$

Тоді співвідношення показника ефективності гака  $G/M$  до його характерного розміру  $D$ :

$$\frac{G}{M} \sim \frac{1}{D}. \quad (4)$$

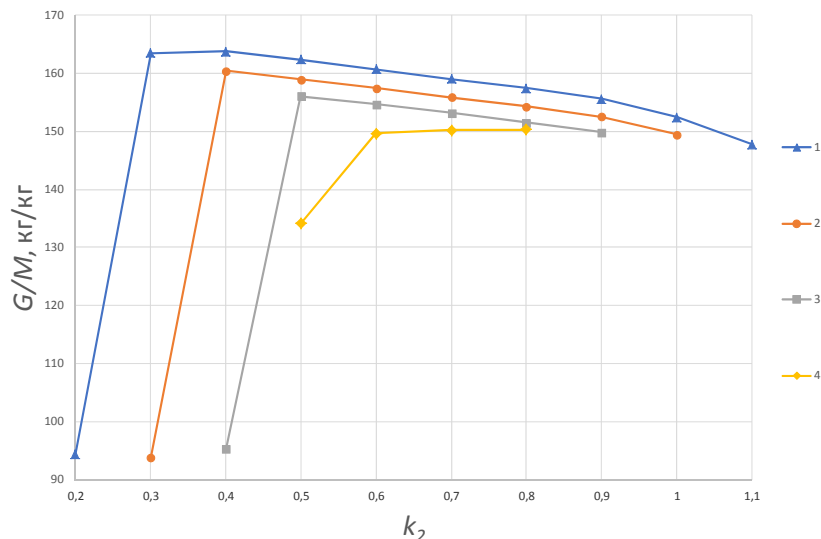


Рисунок 6 – Графіки залежності ефективності витрати матеріалу гака  $G/M$  від параметрів товщини стінки перерізів  $k$ : 1-  $k_1$  стандартного гаку; 2-  $k_1=1$ ; 3-  $k_1=0,9$ ; 4-  $k_1=0,8$ .

Джерело: розроблено автором

Графіки (рис. 7) зв'язку показника ефективності гака  $G/M$  моделей гаків ГОСТ з діаметром зіву  $D$  побудовано за даними навантажень конфігурацій параметризованої моделі гака ГОСТ 6627-74 [2, чинний].

Ступенева залежність лінії тренду  $y = 31900x^{-0,94}$  відповідає співвідношенню (4).

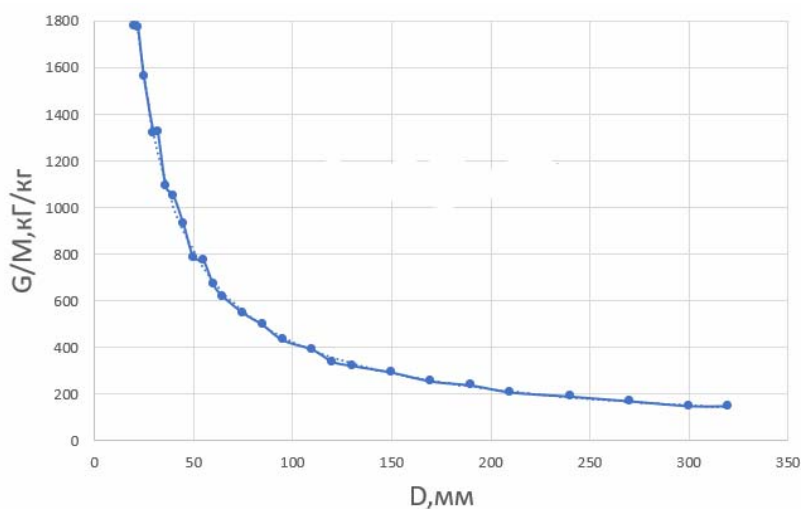


Рисунок 7 – Зв'язок показника ефективності гака  $G/M$  моделей гаків ГОСТ з діаметром зіву  $D$   
Джерело: розроблено автором

Розташування показників відповідає прогнозу (практично співпадає з лінією тренду). Викиди значень точок, які відповідають гакам № 1, 2, 4, 5, 9, 10 [1] пов'язані з призначенням дискретних значень нарізі хвостовика.

Ступенева залежність лінії тренду, вказана в полі графіка відповідає співвідношенню (4).

Рекомендації, запропоновані на основі вивчення однієї конфігурації моделі, можуть бути поширені на інші конфігурації з врахуванням технології виготовлення виробу.

#### **Висновки:**

1. Отримані картини розподілення напружень в тілі гака дають можливість вибору шляху оптимізації конструкції в напрямку зміни контурів екваторіального і меридіонального перерізів четвертого квадранта контуру гака. Запропонована зміна контуру здійснюється заміною прямолінійних сторін трапеції перерізів на криволінійні.

2. Наведено НДС з візуалізацією та розподіленням напружень, обґрунтовані параметри гаку шляхом побудови твердотільної моделі в САД комплексі Solidworks. Вивчення картини розподілення напружень дало можливість запропонувати форми перерізів з подальшим розрахунком НДС створеної моделі.

3. Ефективність витрати матеріалу внаслідок проведеної оптимізації підвищується на 10,8% без зменшення вантажопідйомності. При цьому зміни в максимальному переміщенні в запропонованій моделі незначні (2,55 мм проти 2,33 мм в моделі гака №26 ГОСТ2105-75).

#### **Список літератури**

1. ГОСТ 2105-75. Крюки кованые и штампованные. Технические условия [Чинний від 1976-01-01]. Москва, 1975. 7 с. (Информационные данные).
2. ГОСТ 6627-74. Крюки однорогие. Заготовки. Типы. Конструкции и размеры. [Чинний від 1976-01-01]. Москва, 1974. 7 с. (Информационные данные).
3. ГОСТ 6628-73. Крюки двурогие. Заготовки. Типы. Конструкции и размеры. [Чинний від 1975-01-01]. Москва, 1973. 8 с. (Информационные данные).
4. DIN 15400/06.90 Lasthaken für Hebezeuge; Mechanische Eigenschaften, Werkstoffe, Tragfähigkeiten und vorhandene Spannungen (DIN 15400/06.90 Грузовые крюки для подъемных устройств. Механические свойства, материалы, грузоподъемности и действительные напряжения). [Чинний від 1990-06-01]. 1990. 9 с.
5. DIN 15401/11.82 Teil 1 Lasthaken für Hebezeuge; Einfachhaken; Rohteile (DIN 15401/11.82 Часть 1 Грузовые крюки для подъемных устройств. Однорогие крюки. Заготовки).
6. DIN 15401/09.83 Teil 2 Lasthaken für Hebezeuge; Einfachhaken; Fertigteile mit Gewindschaft (DIN 15401/09.83 Часть 2 Грузовые крюки для подъемных устройств. Однорогие крюки. Обработанные детали с резьбовым хвостовиком).
7. A. Devaraj. Design of a Crane Hook of Different Materials and Stress Analysis Using ANSYS workbench. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), 2015. Vol. 03, № 7. P. 89–93. URL: [https://www.academia.edu/24639307/design\\_and\\_analysis\\_of\\_crane\\_hook\\_with\\_different\\_material](https://www.academia.edu/24639307/design_and_analysis_of_crane_hook_with_different_material) (дата звернення: 10.03.2021).
8. Григоров О.В., Сердюков Э.И., Степочкин Л.М. О возможности применения в Украине кованых (штампованных) крюков, изготавливаемых по европейским стандартам. Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. 2007. Вып. 38. С. 1–7.
9. M. M. Zade. Finite Element Analysis and Fatigue Analysis of Crane Hook With Different Materials. *Irjet*. 2017. Vol. 04, № 1, P. 1429–1436. URL: <https://www.irjet.net/archives/V4/i1/IRJET-V4I1259.pdf>.
10. Delcam. Delcam PowerShape : веб-сайт URL: <http://www.delcam.nl/products/powershape/powershape.htm> (дата звернення: 10.03.2021).
11. Delcam. Delcam PowerMill : веб-сайт URL: <http://www.delcam.nl/products/powermill/powermill.htm> (дата звернення: 12.03.2021).

#### **Referencis**

1. Kryuki kovanyye i shtampovannye. Tekhnicheskiye usloviya [*Forged and stamped hooks. Specifications*], (1975). *GOST 2105-75 from 01 January 1976*. Moskva [in Russian].

2. Kryuki odnorigiye. Zagotovki. Tipy. Konstruktsii i razmery [*One-horned hooks. Blanks. Types. Designs and dimensions*], (1974). GOST 6627-74 from 01 January 1976. Moskva [in Russian].
3. Kryuki dvurogiye. Zagotovki. Tipy. Konstruktsii i razmery [*The hooks are two-horned. Blanks Types. Designs and dimensions*], (1973). GOST 6627-73 from 01 January 1975. Moskva [in Russian].
4. Lasthaken für Hebezeuge; Mechanische Eigenschaften, Werkstoffe, Tragfähigkeiten und vorhandene Spannungen [*Load hooks for hoists; Mechanical properties, materials, load capacities and existing stresses*], (1990). DIN 15400/06.90 from 01 June 1990. Berlin [in German].
5. Teil 1 Lasthaken für Hebezeuge; Einfachhaken; Rohteile [*Part 1 load hook for hoists; Single hook; Raw parts*], (1982). DIN 15401/11.82 from 01 November 1982. Berlin [in German].
6. Teil 2 Lasthaken für Hebezeuge; Einfachhaken; Fertigteile mit Gewindenschaft [*Part 2 load hook for hoists; Single hook; Finished parts with threaded shank*], (1983). DIN 15401/09.83 from 01 September 1983. Berlin [in German].
7. A. Devaraj. (2015). Design of a Crane Hook of Different Materials and Stress Analysis Using ANSYS workbench. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, Vol. 03, № 7. P. 89–93. Retrieved from [https://www.academia.edu/24639307/design\\_and\\_analysis\\_of\\_crane\\_hook\\_with\\_different\\_material](https://www.academia.edu/24639307/design_and_analysis_of_crane_hook_with_different_material) [in English].
8. Grigorov, O.V., Serdyukov, E.I. & Steepochkin, L.M. (2007). O vozmozhnosti primeneniya v Ukraine kovanykh (shtampovanykh) kryukov, izgotavlivayemykh po yevropeyskim standartam [*On the possibility of using forged (stamped) hooks made according to European standards in Ukraine*]. Vestnik KHNADU: Sbornik nauchnykh trudov, Vol. 38, 1–7 [in Russian].
9. M. M. Zade. Finite Element Analysis and Fatigue Analysis of Crane Hook With Different Materials. *Irjet*. 2017. Vol. 04, № 1, P. 1429–1436. Retrieved from <https://www.irjet.net/archives/V4/i1/IRJET-V4I1259.pdf> [in English].
10. Delcam. Delcam PowerShape. Retrieved from <http://www.delcam.ni/products/powershape-/powershape.htm> [in English].
11. Delcam. Delcam PowerMill. Retrieved from <http://www.delcam.ni/products/powermill/powermill.htm> [in English].

**Gennadii Portnov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Tykhyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Darienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Influence of the Shape of a Forged Unicorn Hook on its Efficiency**

The article analyzes the cargo forged unicorn hook. The design parameters of the product are substantiated by building a solid model of the hook. The line of cargo hooks with the changed form of sections which theoretically allows to reduce weight by 10% at preservation of loading capacity is offered. Comparison of standards shows that at equal loading capacity at identical classes and groups of classification the size and mass characteristics of products differ in times, and not in all cases in favor of standard hooks.

Operational tests show that the shape of the hook must ensure its minimum weight with sufficient strength, if possible the same in all sections when the operating conditions and manufacturing technology. It was found that the contours of the upper and lower parts of the cross sections of the hooks are not subject to change. The geometric ratios of the cross-sectional dimensions of the hooks, as well as the threaded part can be considered determined theoretically and experimentally as optimal. Changing the contour is carried out by replacing the rectilinear sides of the trapezoid sections with curved ones. The obtained pictures of stress distribution in the hook body make it possible to choose the path of design optimization in the direction of changing the contours of the equatorial and meridional sections of the fourth quadrant of the hook contour. The proposed change of the contour is carried out by replacing the rectilinear sides of the trapezoidal sections with curved ones. The stress-strain state with visualization and stress distribution is presented, the parameters of the hook are substantiated by building a solid model in the CAD complex Solidworks.

The study of the stress distribution pattern made it possible to propose cross-sectional shapes with the subsequent calculation of the stress-strain state of the created model. Material consumption efficiency due to the optimization increases by 10.8% without reducing the load capacity. The changes in the maximum displacement in the proposed model are insignificant (2.55 mm vs. 2.33 mm in the model GOST 2105-75). Recommendations proposed based on the study of one model configuration can be extended to others, taking into account the technology of manufacturing the product.

**load hook, engineering analysis, solid model, material efficiency indicator**

*Одержано (Received) 06.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 12.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

## АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.333:631.172

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).134-141](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).134-141)**А.С. Лімонт**, доц., канд. техн. наук*Житомирський агротехнічний коледж, м. Житомир, Україна**e-mail: andrespartak@ukr.net***В.О. Ломакін**, канд. техн. наук*Житомирський агротехнічний коледж, м. Житомир, Україна***З.А. Лімонт**, студ.*Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна*

## Пропускна спроможність і вантажопідйомність кузовних машин для внесення твердих органічних добрив

Мета дослідження полягала у визначенні і дослідженні пропускної спроможності кузовних машин для внесення твердих органічних добрив залежно від вантажопідйомності цих машин. Методика дослідження базувалася на використанні основних засад кореляційно-регресійного аналізу.

Залежно від вантажопідйомності машин зміна їх пропускної спроможності описується рівнянням сповільнено зростаючої степеневі функції з визначеними коефіцієнтом кореляції і кореляційним відношенням пропускної спроможності машин на їх вантажопідйомність.

**кузовні машини для внесення твердих органічних добрив, пропускна спроможність, вантажопідйомність, кореляційний зв'язок, рівняння регресії**

**Постановка проблеми.** Узагальнення літературних джерел щодо використання твердих органічних добрив (ТОД) тваринного походження для удобрення ґрунту показало [1], що за суцільною внесення їх дози мають бути не нижче 15 т/га під зернові культури і 25 т/га – під просапні. Зокрема при вирощуванні льону-довгунця дози мають бути не більше 15 т/га, а при виробництві картоплі – сягають до 80 т/га [2]. Кузовні машини для внесення ТОД за технічною характеристикою мають забезпечувати стосовно їх окремих марок такі дози внесення як, наприклад, 10–20–30 т/га, 15–30–45, 20–30–40, 20–40–60 т/га та ін. Визначених доз внесення ТОД досягають шляхом відповідних регулювань машин та вибором швидкості руху машинно-тракторних агрегатів (МТА) у складі із кузовними машинами. Проте в проблемі використання кузовних машин для внесення ТОД залишилася поки що ще нез'ясованою низка питань, про деякі з них і буде йти мова у цій статті.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Публікації з проектування і розрахунку кузовних машин для внесення ТОД мають більш ніж піввікову історію. Такі питання висвітлені у другому томі довідника конструктора сільськогосподарських машин за редакцією А.В. Красніченка [3] та в другому томі такого ж довідника за редакцією М.І. Клецкіна [4]. Понад чверть століття тому були опубліковані праці І.В. Павловського (1965), Я.Г. Озола (1965) і В.І. Якубаускаса (1973), в яких дослідники розглядали основи проектування кузовних машин для внесення ТОД у ґрунт, вибір оптимальних параметрів таких машин і технологічні основи механізованого внесення добрив.

Дещо пізніше були опубліковані праці Н.М. Марченка, Г.И. Лічмана і А.Е. Шебалкіна (1990), М.К. Лінника і його співавторів (1992) та П.М. Заїки (2002), в яких продовжено розгляд питань, на які звертали увагу І.В. Павловський і В.І. Якубаускас.

Колектив авторів під керівництвом Д.Г. Войтюка (2005), Д.Г. Войтюк та С.С. Ягун і М.Я. Довжик (2008) опублікували відповідно підручник і навчальний посібник із сільськогосподарських машин, де висвітлені окремі питання з визначення швидкості руху кузовних машин для внесення твердих добрив та розрахунку доз внесення добрив.

Дослідженнями С.М. Герука і С.М. Хоменка [5, 6, 7, 8] та їх співавторів з'ясовані частота обертання розкидального барабана, швидкість руху живильного транспортера та кут встановлення робочих органів до осі барабана і методика розрахунку його встановлення.

Енергетичну оцінку транспортних засобів на перевезенні ТОД за двофазної технології їх внесення та кузовних машин і роторного розкидача на внесенні добрив здійснює О.А. Романащенко самостійно [9], у співавторстві з А.С. Зайцевим і О.І. Анікєєвим [10] та В.І. Мельником [11, 12]. Відомі також публікації В.І. Мельника і О.А. Романащенко в працях Білоруського державного аграрного технічного університету (2014).

І.П. Вітрух і С.Г. Білик [13] опрацювали засади системного проектування внесення органічних добрив, що дозволяють оптимізувати робочу ширину захвату удобрювального агрегату, його швидкість руху та місткість кузова машини для внесення органічних добрив. При оптимізації параметрів машин для внесення добрив враховували умови експлуатації, екологічність, функціональну технологічність та вартість і корисність механізованого внесення добрив.

У свій час Я.Г. Озол [14] пропонував формули для визначення оптимальних значень ширини захвату, вантажопідйомності та швидкості розкидачів ТОД.

С.І. Павленко [15] досліджував використання розкидача органічних добрив ПРТ-10, що був обладнаний двобарабаним навісним пристроєм.

В публікаціях переважної більшості дослідників крім іншого наведені розрахункові залежності щодо визначення продуктивності кузовних машин для внесення ТОД, яку оцінюють за масою добрив (кг), що розподіляє кузовна машина по поверхні поля за одиницю часу (с). Для задовільної роботи розкидальних барабанів продуктивність живильного (подавального) транспортера має дорівнювати або бути дещо меншою продуктивності розкидальних барабанів. Масу добрив, що розподіляє кузовна машина по поверхні поля за одиницю часу  $q$  (кг/с) визначають за формулою:

$$q = 1000 h_k b_k v_{тр} \rho_{од}, \quad (1)$$

де  $h_k$  – висота шару добрив, що подає живильний транспортер до розкидальних барабанів, м;

$b_k$  – внутрішня ширина кузова машини (ширина шару добрив, що подає живильний транспортер до розкидальних барабанів або що те ж довжина горизонтальних розкидальних барабанів), м;

$v_{тр}$  – швидкість живильного транспортера, м/с;

$\rho_{од}$  – щільність (об'ємна маса) добрив, т/м<sup>3</sup>.

При заданій масі (т) добрив, що слід внести на 1 га, (дозі внесених добрив в т/га) швидкість живильного транспортера  $v_{тр}$  (м/с) має бути така, яку можна визначити за формулою:

$$v_{тр} = u_{вд} B_p v_p / (36000 h_k b_k \rho_{од}), \quad (2)$$

де  $u_{вд}$  – доза внесення ТОД, т/га;

$B_p$  – робоча ширина розкидання ТОД, м;

$v_p$  – робоча швидкість руху МТА у складі з кузовною машиною для внесення ТОД, км/год.

Про дозу внесення ТОД сказано вище, а про робочу ширину їх розкидання (внесення) висловимо таке. Робоча ширина внесення ТОД кузовними машинами дещо перевищує їхню габаритну ширину і коливається за наявною інформацією від 2,7–3,2 м (розкидачі фірми «Hesston») до 10–12 м (розкидач МТО-12 ВАТ «Ковельсьільмаш»). З формули (2) видно, що крім іншого, дозу внесення добрив можна регулювати і зміною швидкості руху агрегату.

При визначенні швидкості кузовних машин для внесення ТОД першопочатково розраховують максимальну швидкість  $v_{p,mc}$  (км/год), що обмежена пропускною спроможністю робочих органів розкидача [1]:

$$v_{p,mc} \leq 36 q_c / (B_p u_{вд}), \quad (3)$$

де  $q_c$  – пропускна спроможність робочих органів кузовної машини для внесення ТОД, кг/с.

Вивчення і аналіз низки літературних джерел засвідчили, що пропускна спроможність з'ясована для понад 45 найменувань і марок машин. Що стосується кузовних машин для внесення ТОД, то інформації про їхню пропускну спроможність в літературних джерелах поки що не виявлено.

**Постановка завдання.** Таким чином, мета дослідження полягала у визначенні і з'ясуванні пропускної спроможності кузовних машин для внесення ТОД залежно від вантажопідйомності цих засобів механізації. *Завдання дослідження:* 1) зібрати інформацію про продуктивність аналізованих машин за годину основного часу в тоннах внесених ТОД та розрахувати пропускну спроможність машин; 2) скласти двомірний варіаційний ряд «пропускна спроможність машин – вантажопідйомність машин», в якому пропускну спроможність прийняти за результативну ознаку, а вантажопідйомність – за факторіальну; 3) опрацювати кореляційну таблицю для пошуку і з'ясування зв'язку між пропускною спроможністю машин і їх вантажопідйомністю; 4) визначити основні статистичні показники емпіричних розподілів пропускної спроможності машин і їх вантажопідйомності; 5) знайти чисельні значення коефіцієнта кореляції між пропускною спроможністю машин і їх вантажопідйомністю та кореляційне відношення результативної ознаки на факторіальну; 6) дослідити кількісні зв'язки між результативною і факторіальною ознаками та відшукати модельні рівняння прямолінійної і криволінійної регресії пропускної спроможності машин на їх вантажопідйомність.

**Об'єкт та методика дослідження.** В якості об'єкта дослідження визначені кузовні машини для внесення ТОД виробництва підприємствами на теренах колишнього Радянського Союзу. Це кузовні машини для внесення ТОД виробництва ВАТ «Білоцерківсьільмаш», «Бобруйксельмаш», «Ковельсьільмаш», «Лідаагропромаш», «Могилевсьільмаш» та іншими підприємствами. Для визначення пропускної спроможності  $q_c$  (кг/с) машин використані значення продуктивності машин за годину основного часу в тоннах внесених добрив  $W_{гч}$  (т/год), які наведені в технічній характеристиці відповідних засобів механізації внесення добрив. Пропускную спроможність визначали за формулою [16]:

$$q_c = W_{гч} / 3,6. \quad (4)$$

Значення вантажопідйомності машин вибирали знову ж таки з їх технічної характеристики, яка наведена в Каталогах сільськогосподарської техніки та рекламній



інформації підприємств-виробників машин.

Обробки зібраних і розрахованих статистичних даних здійснена на засадах кореляційно-регресійного аналізу [17] та з використанням стандартних комп'ютерних програм.

**Виклад основного матеріалу.** Розподіл пропускної спроможності машин коливався в межах 4,17–36,11 кг/с за середнього арифметичного значення 14,34 кг/с і середнього квадратичного відхилення 6,86 кг/с та коефіцієнта варіації 47,8%. Розмах варіювання вантажопідйомності машин становив 2,0–24,0 т, а середнє арифметичне значення та середнє квадратичне відхилення і коефіцієнт варіації досліджуваного розподілу приймали значення відповідно 9,2 та 5,4 т і 58,7%. Опрацьована кореляційна таблиця включала 43 пари досліджуваних ознак «вантажопідйомність – пропускна спроможність кузовних машин для внесення ТОД». Факторіальна і результативна ознаки були розчленовані на п'ять статистичних груп кожна. Знайдені середньогрупові значення факторіальної ознаки і відповідні їм середньозважені значення результативної. Класовий інтервал вантажопідйомності машин становив 4,4 т, а класовий інтервал пропускної спроможності – 6,39 кг/с.

Коефіцієнт кореляції між секундною пропускною спроможністю машин як результативною ознакою і їх вантажопідйомністю як факторіальною приймає додатне значення 0,647 за кореляційного відношення результативної ознаки на факторіальну, що дорівнювало 0,671. З квадрата кореляційного відношення, що являє коефіцієнт детермінації і дорівнює 0,450, можна визначити силу впливу вантажопідйомності кузовних машин для внесення ТОД на пропускну спроможність досліджуваних засобів механізації. За значенням коефіцієнта детермінації із сукупного впливу різних факторів, що причинно зумовлюють варіацію пропускної спроможності машин, на їх вантажопідйомність припадає 45%. Додатна кореляція між досліджуваними ознаками свідчила про зростання пропускної спроможності машин у зв'язку з підвищенням їх вантажопідйомності. Для з'ясування характеру кількісного зв'язку між досліджуваними ознаками здійснено вирівнювання «експериментальних» значень пропускної спроможності машин залежно від їх вантажопідйомності рівняннями прямої з додатним кутовим коефіцієнтом та степеневій, логарифмічній, експоненціальної (показникової) функції та гіперболи.

З досліджуваних апроксимуючих залежностей за  $R^2$ -коефіцієнтом найкраще наближення до «експериментальних» даних забезпечила сповільнено зростаюча степенева функція вигляду

$$q_c = 4,5496 q_n^{0,53953} \quad \text{при } R^2 = 0,941, \quad (5)$$

де  $c$  – пропускна спроможність кузовних машин для внесення ТОД, кг/с;

$q_n$  – номінальна вантажопідйомність кузовних машин для внесення ТОД, т;

$R^2$  – коефіцієнт, що визначає і характеризує міру наближення вирівняних за відповідною апроксимуючою функцією значень результативної ознаки до її «експериментальних» даних.

З рівняння (5) сповільнено зростаючої степеневій функції видно, що із підвищенням вантажопідйомності машин їх пропускна спроможність має зростати до відповідного граничного (асимптотичного) значення. Асимптоту успішніше визначити з рівняння зростаючої гіперболи, яка за результатами опрацювання «експериментальних» значень  $q_c$  має вигляд:

$$q_c = 24,912 - 68,353 / q_n \quad \text{при } R^2 = 0,820. \quad (6)$$

Асимптота гіперболи за рівнянням (6) дорівнює 24,912 кг/с. З аналізу рівняння

(6) за його асимптотою дійшли висновку, що з підвищенням вантажопідйомності машин понад 20 т їх пропускна спроможність може сягати граничних значень в межах 25 кг/с.

На рис. 1 наведений графік зміни пропускної спроможності машин  $q_c$  залежно від їх вантажопідйомності  $q_n$  за сповільнено зростаючою степеневою функцією, що побудований за рівнянням (5).

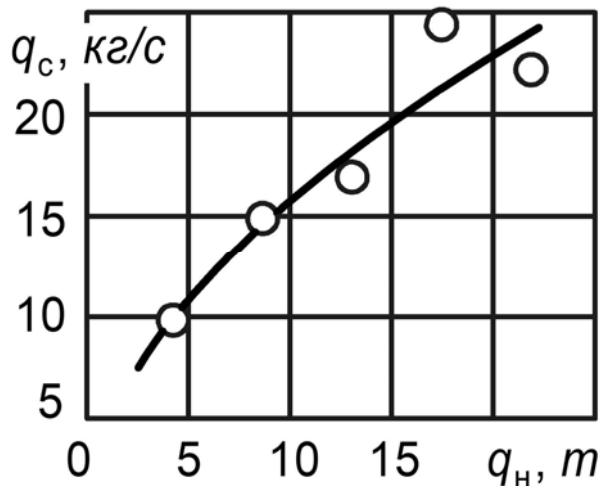


Рисунок 1 – Вплив вантажопідйомності  $q_n$  кузовних машин для внесення твердих органічних добрив на їх пропускну спроможність  $q_c$

Джерело: розроблено авторами

Якщо «експериментальні» значення  $q_c$  залежно від  $q_n$  апроксимувати рівнянням прямої з додатним кутовим коефіцієнтом, що має вигляд

$$q_c = 7,571 + 0,7775 q_n \quad \text{при } R^2 = 0,865, \quad (7)$$

то можна дійти і до такого висновку.

При підвищенні  $q_n$  на 1 т за її збільшенні від 2,0 до 24,0 т пропускна спроможність кузовних машин для внесення ТОД зростає на 0,78 кг/с.

**Висновки.** З'ясовані залежності варто враховувати при проектуванні кузовних машин для внесення твердих органічних добрив та організації їх використання при удобренні ґрунту в технологічних процесах механізованого вирощування сільськогосподарських культур.

## Список літератури

1. Експлуатація машинно-тракторного парку в аграрному виробництві / Ільченко В.Ю. та ін.; за ред. В.Ю. Ільченка. Київ: Урожай, 1993. 288 с.
2. Вабищевич И.Ф. Влияние технических характеристик машин на производство сельскохозяйственной продукции. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Проблеми технічної експлуатації машин. Системотехніка і технології лісового комплексу.* Харків, 2010. Вип. 94. С. 45–53.
3. Кругляков М.Л. Машины для внесения удобрений. Навозоразбрасыватели. *Справочник конструктора сельскохозяйственных машин:* в 2 т.; под ред. А.В. Красниченко. Т. 2. Москва: Машгиз, 1961. С. 255–259.
4. Машины для внесения удобрения / В.И. Александров и др. *Справочник конструктора сельскохозяйственных машин:* в 4 т.; под ред. М.И. Клецкина. Т. 2. Москва: Машиностроение, 1967. С. 369–422.
5. Герук С.М., Хоменко С.М. Результаты лабораторно-польових досліджень машини для внесення

- твердих органічних добрив. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Механізація сільськогосподарського виробництва*. Харків, 2010. Вип. 93. Т. 2. С. 141–149.
6. Герук С.М., Боровський В.М., Хоменко С.М., Сахнюк С.В. Результати експериментальних досліджень робочих органів машини для внесення органічних добрив. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. Механізація сільськогосподарського виробництва*. Харків, 2011. Вип. 107. Т. 1. С. 94–100.
  7. Хоменко С.М., Герук С.М., Міненко С.В., Савченко В.М. Результати лабораторних досліджень робочих органів машини для внесення органічних добрив. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. Механізація сільськогосподарського виробництва*. Харків, 2012. Вип. 124, Т. 1. С. 121–125.
  8. Хоменко С.М. Методика розрахунку встановлення розкидального барабана розкидача органічних добрив. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічний сервіс машин для рослинництва*. Харків, 2013. Вип. 134. С. 234–239.
  9. Ромашенко О.А. До моделювання процесу внесення твердих органічних добрив. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. Механізація сільськогосподарського виробництва*. Харків, 2010. Вип. 103. С. 151–156.
  10. Зайцев А.С., Ромашенко О.А., Анікєєв О.І. Енергетична оцінка роботи комплексів машин при внесенні твердих органічних добрив. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Механізація сільськогосподарського виробництва*. Харків, 2010. Вип. 93. Т. 2. С. 25–31.
  11. Мельник В.И., Ромашенко А.А. К определению оптимальных значений параметров работы агрегата по внесению удобрений методом разбрасывания. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. Механізація сільськогосподарського виробництва*. Харків, 2011. Вип. 107. Т. 1. С. 113–121.
  12. Мельник В.І., Ромашенко О.А. Енергетична оцінка комплексів машин при внесенні добрив. *Інженерія природокористування: наук. журн. / засн.: Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка*. Харків, 2016. № 1 (5). С. 118–121.
  13. Вітрух І.П., Білик С.Г. Деякі системні аспекти оптимізації параметрів транспортно-технологічних машин для внесення органічних та органо-мінеральних добрив. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. мівід. наук. техн. зб.* Кіровоград: КНТУ, 2013. Вип. 43. Ч. 1. С. 231–240.
  14. Озол Я.Г. Выбор оптимальных параметров навозоразбрасывателей. *Тракторы и сельхозмашины*. 1965. № 4. С. 20–22.
  15. Павленко С.І. Експериментальні дослідження показників роботи розкидача органічних добрив ПРТ-10 із двобарабанным навісним пристроєм. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: наук. журн. / засн.: Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка*. Харків, 2018. № 14. С. 156–164.
  16. Эксплуатация машинно-тракторного парка / Ляхов А.П. и др.; под ред. Ю.В. Будько. Минск: Ураджай, 1991. 336 с.
  17. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении: учеб. пособ. Москва: Изд-во Москов. ун-та, 1972. 292 с.

## References

1. Il'chenko, V.Yu. et al.(1993). *Ekspluatatsiia mashynno-traktornoho parku v ahrarnomu vyrobnytvstvi [Operation of machine-tractor fleet in agricultural production]*. V.Yu. Il'chenka (Ed.). Kyiv: Urozhaj [in Ukrainian].
2. Vabishhevich, I.F. (2010). Vliyanie tehnikeskikh harakteristik mashin na proizvodstvo sel'skohozyajstvennoj produkcii [The influence of the technical characteristics of machines on the production of agricultural products]. *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tehnichnogo universitetu sil'skogo gospodarstva im. Petra Vasilenka. Problemi tehničnoi ekspluatacii mashin. Sistemotekhnika i tehnologii lisovogo kompleksu – Bulletin of Kharkiv National Technical University Petra Vasilenka. Problems of technical exploitation of machines. System engineering and technology of the foil complex.* Harkiv. Issue. 94. 45–53 [in Russian].
3. Krugljakov, M.L. (1961). Mashiny dlja vnesenija udobrenij. Navozorazbrasyvateli. [Fertilizing machines. Manure spreaders]. *Spravochnik konstruktora sel'skohozyajstvennyh mashin – Agricultural Machinery Designer Handbook*. (Vols. 1- 2; Vol. 2). A.V. Krasnichenko (Ed.). Moskva: Mashgiz [in Russian].

4. Aleksandrov V.I. et al. (1967). Mashiny dlja vnesenija udobrenija [Fertilizing machines]. *Spravochnik konstruktora sel'skhozjajstvennyh mashin – Agricultural Machinery Designer Handbook*. (Vols.1-4; Vol. 2). M.I. Kleckina (Ed.). Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
5. Heruk, S.M. & Khomenko, S.M. (2010). Rezul'taty laboratorno-pol'ovykh doslidzhen' mashyny dlja vnesennia tverdykh orhanichnykh dobryv [Results of laboratory-polymeric machines for introducing solid organic goodies]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. Petra Vasylenka. Mekhanizatsiia sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko. Mechanization of agricultural production.. Kharkiv, Issue 93, Vol. 2. 141–149* [in Ukrainian].
6. Geruk, S.M., Borovs'kij, V.M., Homenko, S.M. & Sahnjuk, S.V. (2011). Rezul'taty eksperimental'nih doslidzhen' robochih organiv mashini dlja vnesennja organichnih dobriv [The results of experimental dosage of robotic organs of the machine for the introduction of organic good]. *Visnyk Harkivs'kogo nacional'nogo tehnicznego universitetu sil's'koho gospodarstva im. Petra Vasylenka. Tehniczni nauki. Mehanizacija sil's'kogospodars'koho virobnytstva – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko. Mechanization of agricultural production.. Issue. 107. Vol. 1. 94–100* [in Ukrainian].
7. Khomenko, S.M., Heruk, S.M., Minenko, S.V. & Savchenko, V.M. (2012). Rezul'taty laboratornykh doslidzhen' robochych orhaniv mashyny dlja vnesennia orhanichnykh dobryv [The results of laboratory tests of the working bodies of the machine for applying organic fertilizers.]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho gospodarstva im. Petra Vasylenka. Tekhnichni nauki. Mekhanizatsiia sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko. Mechanization of agricultural production.. Issue. 124, Vol. 1. 121–125* [in Ukrainian].
8. Khomenko, S.M. (2013). Metodyka rozrakhunku vstanovlennia rozkydal'noho barabana rozkydacha orhanichnykh dobryv [Method of calculating the installation of the spreading drum of the organic fertilizer spreader]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho gospodarstva im. Petra Vasylenka. Tekhnichnyj servis mashyn dlja roslynnytstva – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko. Technical service of machines for crop production.. Issue. 134. 234–239* [in Ukrainian].
9. Romanashenko, O.A. (2010). Do modeliuvannia protsesu vnesennia tverdykh orhanichnykh dobryv [Before modeling the process of applying solid organic fertilizers]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho gospodarstva im. Petra Vasylenka. Tekhnichni nauki. Mekhanizatsiia sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko. Mechanization of agricultural production.. Issue. 103. 151–15* [in Ukrainian].
10. Zajtsev, A.S., Romanashenko, O.A. & Anikieiev, O.I. (2010). Enerhetychna otsinka roboty kompleksiv mashyn pry vnesenni tverdykh orhanichnykh dobryv [Energy evaluation of machine complexes when applying solid organic fertilizers.]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho gospodarstva im. Petra Vasylenka. Mekhanizatsiia sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko. Mechanization of agricultural production. Issue. 93. Vol. 2. 25–31* [in Ukrainian].
11. Mel'nik, V.I. & Romanashenko, A.A. (2011). K opredeleniju optimal'nyh znachenij parametrov raboty agregata po vneseniju udobrenij metodom razbrasyvanija [To determine the optimal values of the operating parameters of the unit for applying fertilizers by the spreading method]. *Visnyk Harkivs'kogo nacional'nogo tehnicznego universitetu sil's'koho gospodarstva im. Petra Vasylenka. Tehniczni nauki. Mehanizacija sil's'kogospodars'koho virobnytstva – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasilenko. Technical sciences. Mechanization of agricultural production. Issue. 107. Vol. 1. 113–121* [in Russian].
12. Mel'nyk, V.I. & Romanashenko, O.A. (2016). Enerhetychna otsinka kompleksiv mashyn pry vnesenni dobryv [Energy assessment of machine complexes during fertilizer application]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia: nauk. zhurn. – Environmental engineering: science. magazine. / zasn.: Kharkivs'kyj natsional'nyj tekhnichnyj universytet sil's'koho gospodarstva im. Petra Vasylenka. Kharkiv. 1 (5). 118–121* [in Ukrainian].
13. Vitrukh, I.P. & Bilyk, S.H. 2013. Deiaki systemni aspekty optymizatsii parametriv transportno-tekhnologichnykh mashyn dlja vnesennia orhanichnykh ta orhano-mineral'nykh dobryv [Some system aspects of optimization of parameters transport - technological cars for introduction organic and body - mineral fertilizers]. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж.міжвід.наук.-техн. зб. – Konstruiuvannja, vyrobnytstvo ta ekspluatacija*

- sil's'kohospodars'kyx mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery, Vol.. 43. Part. 1. 231–240 [in Ukrainian].*
14. Ozol, Ja.G. (1965). Vybory optimal'nykh parametrov navozorazbrasyvatelej [Selection of optimal parameters of manure spreaders]. *Traktory i sel'hozmashiny – Tractors and agricultural machinery. 4. 20–22 [in Russian].*
  15. Pavlenko, S.I. (2018). Eksperymental'ni doslidzhennia pokaznykiv roboty rozkydacha orhanichnykh dobryv PRT-10 iz dvobarabannym navisnym prystroiem [Experimental researches on the performance indicators of the organic distributor of PRT-10 with a two-wheeled equipment]. *Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agriculture, forestry and transport systems. 14. 156–164 [in Ukrainian].*
  16. Ljahov, A.P. et al. (1991). *Operation of the machine and tractor fleet.* Ju.V. Bud'ko (Ed.). Minsk: Uradzhaj [in Russian].
  17. Dmitriev, E.A. (1972). *Matematicheskaja statistika v pochvovedenii [Mathematical statistics in soil science].* Moskva: Izd-vo Moskov. un-ta [in Russian].

**Anatoliy Limont**, Assist.Prof., Candidate of Engineering Science

*Zhytomyr Agrotechnical Colledge, Zhytomyr, Ukraine*

**Volodymyr Lomakin**, Candidate of Engineering Sciences

*Zhytomyr Agrotechnical Colledge, Zhytomyr, Ukraine*

**Zlata Limont**, student

*Dnipro National University named after Oles Honchar, the city of Dnipro, Ukraine.*

### **The Carrying and Load-carrying Capacity of Body Machines for Applying Solid Organic Fertilizers**

Solid organic fertilization of soil proves one of the most important factors which contributes to increasing the yielding capacity of farm crops and improving their production qualities. Along with other means of mechanization body machines are used for the mechanized fertilization of soil through distributing fertilizers along the field surface.

The paper is aimed at determining and investigating the carrying capacity of body machines used for applying solid organic fertilizers depending on their load-carrying capacity. The research technique lies in the comparative analysis of the determined resultative and factorial characters on the basis of the information obtained from the enterprises which produce body machines. The information was chosen from the catalogues of farm machinery and folders of the corresponding enterprises that produce these machines. The carrying capacity of machines was determined as the second-by-second advance of fertilizers in mass units (kilograms) to working parts of spreaders through the corresponding calculations; and the processing of harvesting and calculated data was carried out on the principles of the correlation and regression analysis, as well as with the use of standard computer programs.

The volume of statistical sampling amounted to 43 pairs of the investigated characters. The above has made it possible to establish. The positive correlation link between the carrying capacity of machines and their load-carrying capacity with the correlation coefficient amounting to 0.647 according to the correlation link of the resultative character on the factorial one, which equals 0.671. To ultimately determine the character of the relation between the investigated characters the authors accomplished the beveling of statistical data related to the carrying capacity of machines depending on their load-carrying capacity in the form of equations with straight line with positive angular coefficient and a number of curved linear dependences. With respect to  $R^2$ -coefficient the best correlation with experimental data was achieved through their approximation by means of equations of slow increasing step function. Of the investigated change is presented by the equation of the increasing hyperbola ( $R^2=0.820$ ), then according to the hyperbola asymptote with the load-carrying capacity increase of more than 20 tons their carrying capacity can amount to the marginal value of 25 kg/ses.

The investigated dependences have to be taken into account when designing body machines used for applying solid organic fertilizers, as well as when using them for soil fertilization under the technological processes of mechanized growing of farm crops.

**body machines for applying solid organic fertilizers, carrying capacity, load-carrying capacity, correlation link, equation of regression**

*Одержано (Received) 25.02.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 08.03.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК [005.31:005.336.3]:[67.02:531.791-002.41]

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).142-152](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).142-152)

Н. І. Кім, канд. техн. наук

*Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна**e-mail: kim\_ni@mnaui.edu.ua*

## Визначення закономірностей оцінок показників якості технологічного процесу на безрозмірній шкалі

В статті визначено головні умови до кількості і якості статистичної інформації для управління якістю технологічного процесу. Показано, що правильність і ефективність вирішення практичних завдань, застосовуючи статистичні методи оцінювання якості, визначається обсягом інформації про функціонування технологічного процесу. Представлено результати дослідження, пов'язані з визначенням закономірностей розподілу оцінок показників якості технологічного процесу на безрозмірній шкалі.

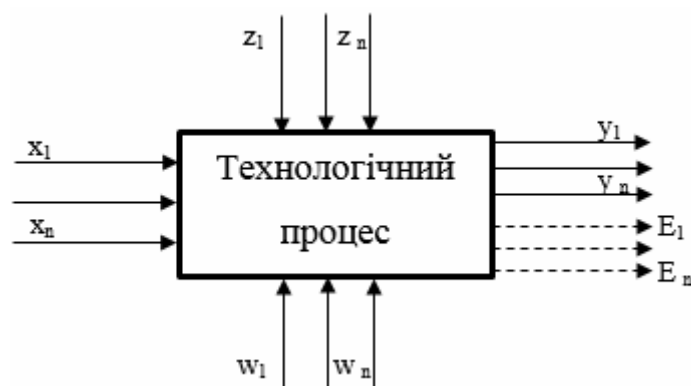
**об'єкти кваліметрії, технологічний процес, статистичний аналіз, функції щільності, безрозмірна шкала, узагальнений показник якості**

**Постановка проблеми.** Технологічний процес складає основу будь-якого виробничого процесу, є найважливішою його частиною, пов'язаною з переробкою сировини і перетворенням його в готову продукцію. Якість продукції є найважливішим показником підприємств, які прагнуть розвитку та досягнення успіху в конкуренції серед інших виробників. Особливо дане питання є актуальним для підприємств України, які прагнуть бути конкурентоспроможними на європейському і світовому ринку. Підприємства-лідери світової економіки довели, що для досягнення поставлених високих цілей в області якості продукції або послуг, важливе місце займають розробка і впровадження різних систем управління якістю, які передбачають постійний процес моніторингу, аналізу та постійного управління.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукової літератури: Г. П. Клименка, Я. В. Васильченка, М. В. Шаповалова [1], Р. М. Тріща [2], Н.Ю. Микийчук, Т. Г. Бойко, Т. З. Бубела [3], В.В. Ефимова [4] та ін. авторів показав, що проблемам оцінювання якості об'єктів кваліметрії, а саме технологічного процесу приділено велику увагу. Проте не повністю розкрито питання розподілу одиничних показників якості об'єкту кваліметрії на безрозмірній шкалі, що в свою чергу дозволить вирішувати практичні задачі, до яких відноситься визначення ризиків процесів систем управління якістю, або визначення надійності технологічного процесу та ін. Тому необхідно приділити увагу дослідженню закономірності оцінок показників якості технологічного процесу на безрозмірній шкалі.

**Постановка завдання.** Таким чином, метою статті є дослідження закономірностей оцінок показників якості технологічного процесу на безрозмірній шкалі. Якість виготовлення продукції залежить від якості технологічних процесів, а саме - багатьох факторів технологічного, технічного та організаційного характеру.

**Виклад основного матеріалу.** Під об'єктом кваліметрії будемо розглядати результат технологічного процесу – виготовлення продукції. Так як продукція – це результат технологічного процесу, розглянемо його основні характеристики.



$X_1 \dots X_n$  – вхідні контролюючі параметри;  $Z_1 \dots Z_n$  – управляючі контролюючі фактори;  
 $W_1 \dots W_n$  – не контролюючі фактори;  $Y_1 \dots Y_n$  – вихідні показники якості;  
 $E_1 \dots E_n$  – вихідні економічні показники

Рисунок 1 – Схема функціонування технологічного процесу

*Джерело: розроблено автором*

Як видно зі схеми рис. 1, технологічний процес являє собою складну систему, поведінку якої необхідно оцінювати, аналізувати, прогнозувати і при необхідності корегувати - керувати нею для забезпечення високої якості продукції [5].

Задані показники якості продукції можна досягти одним з двох принципово відмінних методів - індивідуального виготовлення, як правило це одиничні вироби, де застосовується ручна робота і методи пригонки, а також методом автоматичного отримання готової продукції із заданими параметрами якості на налагодженому устаткуванні. В даній статті будемо розглядати метод автоматичного отримання готової продукції, так як плануємо використовувати статистичні методи для оцінювання якості технологічних процесів.

Метод автоматичного отримання готової продукції на налагодженому устаткуванні характеризується розсіюванням дійсних значень показників їх якості, причиною якого є вплив випадкових і систематичних факторів.

Систематичні фактори, які впливають на розсіювання дійсних значень показників якості – це фактори, пов'язані з неточністю, зносом і деформацією обладнання та інструменту.

Випадковим фактором вважається фактор, який для різних виробів (продукції) даної партії має різні значення, причому його поява не підпорядковується ніякій видимій закономірності. В результаті виникнення випадкових факторів відбувається розсіювання показників якості виробів (продукції), виготовлених при одних і тих умовах. Розсіювання показників якості викликано сукупністю багатьох причин випадкового характеру, які не піддаються точному попередньому визначенню і виявляють свою дію одночасно і незалежно один від одного.

В результаті виникнення випадкових факторів при виготовленні партії виробів на налагодженому устаткуванні істинний показник якості кожного виробу є випадковою величиною і може приймати будь-яке значення в межах певного інтервалу. Для виявлення та аналізу закономірностей розподілу показників якості при їх розсіянні успішно застосовуються методи математичної статистики.

Багато технологічних процесів вимагають застосування сучасних засобів управління, включаючи самоналагоджуючі системи адаптивного і автоматичного управління, що забезпечують оптимальний хід технологічного процесу навіть при випадкових коливаннях характеристик матеріалу і інтенсивності зносу обладнання, а також при температурних, силових та інших показниках [6].

При управлінні якістю в таких умовах застосовується математична статистика в основному для проведення статистичного аналізу. Мета статистичного аналізу полягає в дослідженні властивостей випадкової величини. Експериментальною основою такого дослідження є результати неодноразового вимірювання значень досліджуваної випадкової величини показника якості, які зазвичай розглядаються як випадкова вибірка з генеральної сукупності.

При оцінюванні якості готової продукції з використанням статистичного аналізу в кожному конкретному практичному випадку може вирішуватися ряд завдань, кожне з них включає два етапи: обробку вибірки і прийняття рішення. Іншими словами, будь-яке завдання статистичного аналізу в кінцевому підсумку спрямоване на прийняття рішення. Так як існують умови невизначеності через обмежений обсяг і випадковий характер вибірки, прийняте рішення носить імовірнісний характер.

Завдання, які вирішуються при оцінюванні якості з використанням статистичного аналізу можна розділити на три великих класи – статистичне оцінювання, перевірка статистичних гіпотез і обчислення оцінки функції розподілу. Вони істотно розрізняються як за внутрішнім змістом, так і за методами їх вирішення.

Завдання оцінювання в статистиці завжди спрямоване на обчислення кількісних характеристик випадкової величини за результатами кінцевої вибірки. При оцінюванні зазвичай розрізняють правило оцінювання, яке називається оціночною функцією, і значення, до яких призводить це правило, застосоване до конкретної вибірки.

При перевірці статистичної гіпотези зазвичай ставиться мета визначити за вибіркою властивості випадкової величини або сукупності їх. При цьому властивості можуть виражатися як кількісно, так і якісно, відповідно до цього гіпотеза може носити як кількісний, так і якісний характер [7].

Визначення функції розподілу випадкових величин показників якості об'єктів кваліметрії можна вважати несуттєвим завданням, але тільки в разі необмежених можливостей в отриманні статистичного матеріалу. Дійсно, в такому випадку за допомогою широко відомих методів можна дуже точно оцінювати параметри розподілів і мати невеликі помилки при перевірці гіпотез. Якщо ж необхідно оцінити функцію розподілу випадкових величин, то це нескладно виконується одним з поширених методів, наприклад за допомогою побудови полігону частот або гістограми, але такі підходи побудовані на принципі групування статистичних даних, що вимагає великої кількості статистичної інформації.

На практиці дуже часто доводиться працювати в умовах обмежених обсягів статистичної інформації. Особливо гостро це відчують служби контролю якості підприємств, що мають дрібносерійне виробництво. Таке ж становище існує у виробництві і експлуатації дорогих і високонадійних технічних виробів. Аналогічні приклади можна відшукати в медицині, біології і т. д. При аналізі статистичного матеріалу обмеженого обсягу завдання оцінювання функції розподілу приймає проблематичний характер [8].

Уміння будувати хорошу (в імовірнісному сенсі) оцінку функції розподілу при малих кількостях статистичної інформації дає можливість обчислювати хороші оцінки моментів випадкової величини і більш впевнено, тобто з меншими помилками першого і другого роду, приймати рішення при перевірці статистичних гіпотез.

Особливості та шляхи вирішення задач оцінювання якості продукції як дискретних випадкових величин в умовах малої кількості статистичної інформації полягають в ефективному використанні статистичної інформації обмеженого обсягу. Інформаційний підхід є корисним і результативним при вирішенні завдань статистичного аналізу.



Інформаційний підхід дозволяє оцінити якість статистичного аналізу. Припустимо, що величина  $I'_N$  визначає кількість інформації про досліджуване явище, отримане з вибірки обсягу  $N$  за допомогою одного методу, а величина  $I''_N$  характеризує інший метод. Тоді при співвідношенні  $I'_N > I''_N$  завжди можна вважати, що якість аналізу, при якому використовується перший метод, вищий. При оцінюванні, наприклад, щільності розподілу потрібно розглядати якість оцінки  $f^*(x)$ , обчисленої за результатами кінцевої вибірки, визначаючи його аналогічним чином [9].

Оцінка являється ефективною, якщо вона володіє мінімальною дисперсією відхилень від оцінюваного показника якості. Якість оцінки цілком визначається вибірковою щільністю розподілу [10]. При визначенні якості з інформаційних позицій, щільністю вибіркового розподілу є функція  $\varphi_N(H)$ , яка дійсно цілком визначає якість оцінки  $f^*(x)$ . Наприклад, якість оцінки, що має щільність  $\varphi_N(H)$  виду 1, вище ніж для оцінки з щільністю виду 2 (рис. 2) [9], так як має меншу дисперсію. Але дисперсія є міра розкиду випадкової величини  $f^*(x)$  і є однією з характеристик вибіркового розподілу  $\varphi_N(H)$ .

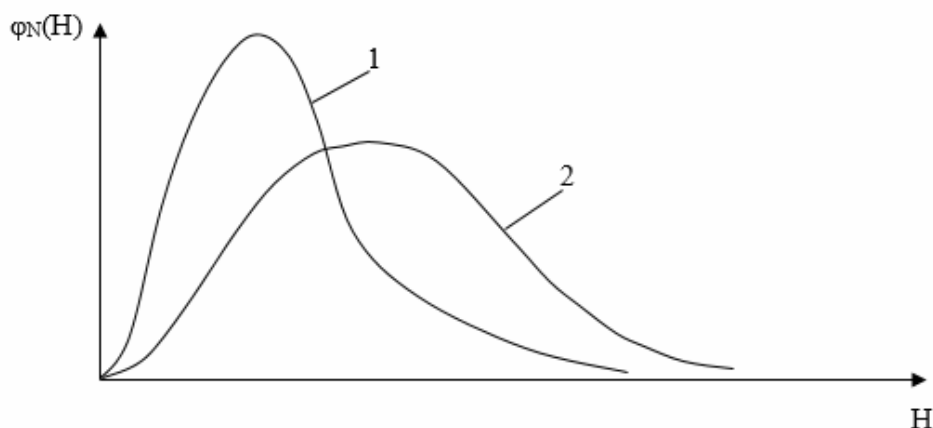


Рисунок 2 – Щільності вибіркового розподілу

*Джерело: розроблено автором*

Рівень якості оцінки, визначений за інформаційним критерієм, збігається з рівнем ефективності оцінки. Але дисперсія в повному обсязі визначає щільність  $\varphi_N(H)$  і, отже, не може повністю характеризувати якість оцінки, а задає тільки його частину. Можна стверджувати, що мінімум дисперсії служить необхідною, але не достатньою умовою високої якості оцінки. Необхідною і достатньою умовою високої якості оцінки, як видно з рис. 2, є мінімум математичного очікування величини  $f^*(x)$  при мінімальній дисперсії.

Оцінити якість абсолютно не представляється можливим, тому що для цієї мети необхідно було б знати кількість інформації, що міститься у вибірці обсягу  $N$ . Визначення цієї величини в даний час не може бути отримано об'єктивно. В будь-якому випадку суб'єктивність методу буде накладати свій відбиток.

Для дослідження завдання оцінювання функції розподілу і її щільності визначимо функціонал в наступному вигляді:

$$H_N = \int_U f^*(x) \ln \frac{f^*(x)}{f(x)} dx. \quad (1)$$

Таким чином, ми маємо право назвати величину  $H_N$  умовною апостеріорною ентропією, яка залишається після обробки результатів вибірки, тобто після знаходження оцінки  $f^*(x)$ . Умовна ентропія, яка існує до побудови оцінки  $f^*(x)$ ,

обчислюється аналогічно:

$$H_0 = \int_U f_0(x) \ln \frac{f_0(x)}{f(x)} dx. \quad (2)$$

Для обчислення величини  $H_0$  необхідно мати щільність  $f_0(x)$ . Тоді величина умовної інформації, що береться з вибірки обсягу  $N$  шляхом обчислення оцінки  $f^*(x)$ , може бути представлена зазвичай як різниця апіорної і апостеріорної умовних ентропій:

$$I_N = H_0 - H_N. \quad (3)$$

Очевидно, що міру  $I_N$  можна вважати точною характеристикою якості статистичного аналізу, хоча вона і відображає кількість умовної інформації, отриманої з вибірки при аналізі. При обчисленні  $I_N$  за формулою (3) з урахуванням (1) і (2) отримаємо випадкове вибірконе значення, безпосередньо за яким не можна зробити певного висновку щодо якості аналізу. Достовірне судження можна формулювати тільки за величинами, які мають достатню стійкість. До таких величин відносяться вибіркві оцінки моментів випадкової величини. Тому при оцінюванні функції розподілу і її щільності, для визначення якості оцінювання, будемо використовувати математичне сподівання  $M[I_N]$  і дисперсію  $D[I_N]$  величини  $I_N$ . При цьому необхідною і достатньою умовою більш високої якості оцінювання, як і раніше, будемо вважати мінімум математичного сподівання  $M[I_N]$  при мінімальній дисперсії  $D[I_N]$ .

В умовах обмеженої інформації зазвичай оперують малою вибіркою, під якою розуміється мале число спостережень над випадковою величиною, що описує досліджуване явище. Але таке формулювання відносно і не завжди визначає межу між малою та великою вибіркою. Розрізняти великі і малі вибірки необхідно, але чіткої межі між ними встановити не можна. Вибірка, взята з сукупності з невеликим розкидом ознак, може вважатися великою, тоді як вибірка такого ж обсягу, взята з більш різномірної сукупності, виявиться меншою. Питання про те, до якої категорії віднести вибірку, вирішується в кожному конкретному випадку.

Важливо мати на увазі, що до великих вибірок можна застосовувати апарат теорії малих вибірок, тоді як зворотне призводить до значних помилок. У сумнівних випадках для отримання надійних результатів рекомендується користуватися апаратом малих вибірок. У великих вибірках середні значення контрольованих величин тісніше групуються біля генеральної середньої, що дозволяє отримувати більш точні і надійні результати, тоді як в малих вибірках доводиться задовольнятися більш широкими межами для середніх або меншою вірогідністю результатів. Проте теорія малих вибірок [11] знайшла в практиці широке застосування.

Якщо немає можливості точно оцінити кількість інформації, з якою має справу статистик, то це необхідно зробити хоча б наближено. У багатьох методах статистичної обробки вибірки використовується ідея угруповання даних (гістограма, критерій  $\chi^2$  і т. д.). При аналізі вибірок значного обсягу з використанням цих методів зазвичай вдається отримати задовільний результат. Але групування спостережень викликає зазвичай зменшення інформації, яка отримується з вибірки.

Таким чином, вибірку можна вважати малою, якщо при її обробці методами, заснованими на угрупованні спостережень, можна вирішити завдання з необхідною точністю і достовірністю результату. У цьому визначенні сконцентровані всі основні положення, розглянуті нами. З нього випливає, що вибірку можна вважати великою, якщо при її обробці є можливість перейти до угруповання спостережень без відчутної втрати інформації. При цьому повинні досягатися задані точність і достовірність. Межу, що розділяє великі і малі вибірки, не можна, розуміти як точку в ряду цілих

чисел. Але найістотнішим, що впливає з визначення малої вибірки, і на чому вже наголошувалося, є необхідність при обробці малої вибірки індивідуального підходу до кожної окремої реалізації.

Правильність і ефективність вирішення практичних завдань визначається обсягом інформації про функціонування технологічного процесу, яку можна розділити на консервативну і оперативну. До консервативної інформації відноситься знання закону розподілу і знаходження ефективних статистичних оцінок його параметрів, а до оперативної – обсяг вибірки. Під інформацією, в даному випадку, будимо розуміти відображення випадкової вибірки досліджуваного явища, тому можна сказати, що при статистичному аналізі відбувається вилучення інформації з вибірки.

Розглянемо інформаційне забезпечення процесу управління якістю статистичними методами. Об'єм оперативної інформації - обсягу вибірки з генеральної сукупності, може бути знайдений з інформаційної моделі:

$$D(X) \geq \frac{1}{I(X)}, \quad (4)$$

де  $I(X)$  – кількість інформації щодо параметра  $X$ , яка складається з кількості консервативної інформації  $I_K(X)$  та кількості оперативної інформації  $n$ .

З нерівності (4) видно, що зменшення дисперсії вимагає збільшення кількості інформації. Для цього необхідно розробити методи отримання більшого обсягу необхідної інформації без збільшення обсягу контрольної вибірки. Іншими словами, для використання статистичних методів управління якістю, необхідно знання закону розподілу і його ефективних статистичних оцінок. Чим точніше знайдена функція щільності розподілу, і чим ефективніше статистичні оцінки, тим менше необхідний обсяг вибірки.

В результаті були отримані 5 функцій, за допомогою яких можна було отримувати оцінки показників якості процесів на безрозмірній шкалі.

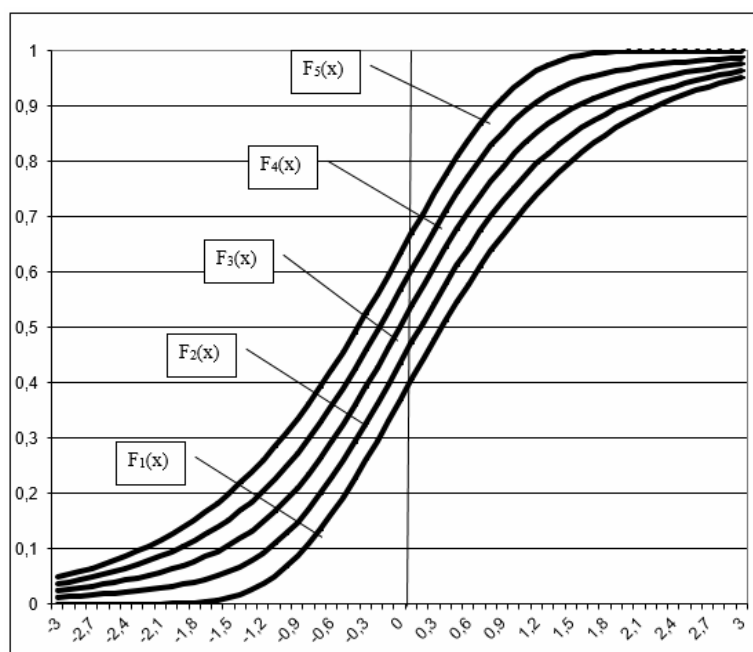


Рисунок 3 – Система залежностей показників якості та їх оцінками на безрозмірній шкалі  
Джерело: розроблено автором

З (рис 3) видно, що один і той же процес може бути оцінений по п'яти залежностям і, не дивлячись на те, що вони мають подібний вигляд, вони дадуть різні оцінки. В такому разі можна зробити висновок, що їх можна застосовувати для оцінки якості об'єктів різної природи, якщо до них ставляться різні вимоги. Тобто, один і той показник якості може мати п'ять значень його оцінок на безрозмірній шкалі. Мається на увазі, що це дає можливість вибору, чи зробити оцінку жорсткою, чи послабити її.

У даній статті представлено дослідження функцій щільності випадкових величин оцінок показників якості об'єктів кваліметрії на безрозмірній шкалі та визначення імовірності їх попадання в заданий інтервал оцінювання.

Нехай випадкова величина  $X$  підпорядкована нормальному закону розподілу та пов'язана з випадковою величиною  $Y$  залежністю:

$$F(x) = y = \frac{1}{1 + ab^{-kx}} \quad (5)$$

Знайдемо щільність ймовірностей випадкової величини  $Y$ . Як відомо, рівняння знаходження функції щільності ймовірностей  $q(y)$  випадкової величини  $Y$  має вигляд:

$$q(y) = f(\psi(y))|\psi'(y)|, \quad (6)$$

де  $f(x)$  – щільність ймовірностей випадкової величини  $X$ ;

$\psi(y)$  – обернена функція до  $y = \varphi(x)$ .

Якщо відома функція щільності ймовірностей  $q(y)$  для випадкової величини  $Y$ , то можна розв'язати ряд практичних задач, зокрема знайти ймовірність того, що значення випадкової величини  $Y$  попадає в деякий проміжок  $(c, d)$ :

$$P(c < y < d) = \int_c^d f(y) dy = F(d) - F(c), \quad (7)$$

де  $F(y)$  – функція розподілу випадкової величини  $Y$ .

Розглянемо деяку задачу, в якій:  $Q_{\min} = -10$ ;  $Q_{\max} = 10$ ;  $k = 1$ ;  $m_x = 0$ ;  $\sigma_x = 1$ . Тоді  $a = 3.164$ ;  $b = 2.239$

Знайдемо імовірність того, що значення випадкової величини  $Y$  попадуть в проміжок  $(c, d)$ . Для цього необхідно обчислити інтеграл:

$$P(c < y < d) = \int_c^d f(y) dy . \quad (8)$$

В результаті розрахунків отримали результати, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Імовірності попадання значення випадкової величини у проміжок  $(c - d)$ .

Інтервал (c - d)	0,1-1	0,2 - 1	0,3 - 1	0,4 - 1	0,5 - 1	0,6 - 1	0,7 - 1	0,8 - 1	0,9 - 1
Імовірність	0,903	0,614	0,353	0,177	0,076	0,027	0,006	0,003	0,001

Джерело: розроблено автором

Отже, знаючи закон розподілу одиничних показників якості об'єкту кваліметрії та знаючи залежність з їх оцінками на безрозмірній шкалі, можна вирішувати практичні задачі з визначення імовірності попадання оцінок показників якості в заданий інтервал. Вирішення таких задач актуально при визначенні ризиків процесів систем управління якістю, чи визначенні надійності технологічного процесу та ін.

Для апробації запропонованої методики оцінювання якості об'єктів кваліметрії різної природи, а саме технологічного процесу пропонується її застосувати для дослідження багатомірного контролю якості технологічного процесу виготовлення

рослинної олії

Згідно вимог міжнародних стандартів ДСТУ ISO 9001:2015 [70], де указано, що оцінювання системи управління якістю (СУЯ) в цілому повинна здійснюватись з урахуванням оцінок окремих процесів [65]:

– п. 4.1 – вказує на необхідність здійснення моніторингу та вимірювання процесів;

– п. 5.4.2 – висуває вимоги до планування, яке повинно забезпечувати цілісність СУЯ;

– п. 5.5.2 – містить вимоги до діяльності представника у сфері якості, який повинен надавати найвищому керівництву інформацію про функціонування окремих процесів та СУЯ в цілому;

– п. 5.6.2 – потребує здійснення аналізування з боку керівництва за результатами функціонування окремих процесів та СУЯ в цілому;

– п. 8 – вимагає проведення моніторингу та вимірювання процесів і здійснення внутрішніх аудитів для встановлення чи відповідає СУЯ запланованим заходам.

Отже процеси необхідно оцінювати і пропонується застосовувати розроблену методикку для оцінювання якості процесів на прикладі процесу виготовлення рослинної олії. Нехай вимоги до якості процесу виготовлення рослинної олії на підприємстві установлені нормативними документами і зведені у таблицю 2, у якій встановлено максимальне, мінімальне та оптимальне значення одиничних значень показників якості процесу.

Згідно із запропонованою методикою необхідно установленими методами та приладами отримати виміряні значення показників якості процесу та занести результати у таблицю 2.

Групою експертів, в залежності від важливості показника якості визначаються параметри форми  $k$  для кожного із показників якості та заносяться у табл. 2.

За формулою 9 визначається оцінка одиничного показника якості на безрозмірній шкалі та заноситься у таблицю 2.

$$f(q) = \frac{1}{1 + ab^{-kq}}, \quad (9)$$

Узагальнену оцінку якості можна знаходити за формулою:

$$W = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Q_i}, \quad (10)$$

де  $Q_i$  – значення  $i$ -ого показника якості на безрозмірній шкалі.

Також для визначення узагальненого показника якості можна рекомендувати оцінку в іншій формі, так, наприклад, визначати  $W$  за формулою середньої гармонійної, так як середнє геометричне позитивних величин більше або дорівнює їх середньої гармонійної.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Q_i}, \quad (11)$$

де  $Q_i$  – одинична оцінка  $i$ -ого показника якості, обчислена за формулою (1).

Ще одну узагальнену оцінку якості  $W$  можна запропонувати як середнє арифметичне одиничних оцінок  $Q_i$ , що визначаються за формулою (1), так як середнє арифметичне більше середнього геометричного і середнього гармонійного:

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (12)$$

Вибираючи метод отримання узагальненого показника якості можна понижувати або підвищувати вимоги до оцінювання якості об'єкту.

За однією із формул (10) – (12) визначається узагальнений показник якості однієї реалізації процесу. Згідно результатів оцінювання якості процесу, представлених у таблиці 2 отримали такі результати узагальненого показника якості однієї реалізації:  $Q = 0,87$ .

Таблиця 2 – Значення показників якості процесу механічної обробки.

№	Показник якості	$q_{\max}$	$q_{\min}$	$q_{\text{опт}}$	$q_i$	k	Q
1	Шум, дБ	140	40	40	60	1	0,95
2	Вібрація, м/с <sup>2</sup>	1,5	0,1	0,1	0,15	1	0,92
3	Середній час, хв.	0,6	0,4	0,5	0,5	1	1
4	Рівень готової продукції, %	100	90	100	96	1	0,64
5	Рівень дисципліни на робочому місці, бали	5	0	5	4	1	0,92
	Узагальнений показник						0,87

Джерело: розроблено автором

Таким чином, отримане значення узагальненого показника якості дає підстави власнику процесу чи керівництву підприємства приймати рішення стосовно подальших дій з управління процесом. Зазначимо, що запропонований метод спрощує процес аналізування причин, які викликали зниження рівня якості процесу, оскільки з розрахунку видно, якому фактору слід приділити більшої уваги.

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження визначено головні умови до кількості і якості статистичної інформації. Показано, що правильність і ефективність вирішення практичних завдань, застосовуючи статистичні методи оцінювання якості, визначається обсягом інформації про функціонування технологічного процесу, яку можна розділити на консервативну і оперативну. До консервативної інформації відноситься знання закону розподілу і знаходження ефективних статистичних оцінок його параметрів, а до оперативної – обсяг вибірки.

Запропоновано функції щільності законів розподілу випадкових величин оцінок показників якості на безрозмірній шкалі. Так як запропонована математична залежність (5) не лінійна, то функції щільності оцінок не співпадають з функціями щільності показників якості.

Знаючи функції щільності можна визначити імовірності попадання випадкової величини оцінки показника якості в різні інтервали на безрозмірній шкалі. Так, при заданих умовах, імовірність попадання в інтервал 0,1 – 1 становить 0,903, а в інтервал 0,4 – 1 становить 0,177, що доказує нерівномірність щільності розподілу.

Отримане значення узагальненого показника якості дає підстави власнику процесу чи керівництву підприємства приймати рішення стосовно подальших дій з управління процесом. Зазначимо, що запропонований метод спрощує процес аналізування причин, які викликали зниження рівня якості процесу, оскільки з розрахунку видно, якому фактору слід приділити більшої уваги.

## Список літератури

1. Клименко Г. П., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Якість і надійність технологічних систем. Краматорськ : ДДМА, 2018. 200 с.
2. Трищ Р. М. Точечная и интервальная оценки качества изделий. *Вісник НТУ «ХПИ». Збірник наукових праць. НТУ «ХПИ»*. 2006. Вип. 27. С. 96-102.
3. Микийчук М. М., Бойко Т. Г., Бубела Т. З. Параметрична модель для оцінювання якості

- технологічних процесів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування*. 2007. Вип. 574. С. 89–93.
4. Ефимов, В.В., Барт Т.В. Статистические методы в управлении качеством продукции: учебное пособие. М. : КноРус, 2006. 233 с.
  5. Болотніков А.О. Стандартизація та сертифікація товарів і послуг. К. : МАУП, 2005. 144 с.
  6. Трищ Р.М., Слитюк Е.А. Обобщённая точечная и интервальная оценки качества изготовления детали ДВС. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2006. №1. С. 63-67.
  7. Сотниченко В. Тенденції якості у новому тисячолітті. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2000. №4. С. 48–51.
  8. Ким Н.И., Денисенко А.Н., Трищ А.Р. Квалиметрический подход к оцениванию качества объектов различной природы статистическими методами. *Збірник наукових праць «Системи управління, навігації та зв'язку» Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Метрологія та вимірювальна техніка*. 2017. Вип. 4(44). С. 56 -59.
  9. Трищ Р. М., Ким Н. И. Закономерности рассеивания безразмерных показателей качества объектов различной природы. *Збірник наукових праць «Системи управління, навігації та зв'язку» Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Метрологія та вимірювальна техніка*. 2016. №4. С. 143-145.
  10. Trisch R., Gorbenko E., Dotsenko N., Kim N., Kiporenko A. Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 4(3(82)). P. 18–24.
  11. Rebelo M. F., Santos G., Silva R. Integration of management systems: towards a sustained success and development of organizations. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 127. P. 96–111.

## References

1. Klymenko H. P., Vasylychenko Ya. V. & Shapovalov M. V. (2018). *Yakist i nadiinist tekhnolohichnykh system [Quality and reliability of technological systems]*. Kramatorsk : DDMA [in Ukrainian].
2. Trishch R. M. (2006). Tochechnaia i intervalnaia otsenki kachestva izdelii [Point and interval assessment of product quality]. *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. NTU «KhPI», 27, 96-102* [in Russian].
3. Mykyichuk M. M., Boiko T. H. & Bubela T. Z. (2007). Parametrychna model dlya otsiniuvannia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv [Parametric model for assessing the quality of technological processes]. *Visnyk Natsionalnogo universytetu «Lvivska politekhnika». Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia, 574, 89–93* [in Ukrainian].
4. Efimov, V.V. & Bart T.V. (2006). *Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom produktsii [Statistical methods in product quality management]*. М. : KnoРус [in Russian].
5. Bolotnikov A.O. (2005). *Standartyzatsiia ta sertyfikatsiia tovariv i poslug [Standardization and certification of goods and services]*. Kiev : MAUP [in Ukrainian].
6. Trishch R.M. & Slitiuk E.A. (2006). Obobshchennaia tochechnaia i intervalnaia otsenki kachestva izhotovleniia detali DVS [Generalized point and interval estimates of the quality of manufacturing an ICE part]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii, Vol. 1, 63-67* [in Russian].
7. Sotnychenko V. (2000). Tendentsii yakosti u novomu tysiacholitti [Quality trends in the new millennium]. *Standartyzatsiia, sertyfikatsiia, yakist, 4, 48–51* [in Ukrainian].
8. Kim N.I., Denisenko A.N. & Trishch A.R. (2017). Kvalimetricheskii podkhod k otsenivanniu kachestva obektov razlichnoi prirody statisticheskimi metodami [Qualimetric approach to assessing the quality of objects of various nature by statistical methods]. *Zbirnyk naukovykh prats «Systemy upravlinnia, navigatsii ta zviazku» Poltavskogo natsionalnogo tekhnichnogo universytetu imeni Yuriia Kondratiuka. Metrologiia ta vymiriivalna tekhnika, 4(44), 56 -59* [in Russian].
9. Trishch R. M. & Kim N. I. (2016). Zakonomernosti rasseivaniia bezrazmernykh pokazatelei kachestva obektov razlichnoi prirody [Regularities of scattering of dimensionless quality indicators of objects of various nature]. *Zbirnyk naukovykh prats «Systemy upravlinnia, navigatsii ta zviazku» Poltavskogo natsionalnogo tekhnichnogo universytetu imeni Yuriia Kondratiuka. Metrologiia ta vymiriivalna tekhnika, 4, 143-145* [in Russian].
10. Trisch R., Gorbenko E., Dotsenko N., Kim N. & Kiporenko A. (2016). Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(3(82)), 18–24* [in English].
11. Rebelo M. F., Santos G. & Silva R. (2016). Integration of management systems: towards a sustained success and development of organizations. *Journal of Cleaner Production, Vol. 127, 96–111* [in English].

Nataliia Kim, PhD tech. sci.

*Mykolayiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine*

### **Determining of Regularities of Evaluations of Technological Process Quality Indicators on a Sizeless Scale**

The purpose of the article is to study the patterns of evaluation of quality indicators of the technological process on a sizeless scale. The quality of production depends on the quality of technological processes, namely - many factors of technological, technical and organizational nature.

The technological process is the basis of any production process, is the most important part of it, associated with the processing of raw materials and its transformation into finished products. Product quality is the most important indicator of companies seeking to develop and succeed in competition among other manufacturers. This issue is especially relevant for Ukrainian companies seeking to be competitive in the European and world markets.

To manage the quality of the object often have to use statistical methods of evaluation and management, where, as basic information you need to know not the law of distribution of quality in its units, and know the law of distribution of their assessments on a sizeless scale, therefore, research related to determining the patterns of distribution of assessments of quality indicators of the technological process on a sizeless scale. Knowing the law of distribution of unit quality indicators of the object of qualimetry and knowing the dependence with their estimates on a sizeless scale, it is possible to solve practical problems to determine the probability of getting estimates of quality indicators in a given interval. The solution of such problems is relevant in determining the risks of the processes of quality management systems, or determining the reliability of the technological process and other indicators.

As a result of the study, the main conditions for the quantity and quality of statistical information were identified. It is shown that the correctness and efficiency of solving practical problems, using statistical methods of quality assessment, is determined by the amount of information about the functioning of the technological process, which can be divided into conservative and operational. Conservative information includes knowledge of the distribution law and finding effective statistical estimates of its parameters, and operational - the sample size.

**qualimetry objects, technological process, statistical analysis, density function, sizeless scale, generalized quality indicator**

*Одержано (Received) 06.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 14.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*



## АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.119

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).153-161](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).153-161)

**М.В. Красота**, доц., канд. техн. наук, **І.Ф. Василенко**, доц., канд. техн. наук, **С.О. Магопєць**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Бєвз**, доц., канд. техн. наук, **Р.А. Осін**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Крилов**, асист.

*Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: krasotamv@ukr.net*

### Ідентифікація несправностей опор амортизаційних стійок легкових автомобілів

В статті розглянуті особливості конструкцій опор амортизаційних стійок легкових передньопривідних автомобілів. Визначено основні несправності, які можуть набувати опори амортизаційних стійок в процесі експлуатації, а саме зношування опорного підшипника, а також, вихід з ладу гумового демпфуючого елемента. Приведено аналіз чинників, які інтенсифікують процес зношування опорного підшипника. Розглянуто ознаки виходу з ладу опорного підшипника та гумового демпфуючого елемента опори амортизаційної стійки. Запропоновано метод інструментального діагностування опор амортизаційних стійок.

**амортизаційна стійка, опора стійки, опорний підшипник, діагностування підвіски**

**Постановка проблеми.** Основною функцією підвіски автомобіля є згладжування коливань кузова, що викликаються нерівностями дорожнього полотна та мають вплив на безпечність руху автомобіля, комфорт водія та пасажирів, а також вибір швидкісного режиму руху. Покращення умов експлуатації автомобіля шляхом зниження рівня коливань підресорених мас автомобіля зменшує втому водія, збільшує ресурс його агрегатів та систем, а також підвищує безпеку дорожнього руху. Тому, підтримання характеристик підвіски, встановлених підприємством виробником, своєчасне виявлення її несправностей, а також забезпечення прийнятної рівня шуму та вібраційної навантаженості є актуальною задачею в галузі експлуатації автомобільного транспорту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Однією з наймасовіших типів підвісок, що використовуються в конструкціях сучасних легкових автомобілів, є підвіски типу «МакФерсон», що являють собою амортизаційну стійку у зборі з поворотним кулаком, на який монтується маточина колеса і направляючий елемент у вигляді штампованого важеля, з'єднаного через кульовий шарнір (шарову опору), а також, рульові тяги, які також приєднуються через кульовий шарнір (наконечник рульової тяги) [1].

Стійка «МакФерсон» приєднується до кузова за допомогою поворотного гумово-металевого шарніру – верхньої опори [2]. В сучасних автомобілях зменшення передачі динамічних навантажень від дорожнього полотна на кузов забезпечується пружними елементами підвіски такими як, власне пружини, ресори, пневмокамери, а також, гумовими та гумово-металевими елементами, такими як сайлентблоки, відбійники та верхні опори [3].

Дослідженню вібрацій легкових автомобілів присвячено ряд наукових праць, які мають як теоретичний, так і прикладний характер. Дослідження в такому напрямку викладені в ряді наукових праць.

Зокрема в роботах Шаїхова [4, 5] була запропонована методика проектування і розрахунку верхньої опори амортизаційної стійки передньої підвіски легкового автомобіля за умов зниження, а також розглядалися питання матеріалів та форми демпфуючих елементів з точки зору зниження вібрацій, що передаються на кузов автомобіля.

В роботі [6] виконаний теоретичний аналіз умов роботи підвіски при русі автомобіля, в роботах [7, 8, 9] розглянуті питання конструювання та розрахунку елементів підвісок автомобіля в напрямку підвищення плавності ходу та комфорту, проте в цих роботах не розглядаються питання визначення технічного стану таких елементів амортизаційної стійки як верхня опора.

В роботі [10] розглядаються питання діагностування шарових опор підвісок віброактивними методом, однак по діагностуванні верхніх опор амортизаційної стійки рекомендацій не надається.

Аналіз наукових публікацій показав, що на теперішній час недостатня увага приділяється вивченню умов роботи пружних елементів підвіски типу «МакФерсон», зокрема верхньої опори амортизаційної стійки. Недостатньо вивчено вплив умов експлуатації на роботу верхньої опори на зміну її технічного стану, відсутні однозначні висновки по проявам зміни технічного стану верхніх опор, а також, по методам визначення технічного стану опор.

Майже вся інформація по визначенню технічного стану опор амортизаційних стійок зводиться до органолептичного методу, який вимагає високих фахових компетенцій від працівників автосервісу, що часто є причиною постановки недостовірного діагнозу технічного стану опор.

**Постановка завдання.** Метою даної публікації є систематизація інформації з існуючих конструкцій верхніх опор, особливостей навантажень елементів опор залежно від їх конструкцій, аналіз факторів, що впливають на зношування опор та їх можливих дефектів, а також надання рекомендацій щодо виконання діагностики.

**Викладення основного матеріалу.** Верхня опора амортизаційної стійки є відповідальним елементом підвіски, який наділений демпфуючими властивостями та забезпечує еластичність з'єднання амортизаційної стійки з кузовом.

Верхня опора амортизаційної стійки підвісок являє собою вузол (нерозбірний або збірний), в основі якого знаходиться гумово-металевий шарнір, який сприймає частину ваги кузова і виконує поглинання вібрацій, що передаються від стійки на кузов. Від технічного стану верхньої опори багато в чому залежить як довговічність і комфортабельність пасажирів та водія автомобіля, частково безпека руху і керованість, тому що опора визначає положення амортизаційної стійки відносно кузова, а також легкість повертання стійки при виконанні маневрування.

Верхня опора конструктивно може мати декілька виконань. Умовно опори можливо поділити на два типи – нерозбірні та збірні.

Нерозбірні опори амортизаторів представляють собою вузол, який складається з гумової подушки – демпфера, яка привулканізована до зовнішнього корпусу та внутрішнього корпусу опори, Зовнішній корпус опори може мати від двох до чотирьох болтів, якими виконується кріплення до стакану кузова. Існують також конструкції, де фіксація верхньої опори до кузова за допомогою болтів взагалі не виконується. Така опора має гумову подушку, всередину якої завулканізований опорний підшипник. В даних конструкціях опора не кріпиться до кузова, вона просто тримається за рахунок

пружності пружини та ваги автомобіля. Оскільки стійка досить глибоко вставлена в посадочне місце, то майже повністю виключається можливість випадіння амортизаційної стійки з посадочного місця.

У внутрішньому корпусі опори запресовано підшипник, який зафіксовано завальцюванням втулки.

Також, нерозбірні опори залежно від способу встановлення пружин амортизаційної стійки поділяються на два типи: без чаші для пружин та з чашею.

В першому випадку опорна чаша пружини є окремою деталлю, яка встановлюється на штоку амортизатора і притискається пружиною до підшипника. При другому типі конструкції чаша пружини жорстко кріпиться до опори, також в ній може бути передбачена гумова вставка під витки пружини.

Збірні опори амортизаторів, як правило складаються з окремих деталей, наприклад, в деяких опорах підшипник є окремою складовою частиною, яка встановлюється між чашкою пружини і внутрішньою втулкою.

Експлуатаційні властивості та ресурс опори визначають як правило два основних елементи – гумовий демпфер та тип підшипника.

Підшипник опори служить для забезпечення повертання амортизатора в опорі відносно кузова автомобіля. Конструктивно вузол являє собою підшипник кочення (рідше ковзання). Підшипник в процесі руху автомобіля сприймає як осьові так і радіальні навантаження.

В опорах найчастіше використовуються радіально-упорні підшипники, однак, в бюджетних автомобілях зустрічаються і звичайні радіальні підшипники.

Залежно від особливостей конструкції, складові частини опори по різному сприймають навантаження в процесі руху автомобіля.

Наприклад, в конструкціях, які застосовуються на автомобілях VW Golf з I по III покоління, а також ВАЗ та інш., гайка штока стягує жорстко між собою деталі: шток, верхню чашку пружини і нижню обойму опорного підшипника. В такій конструкції, шток стійки обертається відносно стакана кузова разом з пружиною, стійкою і керованим колесом, однак в таких конструкціях демпфер виконаний досить жорстким і значна частина вібрацій передається на кузов.

Для покращення віброізоляції кузова від підвіски, застосовуються опори з розвантаженим демпфером штока амортизаційної стійки. В такій конструкції чашка пружини підвіски упирається в стакан кузова через опорний підшипник. Опорний підшипник дозволяє чашці з пружиною і стійці з керованим колесом вільно повертатися відносно стакана кузова. Шток амортизаційної стійки в цій опорі жорстко закріплений гайкою в еластичному демпфері штока, що пов'язує шток з кузовом. На штоку при цьому мають місце лише невеликі навантаження: вертикальні — від зусиль стиснення-розтягу амортизатора стійки, і бокові, якими шток діє на ущільнення амортизатора. Ці зусилля набагато менші, ніж сили на штоку опор першого типу конструкції. Тому, демпфер штока в цій опорі виконаний більш еластичним і, таким чином, забезпечується краща віброізоляція кузова від підвіски.

Вихід з ладу підшипника опори амортизаційної стійки відбувається з наступних причин. Опорний підшипник амортизаційної стійки працює в умовах жорстких навантажень. Інтенсивність зношування підшипника підвищується при їзді по поганому дорожньому покриттю, входженню в поворот на великій швидкості, експлуатації автомобіля в агресивних кліматичних умовах. Також, ситуація може погіршуватися через те, що конструктивно у багатьох підшипниках відсутні захисні щитки від потрапляння пилу та вологи. Отже, в мастилi підшипника може накопичуватися абразивний матеріал, який прискорює зношування його робочих

поверхонь.

При значному зношенні елементів підшипника порушуються кути встановлення коліс, що позначається на безпеці та зношуванні інших деталей та вузлів підвіски.

При роботі підвіски опорний підшипник не обертається, а лише повертається відносно вихідного положення при виконанні автомобілем маневру. Таким чином, близько 75...80% всього часу експлуатації елементи підшипника знаходяться в одному положенні, а отже, їх зношування відбувається в результаті дії динамічних навантажень від дорожнього полотна, при цьому сам знос розподілений нерівномірно. При русі по нерівностях відбувається передача енергії ударів на кільця та елементи підшипників, відбувається пластична деформація деталей підшипника. Потрапляння абразиву також прискорює зношування підшипника.

Отже, якщо визначати основні фактори, що визначають вихід з ладу підшипників опори амортизаційної стійки, то їх можливо встановити в такому порядку:

1. Природне механічне зношування робочих поверхонь та елементів кочення підшипників (кульок або роликів). Ресурс підшипників при нормальній експлуатації, як правило складає 80...120 тис. км.

2. Інтенсифікація механічного зношування внаслідок підвищених динамічних навантажень через агресивну манеру водіння автомобіля. В цьому випадку водій на підвищених швидкостях їздить по дорозі та різко входить в повороти, при цьому різко збільшуються прискорення руху амортизаційної стійки, що в свою чергу викликає підвищене зношування підшипника опори.

3. Середовище, в якому експлуатується автомобіль. Залежно від кліматичних умов та вологості повітря, а також рівня запилюваності вихід з ладу підшипників опори амортизаційної стійки може відбутися набагато раніше, ніж це гарантується виробником.

4. Якість мащення підшипника. Для того, щоб знизити інтенсивність зношування поверхонь підшипника використовується консистентне мастило. Якість самого мастила визначає, багато в чому, строк експлуатації підшипника. Дуже часто виробник закладає недостатню кількість мастила, іноді зустрічається «однобічне» закладування, тобто мастило нерівномірно розподілене по підшипнику. У зв'язку з тим, що підшипник не обертається на повні оберти, а, буквально, повертається на певний кут, то таке нерівномірне закладування мастила може призвести до сухого тертя елементів підшипника і його підвищеного зношування. Також, в разі застосування виробником в опорах відкритого підшипника (без захисних щитків) активність потрапляння вологи та пилу буде вищою.

Вихід з ладу демпфуючих гумових елементів характеризується наступними ознаками. При експлуатації автомобіля відбувається зношування деталей опори, демпфуючі гумові елементи подушки можуть втрачати еластичність, розтріскуватися та відшаровуватися від металевих деталей, до яких вони навулканізовані. Можливе, також, розтягування гумового елемента опори, що призводить до контакту опори з верхньою чашкою пружини та супроводжується одиночними глухими ударами.

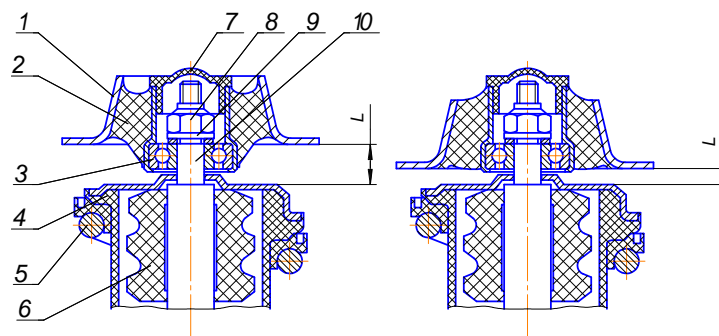
Розтріскування гумового елемента можливо спостерігати візуально (рис. 1). При наявності тріщин або надривів опору слід негайно замінити.



Рисунок 1 – Опори з пошкодженим гумовим елементом

*Джерело: розроблено авторами*

При розтягуванні гумового елемента опори (рис. 2) стійка починає просаджуватися в напрямку кришки капоту, також збільшується амплітуда коливання кузова, що супроводжується глухими ударами при наїзді на нерівності дорожнього полотна. На рис. 2 *a* схематично показано положення корпусу опори при нормальному стану демпфера та при розтягнутому – рис. 2 *б*. При розтягнутому демпфері відстань між корпусом опори та чашкою пружини  $L$  значно зменшується, що призводить до надмірного виступання штоку та ударів корпусу опори по чашці пружини при русі по нерівностях.



*a* – в нормальному стані; *б* – з розтягнутим гумовим елементом;

1 – корпус опори; 2 – демпфуючий елемент; 3 – підшипник; 4 – чашка пружини; 5 – пружина; 6 – відбійник; 7 – захисний ковпачок; 8 – гайка штока амортизатора; 9 – шайба; 10 – шток амортизатора;

Рисунок 2 – Опора амортизаційної стійки

*Джерело: розроблено авторами*

Вихід з ладу підшипника амортизаційної стійки характеризується наступними ознаками.

При зношуванні підшипника рівень шуму та зниження комфорту водіння значно вищий ніж при зношуванні гумового елемента. Ознаками підвищеного зносу підшипників є наступні фактори — наявність стуку при повороті руля (може також відчуватися на рульовому колесі), а також погіршення керованості автомобілем. Також, зношування підшипника може проявлятися у вигляді скрипів, та посмикувань в процесі повертання рульового колеса. Особливо відчутно проявляється ускладнене повертання рульового колеса на автомобілях без підсилювача рульового керування.

При зношуванні підшипник починає люфтити, стукати, а шток амортизатора відхиляється від своєї осі. В процесі руху автомобіля по дрібним нерівностям при зношеному підшипнику також відчувається стукіт з боку підвіски, який іноді складно ідентифікувати, так як він аналогічний стукам при зношуванні інших деталей підвіски чи рульового керування.

Для ідентифікації несправностей опор амортизаційних стійок необхідно використовувати достовірні методи, адже від результату діагностування залежить вартість ремонту підвіски автомобіля та обсяг розбирально-складальних операцій. На теперішній час окремих методик перевірки опор амортизаційних стійок не існує. В умовах сервісних підприємств опори перевіряють органолептичним методом, тобто зовнішнім оглядом визначаються наявність тріщини та розривів. Стан підшипника перевіряють поклавши одну руку на опору, та розгойдуючи автомобіль в поздовжньому та поперечному напрямку відносно кузова автомобіля. При цьому намагаються відчутти удари, які можуть виникати в опорах.

Однак, такі методи не завжди можуть бути достовірними, тому що вимагають високої кваліфікації та значного досвіду діагноста. Також, при такому методі досить часто стукіт в опорі ідентифікується не вірно, тому що при розхитуванні автомобіля

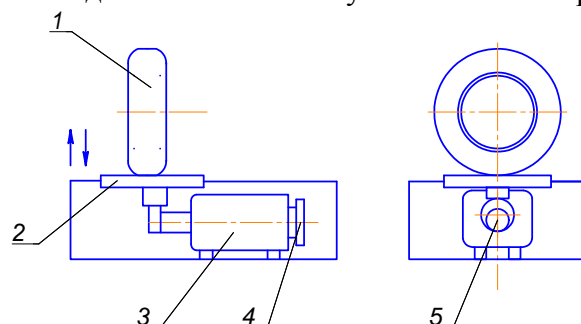
можуть виникати удари в інших з'єднаннях підвіски, зокрема, в самому амортизаторі або в рульовому приводі, що буде відчуватися на опорі.

Отже, для точної діагностики доцільно використовувати інструментальні методи контролю технічного стану.

Для відтворення роботи опори необхідно імітувати умови руху автомобіля по нерівному дорожньому полотну. Для вирішення цього завдання доцільно використовувати вібростенди для діагностування підвіски.

Стенди такого типу мають два майданчики, на які встановлюється автомобіль передніми та задніми колесами. На кожному майданчику вмонтовані датчики для вимірювання статичного та динамічного навантаження на колеса автомобіля. Майданчикам надаються вертикальні переміщення (рис. 3).

При вмиканні стенда платформи здійснюють вертикальні коливання з різними амплітудами (6,0, 7,5 або 9,0 мм) і частотами, які змінюються в діапазоні 16...23 Гц). Колеса автомобіля знаходяться в постійному контакті з поверхнею платформ.



1 колесо автомобіля; 2 рухомий майданчик стенду; 3 електродвигун;  
4 маховик; 5 ексцентрик

Рисунок 3 – Схема стенду для перевірки підвісок

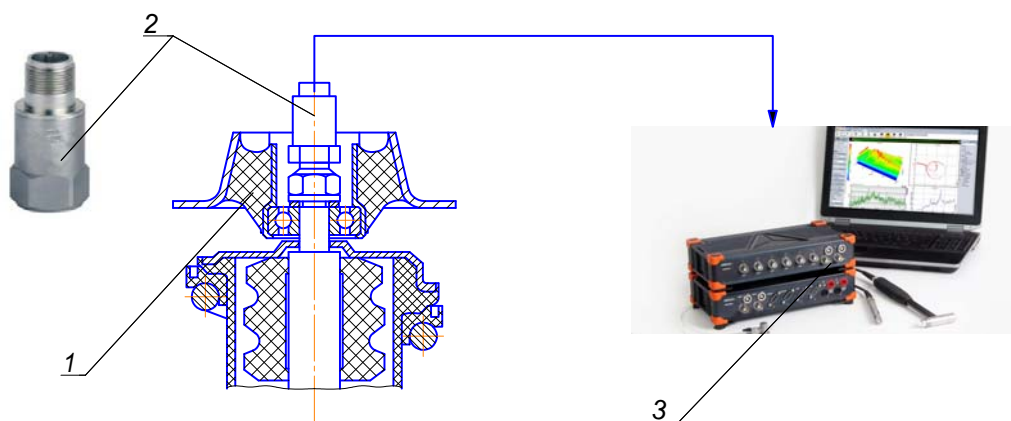
*Джерело: розроблено авторами*

При досягненні максимальної частоти живлення електродвигунів стенду вимикається і система здійснює вільні згасаючі коливання. У випадку наближення частоти вільних коливань невіднесеної маси до резонансу відбувається різке зростання амплітуди коливань, за цією амплітудою визначають технічний стан амортизатора та підвіски в цілому.

Пропонується при виконанні даних операцій діагностування підвіски визначати і технічний стан опор.

З погляду точності виміру, інформативності, простоти й швидкості діагностування підшипникового вузла найбільш перспективними представляються діагностичні методи, засновані на використанні ємнісних вібраційних датчиків [10]. Переміщення елементів зношеної опори приводить до появи вібрації в них, що приводить до утворення електричного сигналу, за амплітудою якого можливо судити про величину люфту у підшипниках.

З метою визначення параметрів вібрацій на шток амортизаційної стійки необхідно змонтувати датчики віброприскорень, як це показано на рис. 4. Обробка сигналу виконується комп'ютером стенду або окремим переносним електронним пристроєм.



1 - опора; 2 - датчик віброприскорень; 3 – обчислювальний пристрій (аналізатор сигналу)

Рисунок 4 - Схема підключення вібраційних датчиків до опори

*Джерело: розроблено авторами*

Наявність вібрації обумовлена присутністю зазорів в підшипнику між елементами кочення та внутрішньої і зовнішньої обіймами, зношенням канавок обійм, елементів кочення. Також, надмірне розтягування пружного елемента опори може призводити до контакту зовнішнього корпусу опори та чашки пружини, що супроводжується ударами в опору, які також будуть сприйматися датчиками та будуть ідентифіковані у вигляді сплесків амплітуд віброприскорень.

В умовах експлуатації такі вібрації з'являються в підшипнику при русі автомобіля, при різноспрямованих навантаженнях, що з'являються в опорі при переміщеннях колеса, коли воно переїжджає нерівності дорожнього полотна, розгоні, гальмуванні й русі автомобіля на повороті.

Окремим тестом для опор слід проводити визначення вібрацій при повороті рульового колеса. Направляючі колеса автомобіля повинні знаходитися на нерухомих платформах стенду. Даний тест дозволить виявити можливі «заїдання» в підшипнику опори, які будуть проявлятися у вигляді коротких сплесків амплітуд вібрацій.

Досліджуваний параметр, що характеризує технічний стан підшипника - осьовий зазор  $h$ . При зростанні величини осьового зазору до  $h=0,1$  мм і більше, опора амортизаційної стійки непридатна для наступної експлуатації.

Для реалізації даного методу існує необхідність у проведенні досліджень з метою отримання залежностей між величиною осьового зазору  $h$  в опорах і показаннями вібродатчиків установлених на робочих елементах стенда. На основі отриманих результатів доцільно застосовувати метод, що дозволяє визначати осьовий зазор  $h$  в підшипниках опор, установлених на автомобілях, за допомогою вібродатчиків, без розбирання й зняття опор та амортизаційної стійки з автомобіля.

Результати коливального процесу при виконанні діагностування опори автоматично обробляються і заносяться в пам'ять комп'ютера.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** В даній публікації виконано аналіз інформації з існуючих конструкцій верхніх опор, особливостей їх роботи в умовах експлуатації, розглянуто фактори, що впливають на зношування опор та їх можливі несправності. За результатами проведених досліджень можливо зробити наступні висновки.

1. Основними несправностями опор, що можуть виникати в процесі експлуатації є зношування опорного підшипника, а також, вихід з ладу гумового демпфуючого елемента.

2. Приведено аналіз чинників, які інтенсифікують процес зношування опорного підшипника. Розглянуто ознаки виходу з ладу опорного підшипника та гумового демпфуючого елемента опори амортизаційної стійки.

3. Для здійснення достовірного діагностування доцільно відтворювати роботу опори в умовах руху автомобіля по нерівному дорожньому полотну, для вирішення цього завдання доцільно використовувати вібростенди для діагностування підвіски. Запропоновано виконувати ідентифікацію ударів та вібрацій в зношеній опорі за допомогою датчиків віброприскорень з наступною обробкою отриманих сигналів.

## Список літератури

1. Аулін В.В., Гриньків А.В., Чернай А.Є., Уманенко О.О., Монолій А.О., Притула С.І. Підвищення стійкості та керованості транспортного засобу шляхом удосконалення конструктивних параметрів підвіски. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту*: зб. наук. матеріалів міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 18-19 листопада 2020 року. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С.97-115.
2. А. В. Гнатов, С. В. Кисловський, Дмитру Нехенія. Керований амортизатор з магнітною рідиною для адаптивної підвіски автомобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*: збірка матеріалів V Міжнар. наук.-техн. Інтернет-конф., 20-21 листопада 2017 р., Харків : ХНАДУ, 2017. С. 164 – 165.
3. Раймпель Й. Шасси автомобіля / Сокр. пер. 1 тома 4 нем. Узд. В.П. Агапова; под. ред. И.Н. Зверева. М.: Машиностроение, 1983. 356 с.
4. Шаихов Р.Ф., Филькин Н.М. Расчет оптимального угла наклона упругого элемента амортизационных опор. *Вестник ИжГТУ: Периодический научно-теоретический журнал Ижевского государственного технического университета*. 2011. Вып. 1. С. 29-33.
5. Шаихов Р.Ф., Филькин Н.М. Оптимизация упругих элементов амортизационных опор легкового автомобиля для снижения влияния вибрации на организм человека. *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 1.
6. Агейкин Я. С., Кульчицкий-Сметанка В.М. Теория движения колесной машины по неровной грунтовой поверхности : учеб. пособие . М-во образования Рос. Федерации. Моск. гос. индустр. ун-т, Ин-т дистанц. Обучения М. : МГИУ : ИДО, 2002.
7. Anil Babu Seelam, Monish Senthil Kumaran, Krishnamurthy H. Sachidananda. Design and Analysis of Suspension Strut in Automobile Vehicles. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. Vol. 7, No. 4, December, 2020, pp. 587-596.
8. S.C.Jain, Pushpendra kumar Sharma, Dhara Vadodaria. Mcpherson suspension system - a review. *International Journal For Technological Research In Engineering*, Volume 1, Issue 12, August-2014
9. Ротенберг Р. В. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода . М.: Машиностроение, 1972. 392 с.
10. Тебекин М. Д., Катунин А.А., Новиков А.Н. Методика проведения стендовых экспериментов по определению технического состояния шаровых опор . *Мир транспорта и технологических машин*. 2014. №2(45). С.14-20.

## References

1. Aulin, V.V., Hrynkyv, A.V., Chernai, A.Ie., Umanenko, O.O., Monolii, A.O. & Prytula, S.I. (2020). Pidvyshchennia stiikosti ta kervanosti transportnoho zasobu shliakhom udoskonalennia konstruktyvnykh parametriv pidvisky [Improving the stability and controllability of the vehicle by improving the design parameters of the suspension / Innovative technologies for the development and efficiency of road transport]. *Innovatsiini tekhnolohii rozvytku ta efektyvnosti funktsionuvannia avtomobilnoho transportu: Zb. nauk. materialiv mizhnar. naukovopraktychnoi internet-konferentsii (18-19 lystopada 2020 roku) - Coll. Science. materials international. scientific-practical Internet conference (pp.97-115)*, Kropyvnytskyi: TsNTU [in Ukrainian].
2. Hnatov, A.V., Kyslovskiy, S.V. & Hehenia Dmitry. (2017). Kerovanyi amortyzator z mahnitnoiu ridynoiu dlia adaptivnoi pidvisky avtomobilia [Controlled shock absorber with magnetic fluid for adaptive car suspension] . *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii: zb. materialiv V Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi Internet-konferentsii (20-21 lystopada 2017 r., m. Kharkiv) – zb. materials of the V International Scientific and Technical Internet Conference (pp.164-165)*. Kharkiv : KhNADU[in Ukrainian].
3. Raympel, Y. (1983). *Shassi avtomobilya [Car chassis]*. Moscow: Mashinostroyeniye [in Russian].



4. Shaikhov, R.F. & Filkin, N.M. (2011). *Raschet optimalnogo ugla naklona uprugogo elementa amortizatsionnykh opor [Calculation of the optimal angle of inclination of the elastic element of the shock-absorbing bearings]*. Izhevsk: IzhGTU [in Russian].
5. Shaikhov, R.F. & Filkin, N.M. (2012). Optimizatsiya uprugikh elementov amortizatsionnykh opor legkovogo avtomobilya dlya snizheniya vliyaniya vibratsii na organizm cheloveka [Optimization of elastic elements of shock-absorbing bearings of a passenger car to reduce the effect of vibration on the human body]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*. [in Russian].
6. Ageykin, Y.S. (2002) Teoriya dvizheniya kolesnoy mashiny po nerovnoy gruntovoy poverkhnosti [Theory of the movement of a wheeled vehicle on an uneven ground surface]. Moscow : MGIU [in Russian].
7. Anil Babu Seelam, Monish Senthil Kumaran, Krishnamurthy H. Sachidananda. (2020). Design and Analysis of Suspension Strut in Automobile Vehicles. *Mathematical Modelling of Engineering Problems, Vol. 7, No. 4, December, 2020*, pp. 587-596 [in English].
8. S.C.Jain, Pushpendra kumar Sharma, Dhara Vadodaria Mepheron.(2014). Suspension system - a review. *International Journal For Technological Research In Engineering, Vol. 1, Issue 12, August-2014* [in English].
9. Rotenberg, R.V. (1972). *Podveska avtomobilya. Kolebaniya i plavnost khoda [Car suspension. Oscillation and smoothness]* Moscow: Mashinostroyeniye [in Russian].
10. Tebekin, M.D., Katunin, A.A. & Novikov, A.N. (2014). Metodika provedeniya stendovykh eksperimentov po opredeleniyu tekhnicheskogo sostoyaniya sharovykh opor [Technique for bench experiments to determine the technical state of ball joints]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin – The world of transport and technological machines* , 2(45), 14-20 [in Russian].

**Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., Phd tech. sci, **Ivan Vasylenko**, Assoc. Prof., Phd tech. sci, **Serhii Mahopets**, Assoc. Prof., Phd tech. Sci, **Oleg Bevz**, Assoc. Prof., Phd tech. Sci, **Ruslan Osin**, Assoc. Prof., Phd tech. Sci, **Oleksandr Krylov**, Assist.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Identification of Car damper Strut Supports Defects**

The goal of current research is the systematization of information from existent constructions of upper supports, features of support elements load depending on their constructions, analysis aspects, which influence supports attrition and their probable defects, and also giving recommendations for diagnostics.

The informational analysis made due to existent upper supports constructions, features of their action in exploitation conditions, considered factors which influence on supports attrition, and their probable defects.

Considered supporting bearer and rubber damping elements of damper strut supports fail indications.

Fail of rubber damping elements characterized by the range of attributes. Due to car exploitation take place support detail attrition, rubber damping elements of supports waste their elasticity, crack and delaminate from the metal details, rubber damping supports stretch, which leads to support`s contact with upper springs cap and attends with singular thumps.

Due to bearing attrition level of rattling and decreasing driving comfort are much higher than due to rubber element attrition. Features of increased bearing attrition are next: rattling by rudder turning occurrence (can also take place on the steering wheel), deterioration of car control. Bearing attrition appears in terms of squeaks and jerks in the process of steering wheel turning in the cars without a power steering.

Due to attrition bearing starts to play, thump, and damper piston rod deviates from own axle. During car motion on the small roughs with depleted bearings also perceived rattling from the side of suspender, which sometimes can be difficult to identify, because it is analogous to rattling caused by attrition of other details of suspender or steerage.

Offered to realize damper strut supports diagnostics by the way of support` action in a car moving conditions on the pocky surface simulation, to solve this task recommended to use vibration stand for suspender diagnostics. Offered to use the identification of hits and vibrations in foreworn supports via vibration acceleration sensor with later processing.

### **Damper strut, strut support, supporting bearer, suspender diagnostics**

*Одержано (Received) 27.01.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 11.02.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

Л.А. Тарандушка, доц., канд. техн. наук, Н.Л. Костьян, доц., канд. техн. наук,  
І.П. Тарандушка, асист.

*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна*  
*e-mail: tarandushka@ukr.net; 438knl@gmail.com; tarandushka@ukr.net*

## Розв'язання багатокритеріальної задачі оптимізації системи автосервісу на прикладі «АНТ-АВТО-СЕРВІС», м. Черкаси

Досліджується проблема визначення раціональних режимів функціонування системи автосервісу на макрорівні. Здійснено математичну постановку задачі оптимізації для вирішення даної проблеми, що дозволило визначити показники соціально-економічної ефективності до та після оптимізації підприємства та розрахувати критерій доцільності її впровадження на прикладі «АНТ-АВТО-СЕРВІС», м. Черкаси. Результати дослідження пропонується застосовувати в процесі реорганізації систем автосервісу на макрорівні.

**багатокритеріальна задача оптимізації, система автосервісу, математична модель, соціально-економічна ефективність**

**Постановка проблеми.** Сучасні системи автосервісу мають складну структуру, морфологічні ознаки функціональних елементів якої характеризують як внутрішній стан системи, так і вплив зовнішніх факторів на ефективність її функціонування. Керування зазначеними системами та їх вдосконалення потребує аналізу залежностей між її вхідними та вихідними параметрами на основі розроблених математичних моделей. Дані залежності в загальному випадку не є лінійними. Крім того, в результаті застосування оптимальних режимів роботи систем на різних рівнях ієрархії окрім економічного ефекту автосервісу отримується соціальний ефект, що проявляється у зменшенні часу обслуговування і фінансових витрат клієнтів, розширенні клієнтського радіусу та наблизенні актуального попиту [1] на автосервісні послуги до потенційного. В реальних умовах функціонування на параметри систем автосервісу накладаються певні обмеження. Таким чином, стає необхідним формулювання та розв'язання задачі нелінійного програмування для оптимізації функціонування системи автосервісу за критеріями соціально-економічної ефективності та втрат клієнта.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [2] запропоновано визначати соціально-економічну ефективність автосервісу за критерієм доцільності реалізації цільового рівня якості, проте не враховано витрати підприємства на обслуговування клієнтів. Автором [3] розроблено алгоритм визначення ефективності автосервісу за рахунок коригування рівня використання виробничо-технічної бази підприємства із врахуванням лише найчастіше виконуваних послуг. В роботі [4] ефективність виробництва враховує соціально-економічну ефективність автосервісу, задоволення потреб споживачів, задоволення суспільних потреб, ефективність використання ресурсів. Але в даній роботі використано обмежений перелік параметрів системи автосервісу. Автори [5] стверджують, що необхідними умовами ефективної роботи системи автосервісу є підвищення кваліфікації працівників, застосування інноваційних технологій обслуговування та ремонту транспортних засобів,

вдосконалення методів та форм організації праці, вдосконалення системи самоконтролю. Проте не представлено метод розрахунку ефективності. В роботі [6] виокремлено фактори, що впливають на якість технологічних процесів та ефективність роботи системи автосервісу, але не визначено аналітичну залежність між зазначеними вихідними параметрами. Авторами [7, 8] представлено збалансовану систему показників діяльності підприємства автосервісу. Проте зазначена система не враховує характеристики транспортних засобів, що обслуговуються підприємством. Для розрахунку ефективності системи автосервісу в даних роботах використано лише економічні показники системи.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є розробка алгоритму визначення раціональних режимів роботи системи автосервісу на макрорівні для досягнення максимального рівня соціально-економічної ефективності автосервісу та мінімальних втрат клієнтів системи з врахуванням характеристик її функціональних елементів.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз доцільності впровадження оптимізаційних робіт в межах системи автосервісу базується на розрахунку значення приросту показника соціально-економічної ефективності обслуговування автомобілів. Приріст показника соціально-економічної ефективності  $\Delta E_\phi$  визначається наступним чином:

$$\Delta E_\phi = E_{\phi 2} - E_{\phi 1},$$

де  $E_{\phi 1}$ ,  $E_{\phi 2}$  – показники соціально-економічної ефективності автосервісу до та після оптимізації системи автосервісу відповідно, що є функціями від коефіцієнту якості технологічних процесів системи автосервісу.

В [6] надано детальний опис параметрів системи автосервісу на макрорівні  $\{x_i\}$ ,  $1 \leq i \leq 19$ ; визначено їх базис  $\{x_j\}$ ,  $j \in \{2,5,9,10,11,12,19\}$ ; отримано математичну модель, що відображає залежність коефіцієнту якості технологічних процесів системи від її параметрів [6]. Дана модель є основою оптимізації роботи системи за критерієм рівня якості виконання технологічних процесів.

При  $\Delta E_\phi < 0$  оптимальні режими роботи системи автосервісу пропонується визначати шляхом розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації, що містить систему цільових функцій річної соціально-економічної ефективності автосервісу та середніх витрати клієнтів, що пов'язані з отриманням послуг протягом року (1) та систему обмежень базисних змінних (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} E_\phi = f_1(x_1) \cdot f_2(x_{12}, x_{14}, x_{15}) \cdot f_3(x_4, x_5, x_6) - \\ \quad - [f_4(x_5) + f_5(x_2, x_6) + f_6(x_5) + f_7(x_4, x_9) + f_8(x_2)] \rightarrow \max; \\ B_{кл} = f_9(x_1, x_2, x_5, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{18}, x_{19}) \cdot [L_{км} \cdot f_{10}(x_{12}, x_{19}) + \\ \quad + (f_{11}(R_{кл}, x_{14}, x_{15}) + f_{12}(x_4, x_5, x_6, x_7, x_{17}) + f_{13}(x_2, x_{14}, x_{15}) + \\ \quad + f_{14}(x_2, x_5, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{19}) + T_{in} + f_{15}(x_2, x_{17})) \times f_{16}(x_{19})] \rightarrow \min, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{2_{stat}} \leq x_2 \leq ((x_{14} \cdot \frac{x_5}{1000} \cdot R_{кл}) / f_2(x_{12}, x_{14}, x_{15})) : x_{18} \\ x_{5_{stat}} \leq x_5 \leq 1, \quad x_{5_{stat}} \leq 1 \\ 0 \leq x_5 \leq 1, \quad x_{5_{stat}} > 1 \\ 1 \leq x_9 \leq 4 \\ 1 \leq x_{10} \leq 3 \\ 1 \leq x_{11} \leq 4 \\ 1 \leq x_{12} \leq 3 \\ 1 \leq x_{19} \leq 5 \\ x_2, x_5, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{19} - \text{цілі числа} \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $x_{2_{stat}}$ ,  $x_{5_{stat}}$  – статистичні значення відповідних параметрів, що отримано до оптимізації автосервісу;  $R_{кл}$  – клієнтський радіус системи автосервісу.

В [2] отримано залежності незалежних параметрів системи від базисних, тому функції соціально-економічної ефективності автосервісу та витрат клієнтів набувають виду:

$$E_{\phi} = f'(x_2, x_5, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{19}); \quad (3)$$

$$B_{кл} = f''(x_2, x_5, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{19}). \quad (4)$$

Враховуючи зазначене, систему цільових функцій (1) можна записати у наступному вигляді:

$$\begin{cases} f'(x_2, x_5, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{19}) \rightarrow \max; \\ f''(x_2, x_5, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{19}) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (5)$$

Опис функцій  $f_1(X) - f_{16}(X)$ ,  $f'(X)$ ,  $f''(X)$ , параметрів, що необхідні для їх розрахунку, а також їх кількісні значення до та після оптимізації для спеціалізованої системи автосервісу «АНТ-АВТО-СЕРВІС», м. Черкаси, представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні параметри для розрахунку показника ефективності

№	Позначення параметру	Назва параметру	До оптимізації	Після оптимізації
1	2	3	4	5
1	$f_1(X) = N_{п}$	Кількість постів	8	13
2	$f_2(X) = A_3$	Кількість автомобіле-заїздів на 1 пост за рік, автомобіле-заїзд/пост	741	756
3	$f_3(X) = Ц_{аз}$	Середня ціна одного автомобіле-заїзда, грн/автомобіле-заїзд	1450	1538
4	$H_{фзн}$	Єдиний соціальний внесок	0,22	0,22
5	$\Phi_{pj}$	Річний фонд робочого часу $j$ -го працівника за погодинної форми оплати, год.	2000	2000
6	$pc$	Кількість робітників на постах	14	19
7	$\Phi_{зп}$	Річний фонд заробітної плати, грн.	1680000	2660000
8	$f_4(X) = B_{PC}$	Річні витрати на робочу силу, грн.	2049600	3245200
9	$f_5(X) = B_{MP}$	Річні витрати на запасні частини, агрегати та експлуатаційні матеріали, грн.	2578680	4534639

## Продовження таблиці 1

10	$C_H$	Частка накладних витрат від загальної вартості трудових ресурсів	0,2	0,2
11	$f_6(X) = B_{накл}$	Накладні витрати, грн	409920	649040
12	$N'_п$	Кількість постів, для яких розраховуються амортизація обладнання	-	5
13	$f_7(X) = AB$	Амортизаційна вартість обладнання одного поста, грн.	-	40000
14	$f_8(X) = A_{обл}$	Амортизація обладнання, грн.	-	30000
15	$B_F$	Місячна собівартість утримання одного м <sup>2</sup> виробничої площі, грн.	200	254
16	$F$	Площа одного поста, м <sup>2</sup>	30	30
17	$B_{Fpost}$	Загальні витрати на виробничі площі на рік, грн.	576000	1188720
18	$f_9(X) = K_з$	Кількість звернень одного клієнта на автосервіс протягом року	1	0,6
19	$L_{км}$	Пробіг для отримання послуги, км	5	7
20	$f_{10}(X) = Ц_{км}$	Ціна кілометру пробігу, грн/км	10	10,8
21	$f_{11}(X) = T_{ПР}$	Час, втрачений в автомобільних пробках при отриманні послуг, год.	0,16	0,2
22	$f_{12}(X) = T_{ТОР}$	Час виконання ТО та ремонту, год.	2,7	2,5
23	$f_{13}(X) = T_{оч}$	Час очікування виконання обслуговування, год.	0,62	0,25
24	$f_{14}(X) = T_{рек}$	Час, пов'язаний з рекламаціями, год.	0,03	0,01
25	$T_{ін}$	Час, витрачений на вирішення питань додаткових робіт, год.	2	2
26	$tA_s$	Середній час постачання запасних частин категорії А з власного складу, год.	0,15	0,15
27	$tB_s$	Середній час постачання запасних частин категорії В з регіонального складу, год.	6	6
28	$tC_s$	Середній час постачання запасних частин категорії С від виробника, год.	312	168
29	$\alpha$	Частка запасних частин категорії А, що постачаються з власного складу	0,7	0,7
30	$\beta$	Частка запасних частин категорії В, що постачаються з регіонального складу	0,24	0,25
31	$\gamma$	Частка запасних частин категорії С, що постачаються від виробника	0,06	0,05
32	$f_{15}(X) = T_{зч}$	Час, витрачений на пошук та доставку запасних частин, год.	20,27	10,01
33	$f_{16}(X) = Ц_T$	Ціна одиниці часу, грн/год.	119	300
34	$D$	Дохід автосервісу протягом року, грн	8595600	15115464
35	$ЗВ$	Загальні витрати автосервісу протягом року, грн	5614200	9647599
36	$f'(X) = E_{\phi}$	Соціально-економічна ефективність	2981400	5467865
37	$f''(X) = B_{кл}$	Витрати клієнтів, що пов'язані з отриманням послуг, протягом року, грн	3117,23	2739,06

Джерело: розроблено авторами на основі [2] та [6].

За умови значень показників табл. 1 річний приріст соціально-економічної ефективності автосервісу після проведення оптимізаційних заходів склав 2486465 грн.

Аналіз приросту соціально-економічної ефективності підтвердив доцільність здійснення оптимізаційних робіт для спеціалізованої системи на макрорівні.

Постановка математичної задачі оптимізації системи автосервісу надала можливість розробити алгоритм визначення раціональних режимів роботи системи на основі аналізу її соціально-економічної ефективності, який представлено на рис. 1.

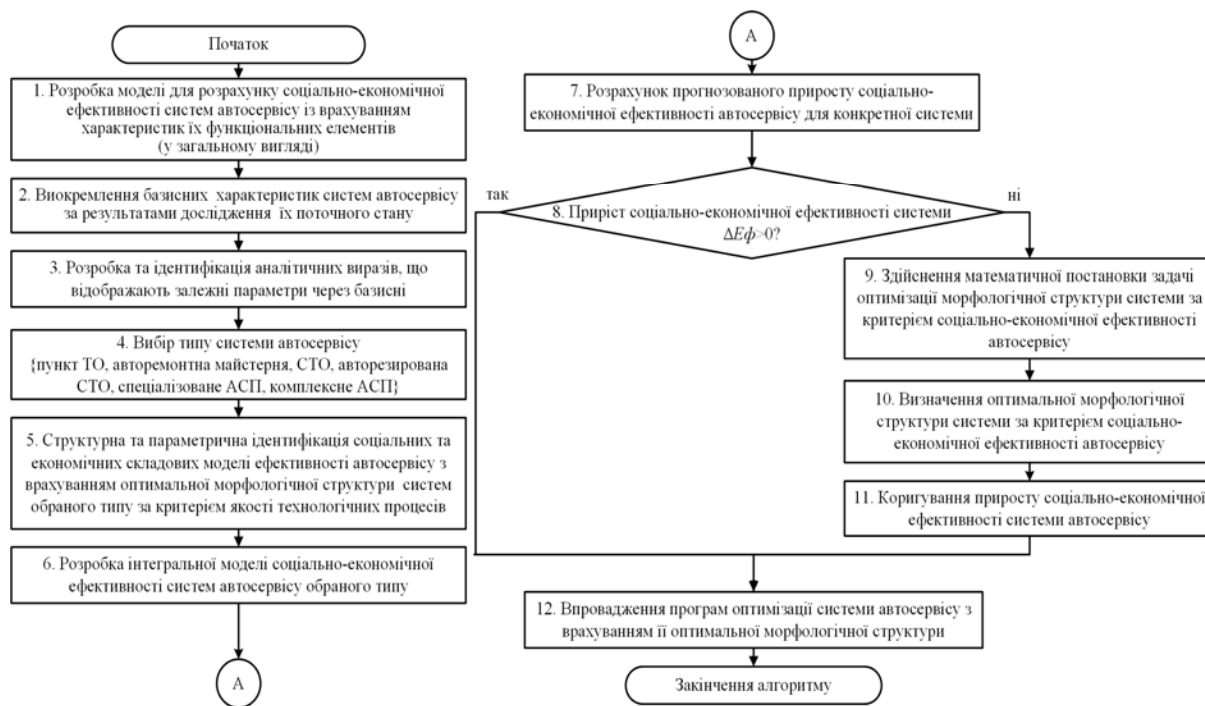


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму визначення оптимальної морфологічної структури системи на основі аналізу соціально-економічної ефективності автосервісу

Джерело: розроблено авторами

Результати апробації розробленого алгоритму на основі запропонованої математичної моделі багатокритеріальної задачі оптимізації системи автосервісу підтвердили працездатність даної описаної методики та рекомендується до використання під час реструктуризації системи та прогнозування її показників.

**Висновки.** Багатокритеріальна модель системи автосервісу, що пропонується для застосування в процесі визначення раціональних режимів роботи системи, враховує дев'ятнадцять характеристик її функціональних елементів. Під час розрахунків прогнозованих значень соціально-економічної ефективності використано значення за попередні періоди та оптимальні значення параметрів системи. Для апробації запропонованої методики було обрано спеціалізоване автосервісне підприємство «АНТ-АВТО-СЕРВІС» м. Черкаси. Результати апробації свідчать про доцільність оптимізації роботи даного підприємства. Прогнозується, що річна ефективність автосервісу зросте на 2 486 465 грн. Результати дослідження може бути застосовувано в процесі прийняття рішень щодо доцільності оптимізації системи автосервісу на макрорівні. Подальші дослідження буде спрямовано на постановку та реалізацію математичних моделей для оптимізації систем автосервісу на мікро- та мета- рівнях.

## Список літератури

1. Розробка функціональної моделі мережі автосервісних підприємств / Тарандушка Л.А., Костян Н.Л., Марков О.Д., Біліченко В.В. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. №1(11). С. 133-139.
2. Tarandushka L. Determination of efficiency of optimization measures in the car service system / L. Tarandushka, N. Kostian, M. Rud, P. Mateichyk, I. Lavryk // *Systemy I srodki transportu. Bezpieczenstwo I materialy eksploatacyjne: monografia: Politechnika Rzeszowska*. Rzeszow. 2020. №20. P. 93-102.
3. Субочев О.І. Підвищення ефективності виробництва автосервісних підприємств на основі пріоритетів транспортного процесу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20. НТУ. К., 2001. 18 с.
4. Марков О.Д., Марков П.О. Критерії та показники ефективності автосервісу. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2013. Вип. 12. С. 110-116.
5. Krokmal N. V., Trusova T. V. On the Problem of Increasing the Efficiency of Car Service Centres in Russia. *Молодой учёный. Технические науки*. 2013. № 5 (52). С. 64-67.
6. Assessing the quality level of technological processes at car service enterprises / Tarandushka L., Mateichyk V., Kostian N., Tarandushka I., Rud M. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2/3 (104). 2020. pp. 58-75. DOI: 15587/1729-4061.2020.200332.
7. Андрусенко С.І., Бугайчук О.С. Моделювання бізнес-процесів підприємства автосервісу : монографія. К. : Кафедра. 2014. 328 с.
8. Андрусенко С.І., Бугайчук О.С. Технології підвищення ефективності виробничо-технічної бази підприємств автомобільного транспорту : навчальний посібник. К. : «Медін-форм» 2017. 212 с.

## References

1. Tarandushka, L.A., Kostian, N.L., Markov, O.D. & Bilichenko, V.V. (2020). Rozrobka funktsionalnoi modeli merezhi avtoservisnykh pidpriemstv [Development of car service enterprises network functional model]. *Journal of Mechanical Engineering and Transport, № 1 (11)*, 133–139 [in Ukrainian].
2. Tarandushka L., Kostian N., Rud M., Mateichyk P., Lavryk I. (2020). Determination of efficiency of optimization measures in the car service system. *Systemy I srodki transportu. Bezpieczenstwo I materialy eksploatacyjne: monografia: Politechnika Rzeszowska*. Rzeszow. №20. P. 93-102 [in English].
3. Subochev O.I. (2001) Pidvyshchennia efektyvnosti vyrobnytstva avtoservisnykh pidpriemstv na osnovi priorityteriv transportnoho protsesu: Avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk [Increasing the production efficiency of car service enterprises based on the priorities of the transport process]: *Abstract of Phd thesis* [in Ukrainian].
4. Markov O.D. (2013). Kryterii ta pokaznyky efektyvnosti avtoservisu [Criteria and indicators of the effectiveness of car service]. *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka - Project management, system analysis and logistics, №. 12*, 110–116 [in Ukrainian].
5. Krokmal N.V., Trusova T.V. (2013). On the Problem of Increasing the Efficiency of Car Service Centres in Russia. *Molodoy uchyonyi. Tehnicheskie nauki. № 5 (52)*, 64-67 [in English].
6. Tarandushka L., Mateichyk V., Kostian N., Tarandushka I., Rud M. (2020) Assessing the quality level of technological processes at car service enterprises. *Eastern-European journal of enterprise technologies 2/3 (104)*, 58-75, doi: 15587/1729-4061.2020.200332.
7. Andrusenko, S.I. & Buhaichuk, O.S. (2014). *Modeliuvannia biznes–protseviv pidpriemstva avtoservisu [Simulation of Business Processes at autoservice enterprises]*. Kyiv: Kafedra [in Ukrainian].
8. Andrusenko, S.I. & Buhaichuk, O.S. (2017). *Tekhnolohii pidvyshchennia efektyvnosti vyrobnycho-tekhnichnoi bazy pidpriemstv avtomobilnoho transportu [Technologies for increasing the efficiency of the production and technical base of road transport enterprises]*. Kyiv: Medin-form [in Ukrainian].

**Lyudmyla Tarandushka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Kostian**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Tarandushka**, Assist.

*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

### **Solution of the Multicriteria Problem of Optimization of the Car Service System on the Example of "ANT-AUTO-SERVICE", Cherkassy**

The paper investigates the problem of determining the rational modes of operation of the car service system at the macro level in the process of solving the multicriteria problem of optimizing the technological

processes of the system to achieve the maximum level of socio-economic efficiency of the car service and minimum losses of customers taking into account the characteristics and limitations of its functional elements.

Mathematical dependences have been developed to calculate the efficiency function of the car service system in general, which takes into account nineteen morphological features of the system and the annual costs of customers who are consumers of the offered car service. In order to solve this problem, a mathematical formulation and implementation of the problem of nonlinear programming, multicriteria model of which takes into account constraints imposed on the seven basic parameters. A method for determining the feasibility of implementing optimization measures has been developed and a block diagram of the algorithm according to its stages has been constructed. Indicators of socio-economic efficiency before and after optimization of technological processes are determined and the criterion of expediency of realization of optimization programs on the example of specialized system of car service "ANT-AUTO-SERVICE", Cherkasy is calculated. During the calculations of the predicted values of socio-economic efficiency, the values for the previous periods were used and the optimal values of the system parameters were calculated.

The results of testing indicate the feasibility of optimizing the work of this enterprise. It is projected that the annual efficiency of the specialized car service system will increase by UAH 2,486,465. The results of the study can be used in the decision-making process on the feasibility of optimizing the car service system at the macro level. Further research will focus on the formulation and implementation of mathematical models for the optimization of car service systems at the micro and meta levels.

**multicriteria optimization problem, car service system, mathematical model, socio-economic efficiency**

*Одержано (Received) 14.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 343.148.63

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).168-178](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).168-178)

**О.Ю. Лук'янченко**, доц., канд. техн. наук

*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна*

*e-mail: 111188@ukr.net*

**С.Ю. Федьорко, В.В. Халявка**

*Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України,*

*м. Черкаси, Україна*

*e-mail: 24\_kdtz@ukr.net*

## Аналіз методів дослідження ідентифікаційних номерів транспортних засобів для проведення судової експертизи

У статті висвітлено актуальні проблеми проведення експертних досліджень під час розслідування злочинів, пов'язаних із знищенням, підробленням або заміною номерних позначень транспортних засобів. На підставі відповідних діючих нормативних документів та з огляду сучасних наукових праць проведено аналіз практичного застосування методів дослідження ідентифікаційних номерів агрегатів транспортних засобів під час проведення судової експертизи комплексного дослідження транспортних засобів. Аналіз показує, що більшість методів дослідження ідентифікаційних позначень на сьогоднішній день залишаються актуальними і дозволяють здійснити відповідні процедури щодо сукупності різних особливостей об'єктів дослідження. Метою статті є аналіз застосування, виявлення позитивних сторін застосовуваних методів дослідження ідентифікаційних номерів автотранспортних засобів та їх агрегатів та можливих напрямків удосконалення відповідних процедур під час проведення судової експертизи комплексного дослідження транспортних засобів.

© О.Ю. Лук'янченко, С.Ю. Федьорко, В.В. Халявка, 2021



З використанням системного підходу здійснено декомпозицію існуючих методів дослідження ідентифікаційних номерів автотранспортних засобів та їх агрегатів. Продемонстровано, що існуючі методи дослідження ознак знищення, підроблення або заміни номерних позначень транспортних засобів, їх вузлів і агрегатів дають змогу здійснити ретельний аналіз сукупності різних особливостей об'єктів дослідження (магнітних, оптичних, люмінесцентних, фізичних, хімічних тощо). На підставі фізичних властивостей металів і особливостей їх взаємодії з різними хімічними речовинами викладені механізм і переваги використання методу електрохімічного травлення сплавів на основі заліза при проведенні досліджень для ідентифікації маркувань, виявлення рельєфних знаків і прихованих зварних швів. В результаті проведених досліджень було встановлено ефективність використання того чи іншого методу, що дозволяє з достатньою ймовірністю встановити факт втручання або підроблення первинного номера. Крім того, проведений аналіз дає змогу надати рекомендації щодо вдосконалення існуючих та створення нових методів дослідження ідентифікаційних номерів транспортних засобів.

**експертиза, методи дослідження, ідентифікаційний номер, транспортний засіб, судовий експерт**

**Постановка проблеми.** Поява нових способів і технічних засобів, які дозволяють наносити ідентифікаційні номери на поверхні металу, пластику тощо, потребують при їх дослідженні застосування новітніх та удосконалених методів з метою виявлення фальсифікованих позначень. Також впровадження новітніх методів ідентифікації транспортних засобів та поява нових технологій та технічних засобів дає можливість розширювати напрямок судової експертизи комплексного дослідження транспортних засобів на більш високому рівні. На сьогоднішній день експертами за даним напрямком досліджуються різноманітні об'єкти як з традиційними ідентифікаційними номерами, нанесеними на металі чи на полімерних носіях, так і більш новими – електронними носіями інформації [1]. Всі транспортні засоби індивідуальні та є джерелом різноманітної інформації, тому при дослідженні ідентифікаційних маркувань вузлів і агрегатів транспортного засобу необхідно всебічне вивчення всієї сукупності притаманних конкретному автомобілю ознак. Тільки в цьому випадку може бути отриманий достовірний і обґрунтований результат.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню проблем протидії знищенню, підробці або заміні номерів вузлів та агрегатів транспортного засобу присвячено низку дисертацій, монографій, наукових статей, у яких розкрито різні аспекти цієї тематики. Серед авторів зазначених праць такі науковці, як: Ю.С. Агаліді, Ю.В. Баулін, В.В. Бондаренко, О.М. Брисковська, В.В. Віскунов, А.А. Кашканов, М. Й. Коржанський, В.А. Мисливий, С.Є. Петров, О.Л. Христов [2 – 12] та ін.

Огляд робіт зазначених авторів показує, що більшість методів дослідження ідентифікаційних позначень на сьогоднішній день залишаються актуальними і дозволяють здійснити відповідні процедури щодо сукупності різних особливостей об'єктів дослідження.

Однак, заходи, які протягом останніх років правоохоронні органи України вживали задля забезпечення протидії незаконному заволодінню автотранспортом із подальшою його легалізацією, нині залишаються недостатньо ефективними. І це, в деякій мірі, пов'язано з тим, що на теперішній момент не є достатнім аналіз застосовуваних методів проведення відповідних експертиз, та можливостей їх подальшого розвитку і адаптації до сучасних технологій здійснення підроблень.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз застосування, виявлення позитивних сторін застосовуваних методів дослідження ідентифікаційних номерів автотранспортних засобів та їх агрегатів та можливих напрямків удосконалення відповідних процедур під час проведення судової експертизи комплексного дослідження транспортних засобів.

**Виклад основного матеріалу.** Кримінальна зміна ідентифікаційних номерів транспортних засобів, як, скажімо, і грошових купюр, має різний рівень підробки – від елементарної зміни окремих позначок кустарним способом до зміни максимальної

кількості носіїв ідентифікаційної інформації на устаткуванні виробника, зміни інформації в електронних блоках автомобіля, підробки супровідних документів тощо. Все залежить від поставленої мети, відведеного часу та фінансових ресурсів. Основними завданнями експерта-криміналіста під час проведення судової експертизи є виявлення ознак підробки ідентифікаційних номерів автомобіля та, за можливості, встановлення первинних (нанесених виробником) номерів [5].

Методи, що застосовуються в криміналістичній експертизі, засновані на використанні різних властивостей досліджуваних об'єктів (магнітних, оптичних, люмінесцентних, хімічних тощо) [13]. Декомпозиція існуючих методів дослідження ідентифікаційних номерів автотранспортних засобів та їх агрегатів представлена на рисунку 1. При цьому, загальним правилом є те, що першими застосовуються методи, які не змінюють виду та властивостей об'єкта дослідження (неруйнівні методи). А тільки потім, якщо у результаті їх застосування не досягнуто мети, – методи, використання яких може призвести до таких змін.

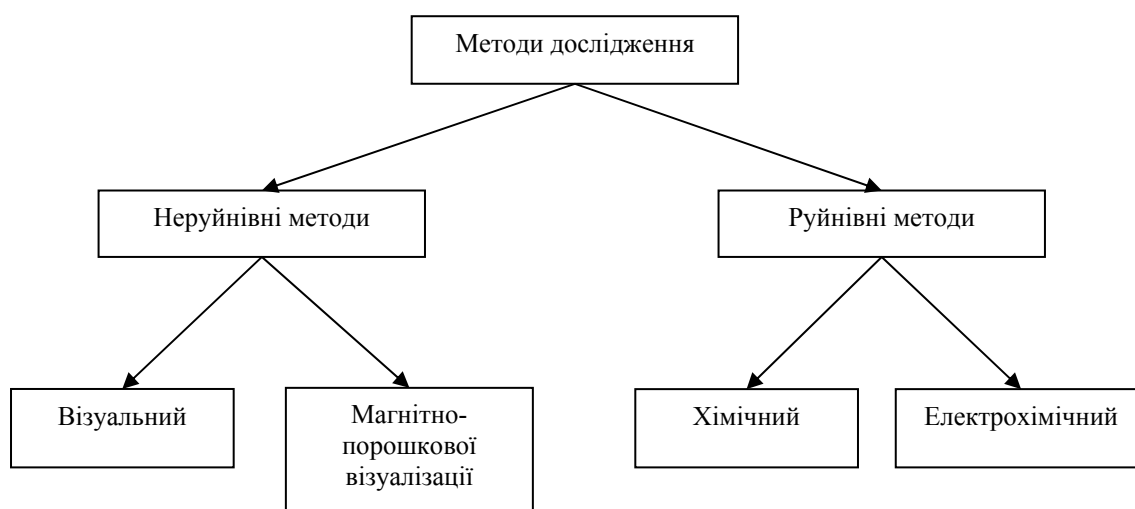


Рисунок 1 – Методи дослідження ідентифікаційних номерів автотранспортних засобів та їх агрегатів  
Джерело: розроблено авторами

Перед застосуванням будь-якого методу, а також для ілюстрації отриманих при його використанні результатів, фіксується вид об'єкта чи окремих його елементів фотографічним чи іншим способом (наприклад, відкатуванням на липку стрічку). За відсутності (знищенні, видаленні) на автомобілі прихованих носіїв ідентифікаційної інформації чи відсутності номерів на інших агрегатах єдиним шансом встановлення первинного номера є дослідження поля його нумерації. Якщо номерний майданчик з ідентифікаційним номером фізично не видалявся, то в експерта є можливість встановити первинний номер. З метою виявлення первинного змісту рельєфних маркувальних позначень на металевих поверхнях першочергово застосовують візуальні методи дослідження (органолептичний, оптичний), магнітно-порошковий. В подальшому, за потреби, – хімічний або електрохімічний метод. Послідовність застосування перелічених методів, а також їх поєднання між собою визначає судовий експерт [4].

Візуальні методи дослідження (органолептичний, оптичний) не змінюють властивостей об'єктів дослідження та передують застосуванню руйнівних методів. Під час застосування візуальних методів дослідження використовують різні засоби та способи освітлення (кишенькові ліхтарі та потужні випромінювачі світла з оптимальним

підбором кута падіння світла та його потужності), оптичні прилади (лупи різної кратності збільшення), дзеркала (плоскі і вигнуті для огляду малодоступних місць чи тильного боку поля нумерації) та вивчають ділянки нанесення рельєфних маркувальних позначень на виробах, а саме на предмет:

- наявності чи відсутності покриття (фарба, ґрунт, шпаклівка) на поверхні виробів;
- відповідності місця розміщення рельєфних маркувальних позначень штатному (із використанням засобів вимірювальної техніки) ;
- ступеню видимості рельєфних маркувальних позначень;
- способу нанесення та відповідності шрифту рельєфних маркувальних позначень;
- наявності чи відсутності ознак, які б свідчили про внесення змін в первинний зміст рельєфних маркувальних позначень на виробах чи їх знищення, заміни ідентифікаційного номера в цілому (рисунки 2, 3).



Рисунок 2 – Знищений VIN-номер шляхом видалення абразивом верхнього шару металу

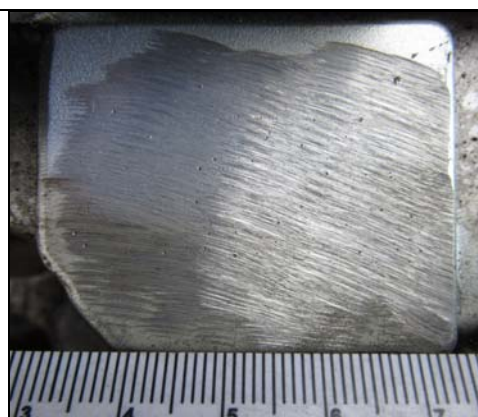


Рисунок 3 – Номерний майданчик двигуна мотоцикла із знищеним номером двигуна

*Джерело: розроблено авторами*

*Джерело: розроблено авторами*

Здебільшого візуальний метод дослідження дає змогу встановити місце розміщення рельєфних маркувальних позначень, ступінь їх видимості, спосіб нанесення, наявність чи відсутність ознак, які б свідчили про внесення змін в первинний їх зміст, а також визначитись з подальшим ходом проведення дослідження та необхідністю застосування інших методів дослідження. Іноді візуальним методом навіть вдається встановити первинний номер. Перевагами даного методу є його простота, оперативність застосування, відсутність потреби в складних засобах. Недоліком – низька ймовірність встановлення первинного номера.

Слід зазначити, що у разі встановлення ознак внесення змін у первинний зміст рельєфних маркувальних позначень на виробі шляхом видалення фрагменту виробу (вирізання) у місці розміщення первинних рельєфних маркувальних позначень, з наступним додаванням (зварюванням) в це місце фрагменту металу з нанесеним рельєфним маркувальним позначенням іншого змісту, в якому ознак внесення змін в його зміст не виявлено, то подальше дослідження на предмет встановлення внесення змін в первинний зміст рельєфних маркувальних позначень на виробі не доцільне. Достатньо зазначити ознаки різання (розрізу) металу та зварювання і на підставі цього сформулювати відповідний висновок.

Метод магнітної суспензії (ще називають магнітно-порошковим) також відноситься до неруйнівних методів досліджень і заснований на властивостях магнітного поля. Він призначений для дослідження місць, де були виявлені сліди яких-

небудь механічних впливів (деталі, що досліджуються, повинні бути виготовлені з феромагнітних сплавів). Спочатку досліджуваний об'єкт (поле нумерації) поміщають в магнітне поле потужного постійного магніту (у формі підкови) або електромагнітне поле (намагнічування). Потім на поверхню досліджуваного об'єкта м'яким пензлем наноситься суспензія магнітного порошку. Маленькі частки магнітного порошку, рухаючись у магнітному полі, збираються в неоднорідних місцях магнітного поля (у місці механічного впливу при нанесенні номерів тощо) та чітко позначають контури ушкодження.

Ефективність дослідження із застосуванням цього методу залежить від розміру часток та їх концентрації, тривалість – декілька хвилин.

Метод магнітної суспензії дозволяє без видалення лакофарбового покриття виявити сліди зварювальних швів, шліфування, вигинання, штампування, відбитки, які залишають опори нумератора. Безсумнівною перевагою зазначеного методу є те, що в разі потреби чи обмеженого доступу до лицевого боку номерного майданчика магніт можна ставити та переміщувати і по зворотному боці номерного майданчика – результат буде незмінним.

Існує досить велика ймовірність, що застосування методу магнітної суспензії навіть дозволяє встановити контури оригінальних символів без видалення лакофарбового покриття. Оцінюючи отримані результати, варто звернути увагу на те, що під час набивання номера на заводі за допомогою нумератора деформуються не тільки ті місця, на яких нанесений номер, але й розташовані поруч. Тому іноді стає чіткою деформація, розташована на відстані 1-2 мм від закінчення контуру (рисунок 4).

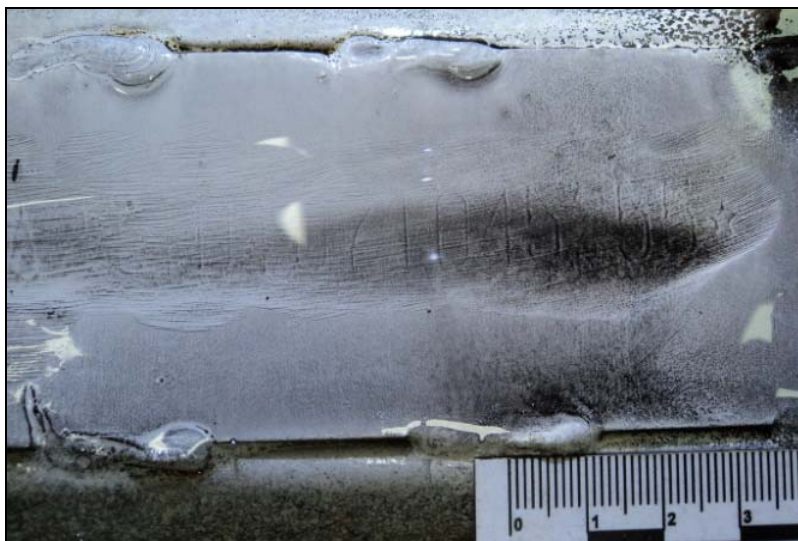


Рисунок 4 – Встановлений методом магнітної суспензії знищений VIN-номер  
*Джерело: розроблено авторами*

Перевагами даного методу є його відносна простота, відсутність потреби у видаленні лакофарбового покриття (незмінність властивостей об'єкта дослідження), низька вартість дослідження, можливість використання в польових умовах. Недоліки – застосування тільки для феромагнітних сплавів та високі вимоги до стану поверхонь перед проведенням дослідження.

Якщо руйнівні методи досліджень не дали очікуваних результатів, застосовуються руйнівні методи – хімічне чи електрохімічне травлення. Метод хімічного травлення є найпоширенішим для випадку відновлення (встановлення)

знищених (змінених) знаків номера. За допомогою цього методу відновлюються первинні знаки, які були вибиті на заводі за допомогою нумераторів (клейм) або нанесені лазерним гравіюванням.

Метод хімічного (електрохімічного) травлення заснований на тому, що при нанесенні знаків на металевих виробах деформуються кристалічні ґрати металу, що супроводжується змінами фізико-механічних властивостей матеріалу в місцях деформацій: розчинності, залишкового намагнічування (для феромагнітних сплавів), щільності, електропровідності та інших властивостей [14]. Ці зміни стосуються не тільки контурів самих вибитих знаків, але і шарів металу, які розташовані поруч. Тому після знищення візуально видимих контурів знаків, у більш глибоко розташованих шарах залишаються «приховані» зображення символів, які можна зробити чіткішими за допомогою застосування хімічного або електрохімічного методу травлення, суть якого ґрунтується на різній швидкості розчинення деформованих і недеформованих ділянок металу. У більшості випадків при підробці номерів видаляється тільки поверхневий шар металу (на глибину вибитих символів). У таких випадках первинні знаки відновлюються без особливих зусиль. Набагато складніше відновити знаки, коли видаляється досить значний шар металу, внаслідок чого проявляються тільки контури окремих штрихів, які не показують цілісність конкретного символу. Однак у цьому разі можна встановити ймовірні символи, які пізніше за допомогою заводської інформації будуть повністю визначені.

Перед застосуванням хімічного або електрохімічного методу необхідно сфотографувати або зробити копію (зліпок) поля нумерації, щоб були наочно видимі сліди не заводської обробки (інструментів) металу (шліфування, деформації металу внаслідок зміни тощо) (рисунок 2). Пізніше, після того як виявляться контури первинних символів, робиться ще одна фотографія чи копія поверхні (рисунок 5).

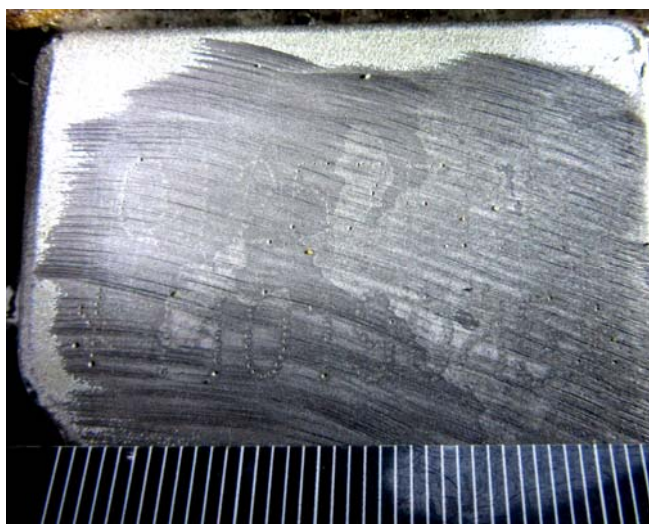


Рисунок 5 – Первинний ідентифікаційний номер двигуна після застосування методу хімічного травлення металу

*Джерело: розроблено авторами*

Перед застосуванням методу хімічного (електрохімічного) травлення визначають вид металу (сталь, чавун, сплави алюмінію), на якому нанесено знак, після чого обирають відповідний хімічний реагент (електроліт) [15]. Як показує практика найкращого універсального електроліту не існує. Для кожного конкретного об'єкта

дослідження потрібно експериментально підбирати електроліт, оскільки склад усіх сплавів, як то сталі, чавуну чи алюмінію різні.

Якщо сліди знищення номера не чітко виражені, немає глибоких металевих деформацій, поле нумерації очищається від бруду, залишків фарби та знежирюється органічними розчинниками. Шорсткуваті сліди обробки металу (насічки, шорсткуваті траси шліфування) шліфуються і поліруються (при цьому необхідно намагатися видалити мінімальний шар металу). Шліфування здійснюється *перпендикулярно* до наявних трас, щоб не ушкодити більш глибокі шари металу. Після цього поверхня знежирюється і проводиться хімічне (електрохімічне) травлення металу. При використанні цього методу проявляються не тільки контури колишніх знаків, але й інші ознаки знищення (шліфування, набивання, сліди термічної обробки, зварювальні шви), які неможливо виявити за допомогою візуального і оптичного методів.

Якщо досліджувана поверхня горизонтальна, поле нумерації обмежується пластиліновими стінками, висота яких 2-5 мм. У підготовлену таким способом ванночку наливається реагент (електроліт), який потрібно кожні 5-25 хвилин замінювати новим і постійно стежити за процесом реакції та в разі появи будь-яких змін проводити фотофіксацію. Якщо поверхня вертикальна або неможливо зробити ванночку для електроліту, то досліджувану поверхню варто зволожувати змоченим в електроліті шматочком марлі. Рухи тертя виконуються в одному напрямку - вздовж довжини рядка із символами. При цьому потрібно постійно стежити за виникненням змін на поверхні металу (поява знаків або контурів слідів інструментів). Кожні 15-20 хв. тампон необхідно міняти на новий. Хімічне травлення триває до появи контурів знаків (в окремих місцях контури можуть виявитися не одночасно, тому використовують збільшувальні прилади та відповідне освітлення і постійно стежать за контурами, які з'являються, записуючи при цьому значення можливих символів), оскільки з часом поверхня металу може стати зовсім рівною (зникають мікротраси, що з'явилися під час полірування). Варто зазначити, що поява контурів знаків залежить від металу та методу знищення знаків, вони можуть бути рельєфними або плоскими (у цьому випадку контури можна помітити за допомогою різного освітлення, тому що метали різної щільності відбивають світло неоднаково).

Перевагами даного методу є його відносна простота, низька вартість, можливість використання в польових умовах. Однак застосування цього методу призводить до незворотних руйнівних процесів об'єкту дослідження, потребує затрат часу.

Практика показує, що в деяких випадках, коли хімічне травлення не дає результатів, можливе використання методу електрохімічного травлення, за допомогою якого все ж таки вдається виявити первинні позначення.

Метод електрохімічного травлення як і метод хімічного травлення, ґрунтується на явищі різної швидкості розчинення деформованого і недеформованого металу. Однак під час застосування електрохімічного методу розчинення металу відбувається під впливом електричного струму, і, відповідно, швидкість розчинення більша, ніж під час застосування методу хімічного травлення, що потребує більш ретельного контролю процесу.

Сутність методу полягає в тому, що до заздалегідь підготовленої поверхні підключається полюс (катод) джерела постійного електричного струму. При цьому швидкість травлення можна регулювати за допомогою звичайного реостату відповідної потужності або шляхом зміни концентрації електроліту. Негативний полюс джерела (катод) обгортається ватним або марлевым тампоном, рясно змоченим в електроліті. Цим тампоном полірується досліджувана поверхня. Полірування здійснюється по всій площі досліджуваної поверхні, щоб на ній не утворювалися поглиблення. Необхідно

обов'язково контролювати, щоб тампон не висихав і не покривався металевою плівкою, і відповідно частіше змочувати або міняти його. Також слід підібрати оптимальні умови освітлення номерного майданчика. Під час процесу відновлення номера іноді доводиться регулювати силу струму. Якщо тампон швидко висихає або спостерігається іскріння, необхідно зменшувати силу струму, а якщо не спостерігається виділення газів в електроліті - силу струму необхідно збільшувати. При проявленні первинних позначок, їх необхідно сфотографувати (рис. 6).



Рисунок 6 – Результат застосування методу електрохімічного травлення

*Джерело: розроблено авторами*

Таким чином, метод електрохімічного травлення є доволі ефективним методом дослідження ідентифікаційних номерів транспортних засобів із метою встановлення їх первинного номерного позначення, причому незалежно від способу нанесення його заводом-виробником. Несумнівними перевагами зазначеного методу є менша потреба затрат часу в порівнянні з методом хімічного травлення, до того ж він дозволяє досліджувати номери на вертикальних і похилих поверхнях. Однак, як і у випадку застосування методу хімічного травлення металу, застосування цього методу призводить до незворотних руйнівних процесів поверхні об'єкту дослідження. Крім того, потреба у відповідному джерелі електричного живлення іноді обмежує можливість застосування зазначеного методу.

Таким чином, в рамках експертного аналізу застосування методів дослідження ідентифікаційних номерів транспортних засобів встановлено, що їх використання обмежено колом вирішуваних завдань і необхідним обсягом інформації, яку потрібно отримати в результаті автотехнічної експертизи.

Існуючи методи дослідження ознак знищення, підроблення або заміни номерних позначень транспортних засобів, їх вузлів і агрегатів дають змогу здійснити ретельний аналіз сукупності різних особливостей об'єктів дослідження (магнітних, оптичних, люмінесцентних, фізичних, хімічних тощо).

Практику розслідування підробки або знищення ідентифікаційного номера транспортного засобу ускладнено багатьма факторами, у тому числі різноманіттям маркувань, що наносяться на транспортні засоби; відсутністю узагальнених, систематизованих відомостей про місця й способи нанесення маркувальних даних та ознаки їх підробки; відсутністю спеціальних рекомендацій із виявлення транспортних засобів зі зміненими ідентифікаційними позначеннями; відсутністю цілісної теоретично розробленої та практично значущою методики розслідування цих злочинів стосовно початкового етапу.

Зазначені фактори впливають на якість і ефективність процедури дослідження ідентифікаційних номерів транспортних засобів, тому існуючи методики потребують вдосконалення, зокрема в напрямку застосування комплексу методів для вирішення поставлених завдань перед автотехнічною експертизою, зокрема при отриманні даних про первинний ідентифікаційний номер та необхідності візуалізувати інформацію.

Розуміння процесів, які відбуваються при використанні спеціальних методів для виявлення фактів зміни рельєфних знаків, має практичне значення та дозволяє успішно виявляти зміну маркувальних даних на автотранспорті.

**Висновки.** Розглянуті в цій статті питання дозволили встановити ефективність методів та дати рекомендації щодо їх застосування. В результаті проведених досліджень було встановлено ефективність використання того чи іншого методу, що дозволяє з достатньою ймовірністю встановити факт втручання чи маркування первинного номера. Застосування відповідного методу під час комплексного експортного дослідження факту знищення, подробиці або заміни номерів вузлів та агрегатів транспортного засобу надає вагомому інформацію про обставини, пов'язані з учиненням злочину, які сприяють розслідуванню. Крім того, проведений аналіз дає змогу надати рекомендації щодо вдосконалення існуючих та створення нових методів дослідження ідентифікаційних номерів транспортних засобів

## Список літератури

1. Про судову експертизу : Закон України : від 25.02.1994 № 187-IV / Сайт Верховної Ради України. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/> (дата звернення: 01.02.2021)
2. Агаліді Ю. С. Магнітооптична візуалізація магнітограм рельєфних зображень і структурних неоднорідностей поверхневого шару феромагнітних виробів : дис... канд. наук: 05.11.13. Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, Київ, 2006.
3. Баулін Ю.В. Звільнення від кримінальної відповідальності: монографія. К.: Атіка, 2004. 296 с.
4. Бондаренко В. В. Методи дослідження ознак знищення, подробиці або номерів вузлів та агрегатів транспортного засобу . *Науковий вісник Національної академії внутрішніх справ України*. 2016. № 1 (98). С. 283–297.
5. Брисковська О. М., Осауленко О. А. Використання досягнень науки та техніки в експертній діяльності. *Криміналістичний вісник*. 2013. № 1 (19). С. 80–87.
6. Віскунов В. В. Кримінально-правовий аналіз форм об'єктивної сторони складу злочину, передбаченого ст. 290 Кримінального кодексу України. *Вісник Луганського державного університету внутрішніх справ імені Е. О. Дідоренка*. 2013. Вип. 1. С. 102-112.
7. Віскунов В. В. Кримінальна відповідальність за знищення, подробиці або заміну номерів вузлів та агрегатів транспортного засобу: дис. ... канд. юрид. наук: 12.00.08. Київ, 2012. 221 с.
8. Кашканов А. А. Концептуальні засади підвищення ефективності автотехнічної експертизи ДТП . *Вісник ІТТУ «ХПІ»*. Серія: *Автомобіле- та тракторобудування*. 2015. № 8 (1117). С. 89-95.
9. Коржанський М. Й. Кваліфікація автотранспортних злочинів . Київ : Юринком, 1996. 80 с.
10. Мисливий, В. А. Злочини проти безпеки дорожнього руху та експлуатації транспорту : монографія. Д. : Юрид. акад. М-ва внутр. справ, 2004. 380 с.
11. Петров С. Є. Розслідування незаконного заволодіння автотранспортними засобами: дис. ... канд. юрид. наук: 12.00.09. Київ, 2010. 242 с.
12. Христов О.Л. Протидія незаконним заволодінням транспортними засобами: криміналістичний аспект: монографія. – Дніпро: Дніпроп. держ. ун-т внутр. справ, 2017. 148 с.
13. Комплексне дослідження транспортних засобів та документів, що їх супроводжують: коментар до стандартної операційної процедури SOP.T.19/17-5.4-01. Київ : ДНДЕКЦ МВС України, 2009. 56 с.
14. Щудро А. Є. Теоретичні та практичні аспекти травлення сплавів на основі заліза для виявлення рельєфних знаків і прихованих зварних швів . *Актуальні питання судової експертизи та криміналістики*: зб. матеріалів міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 95-річчю створення Харків. НДІ суд. експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса (Харків, 10–11 жовт. 2018 р.). Харків : Право, 2018. – С 154-155.
15. Науменко С.М. Окремі аспекти встановлення знищених ідентифікаційних номерів на транспортних засобах . *Теорія і практика судової експертизи і криміналістики*: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з нагоди 85-річчя доктора юридичних наук, професора Ніни Іванівни Клименко (м. Київ, 27 лютого 2018 року). Київ-Маріуполь: 2018. С. 229-230.

## References

1. Pro sudovu ekspertyzu : Zakon Ukrainy : vid 25.02.1994 № 187-IV . Sait Ver-khovnoi Rady Ukrainy. [zakon.rada.gov.ua](https://zakon.rada.gov.ua/). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/>.



2. Ahalidi Yu. S. (2006). Mahnitooptychna vizualizatsiia mahnitohram reliefnykh zobrazhen i strukturnykh neodno-ridnosti poverkhnevoho sharu feromahnitnykh vyrobiv [Magneto-optical visualization of magnetograms of relief images and structural inhomogeneities of the surface layer of ferromagnetic products]. *Candidate's thesis*. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy „Kyivskiy politekhnichnyi instytut”, Kyiv
3. Baulin, Yu.V. (2004). *Zvinnennia vid kryminalnoi vidpovidalnosti [Exemption from criminal liability]*. Kyiv: Atika
4. Bondarenko, V.V. (2016). Metody doslidzhennia oznak znyshchennia, pidrobky abo nomeriv vuzliv ta ahrehativ transportnoho zasobu [Methods of research of signs of destruction, forgery or numbers of knots and units of the vehicle]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoi akademii vnutrishnikh sprav Ukrainy – Scientific Bulletin of the National Academy of Internal Affairs of Ukraine. 1 (98)*. 283–297.
5. Bryskovska, O. M. & Osaulenko, O. A. (2013). Vykorystannia dosiahnen nauky ta tekhniky v ekspertnii diialnosti [Use of achievements of science and technology in expert activity]. *Kryminalistychnyi visnyk – Forensic Bulletin.. 1 (19)*. 80–87.
6. Viskunov, V.V. (2013). Kryminalno-pravovyi analiz form obiektyvnoi storony skladu zlochyntu, peredbacheno-ho st. 290 Kryminalnoho kodeksu Ukrainy [Criminal-legal analysis of the forms of the objective side of the crime under Art. 290 of the Criminal code of Ukraine]. *Visnyk Luhanskoho derzhavnogo universytetu vnutrishnikh sprav imeni E. O. Didorenka – Bulletin of Luhansk State University of Internal Affairs named after EA Didorenko. Vol. 1*. 102-112.
7. Viskunov, V.V. (2012). Kryminalna vidpovidalnist za znyshchennia, pidrobku abo zaminu nomeriv vuzliv ta ah-rehativ transportnoho zasobu [Criminal liability for destruction, forgery or replacement of numbers of units and units of the vehicle]. *Candidate's thesis*. Kyiv
8. Kashkanov, A.A. (2015). Kontseptualni zasady pidvyshchennia efektyvnosti avtotekhnichnoi ekspertyzy DTP [Conceptual bases of increase of efficiency of autotechnical examination of road accident]. *Visnyk IITU «KhPI». Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannia – Bulletin of IITU "KhPI". Series: Car and tractor construction. 8 (1117)*. 89-95.
9. Korzhanskyi, M.Y. (1996). *Kvalifikatsiia avtotransportnykh zlochyntiv [Qualification of motor vehicle crimes]*. Kyiv : Yuryнком
10. Myslyvyi, V. A. (2004). *Zlochynty proty bezpeky dorozhnoho rukhu ta ekspluatatsii transportu [Crimes against road safety and transport operation]*. D. : Yuryd. akad. M-va vnutr. sprav.
11. Petrov, S. Ye. (2010). Rozsliduvannia nezakonnoho zavolodinnia avtotransportnykh zasobamy [Investigation of illegal seizure of vehicles]. *Candidate's theses*. Kyiv
12. Khrystov, O.L. (2017). *Protydiia nezakonnym zavolodinniam transportnykh zasobamy: kryminalistychnyi as-pekt [Counteraction to illegal seizure of vehicles: forensic aspect]*. Dnipro: Dniprop. derzh. un-t vnutr. sprav
13. Kompleksne doslidzhennia transportnykh zasobiv ta dokumentiv, shcho yikh suprovodzhuiut: komentar do standartnoi operatsiinoi protsedury SOP.T.19/17-5.4-01 [Comprehensive study of vehicles and accompanying documents: commentary to the standard operating procedure SOP.T.19 / 17-5.4-01]. (2009). Kyiv : DNDEKTs MVS Ukrainy
14. Shchudro, A. Ye. (2018). Teoretychni ta praktychni aspekty travlennia splaviv na osnovi zaliza dlia vyavlennia rel-yefnykh znakov i prykhovanykh zvarnykh shviv. Aktualni pytannia sudovoi ekspertyzy ta kryminalistyky: *zb. materialiv mizhnar. nauk.-prakt. konf., prysviach. 95-richchiu stvorennia Kharkiv. NDI sud. ekspertyz im. Zasl. prof. M. S. Bokariusa (Kharkiv, 10–11 zhovt. 2018 r.)*. Kharkiv : Pravo, p 154-155.
15. Naumenko, S.M. (2018). Okremi aspekty vstanovlennia znyshchennykh identyfikatsiinykh nomeriv na transportnykh zasobakh .Teoriia i praktyka sudovoi ekspertyzy i kryminalistyky: *materialy Vseukrain'skoi nauko-vo-praktychnoi konferentsii z nahody 85-richchia doktora yurydychnykh nauk, profesora Niny Ivanivny Klymenko (m. Kyiv, 27 liutoho 2018 roku)*. Kyiv-Mariupol: p. 229-230.

**Olexandr Lukianchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Cherkasy state technological university, Cherkasy, Ukraine*

**Sergiy Fedorko, Viktor Halyavka**  
*Cherkasy scientific research forensic centre of MMIA of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

### **Analysis of Research Methods of Vehicle Identification Numbers for Forensic Examination**

The article highlights the current problems of conducting expert research in the investigation of crimes related to the destruction, forgery or replacement of vehicle number plates. On the basis of the corresponding operating normative documents and taking into account modern scientific works the analysis of practical application of methods of research of identification numbers of units of vehicles during carrying out forensic examination of complex research of vehicles is carried out. The analysis shows that most methods of research of

identification marks today remain relevant and allow to carry out the corresponding procedures concerning set of various features of objects of research. The purpose of the article is to analyze the application, identify the positive aspects of the applied methods of research of vehicle identification numbers and their units and possible areas for improvement of relevant procedures during the forensic examination of a comprehensive study of vehicles.

Using a systematic approach, the decomposition of existing methods of research of vehicle identification numbers and their units was carried out. It is demonstrated that the existing methods of studying the signs of destruction, forgery or replacement of license plates of vehicles, their components and units allow a thorough analysis of all the features of the objects of study (magnetic, optical, fluorescent, physical, chemical, etc.). On the basis of the physical properties of metals and the features of their interaction with various chemical substances, the message sets forth the mechanism and advantages of using the method of electrochemical etching of iron-based alloys during research to identify markings, detection relief signs and hidden welds.

As a result of the conducted researches the efficiency of using this or that method was established, which allows to establish with sufficient probability the fact of intervention or forgery of the primary number. In addition, the analysis makes it possible to provide recommendations for improving existing and creating new methods for the study of vehicle identification numbers.

**examination, research methods, identification number, vehicle, forensic expert**

*Одержано (Received) 17.03.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 29.03.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 656

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).178-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).178-189)

**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **О.М. Лівіцький**, здобувач, **А.С. Чернай**, здобувач, **Д.В. Голуб**, доц., канд. техн. наук, **А.О. Головатий**, асп.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: AulinVV@gmail.com*

## Теоретичне обґрунтування управління функціонуванням технічними та транспортними системами на основі методів системної теорії інформації

В роботі з теоретичної точки зору обґрунтовано управління функціонуванням транспортних та експлуатацією технічних систем на основі методу системної теорії інформації. Пропонується вектор та матриця стану на основі діагностичної інформації та чутливості впливу діагностичних параметрів на стан транспортних або технічних систем. Властивості сенситивності (чутливості) відображені на основі класичних та узагальнених інформаційних формул А. Харкевича, К. Шеннона, Р. Хартлі. Використані коефіцієнти квантовості (емерджентності) інформації за виразами Шеннона-Харкевича і Хартлі, враховано рівень складності змінених станів системи управління.

Розроблено універсальний чисельний метод і інструментарій до нього, що дозволяє проводити інформаційні розрахунки на основі діагностичних даних стану досліджуваних об'єктів. Розглянуто рівень системної організації транспортних і технічних систем й управління ними як активними об'єктами.

Визначено, що семантична інформаційна модель дозволяє при малих вибірках та співставленості часткових критеріїв добре обґрунтувати інтерпретації розпізнавання станів об'єкта, розроблених по векторам їх класів.

Виявлено поведінку систем, коли вони повністю детерміновані і повністю випадкові, що важливо при прогнозуванні їх стану.

**транспортна система, технічна система, сенситивність, теорія інформації, діагностична інформація**

© В.В. Аулін, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко, О.М. Лівіцький, А.С. Чернай, Д.В. Голуб, А.О. Головатий, 2021

**Постановка проблеми.** Актуальність удосконалення системи управління станами і рівнем надійності в транспортних і технічних системах обумовлена передусім необхідністю якісної, достовірної та своєчасної інформації про стан і надійність. В основу досліджень доцільно покласти методи теорії інформації. На увагу заслуговують методи системної теорії інформації з урахуванням множини діагностичних параметрів (векторів і матриць діагностичних параметрів стану), їх сенситивність при визначеній еволюції станів, щільності інформації та її емерджентності. Показано, що до теорії інформації про стан транспортних і технічних систем слід долучити сукупність узагальнених інформаційних формул К. Шеннона, А. Харкевича і Р. Хартлі та їх класичні варіанти.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оскільки, проблема управління транспортними та технічними системами тісно пов'язана із сучасною проблемою обробки великої за обсягом бази даних (інформації про стан) [1-3], то зростання складності управлінських ситуацій і систем управління вимагає застосування радикальних наукових рішень. Ефективне та раціональне управління експлуатацією парку транспортних машин (ТМ) або автотранспортної техніки (АТТ) та функціонуванням транспортних систем потребує урахування їх станів, умов експлуатації та функціонування, можливостей проведення необхідного комплексу заходів та технічних дій по забезпеченню працездатності.

Аналіз робіт вчених з теорії і практики технічної експлуатації ТМ та АТТ [4,5] та експлуатації транспортних систем [3,6] свідчить, що розвиток методів забезпечення їх працездатності і функціонування відбувається у напрямку удосконалення методів теорії інформації. Технічний стан елементів ТМ і АТТ, працездатність модулів парку машин та стан транспортної системи можливо описати на основі сукупності діагностичних параметрів їх стану [2,3,7] та показників надійності. При цьому діагностичні параметри поділяються на впливові та на ті, що практично не реагують на зміну функцій стану ТМ і АТТ транспортних систем. Одним з варіантів такого рішення є розподілене інтелектуальне мережеве управління, засноване на застосуванні кіберфізичного підходу при створенні, функціонуванні та удосконаленні транспортно-виробничих систем [8].

Формування такого підходу дослідження стану транспортних систем, ТМ і АТТ модулів парку машин доцільним є при використанні методів теорії чутливості [9]. Особливо це стосується використання критеріїв статистичної інформативності та відносної чутливості [10], а також еволюційні обчислювання їх життєвого циклу на основі генетичних алгоритмів [11]. При цьому корисним є застосування теоретико-методологічних основ побудови транспортних і технічних систем [12-14]. Ефективність функціонування транспортних і технічних систем підвищується при реалізації фізико-інформаційного підходу [15], автоматизації і інформатизації транспортних засобів на основі розподільної системи управління мехатронними модулями [16-18]. На основі кіберфізичного підходу та методів системної теорії інформації можлива організація логістичних центрів в Україні [19], а на основі структурно-функціональних резервних схем процесу доставок в промисловості та сільськогосподарському виробництві забезпечується високий рівень функціонування транспортних систем [20] при ефективних використаннях ТМ, АТТ і модулів парку машин. Зазначене потребує теоретичного обґрунтування та розв'язання проблеми їх удосконалення.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є теоретично, на основі функцій стану, сукупності діагностичних параметрів та методів системної теорії інформації, обґрунтувати можливості ефективного управління функціонуванням транспортних та експлуатацією технічних систем.

**Виклад основного матеріалу.** Функції станів об'єктів можливо представити як у вигляді вектору:

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_i), \quad (1)$$

так і у вигляді матриці:

$$S = \{S_{ij}\} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1j} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{i1} & S_{i2} & \dots & S_{ij} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $S_i = f(D_{i1}, \dots, D_{ij})$  – функція діагностичних параметрів.

Коефіцієнти, що враховують ступінь впливу відносних змін діагностичних параметрів на стан досліджуваного об'єкта, є коефіцієнтами чутливості або сенситивом  $Sen(S(D))$ :

$$SenS(D) = \lim_{\Delta D \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta S}{S} / \frac{\Delta D}{D} \right) = \lim_{\Delta D \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta S}{\Delta D} \cdot \frac{D}{S} \right) = \lim_{\Delta D \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta S}{\Delta D} \right) \cdot \frac{D}{S} = \frac{dS}{dD} \cdot \frac{D}{S} = \frac{S'(D)}{S/x} = \frac{S'(D)}{S(D)}; \quad (3)$$

$$SenS(D) = \frac{S'(D)}{\overline{S(D)}}, \quad (4)$$

де  $S'(D)$  – похідна, а  $\overline{S(D)}$  – усереднена функція стану. Сенситив функції стану від сукупності діагностичних параметрів (діагностичної інформації) можна подати у вигляді логарифмічної похідної:

$$SenS(D) = \frac{d \ln(S(D))}{d(\ln(D))}. \quad (5)$$

Сенситив функції стану досліджуваних об'єктів від діагностичних параметрів необхідний для визначення найбільш впливових та інформаційно-визначальних діагностичних параметрів в управлінні організаційно-технічними системами: технічної експлуатації АТТ; технічного сервісу АТТ; стану модулів парку машин; транспортних систем в цілому.

Сенситивність розглядається як в дискретному, так і у безперервному відображеннях об'єктів дослідження. В дискретному випадку сенситивність полягає у чисельному визначенні похідних, використовуючи метод кінцевих різниць:

$$SenS(D) = \frac{\Delta \ln(S(D))}{\Delta \ln D} = \frac{\ln(S(D_2)) - \ln(S(D_1))}{\ln(D_2) - \ln(D_1)} = \frac{\ln(S(D_2)/S(D_1))}{\ln(D_2/D_1)}. \quad (6)$$

При цьому властивості сенситиву і логарифмів практично співпадають:

$$Sen(S(D)) = \frac{1}{sen(D(S))}; \quad (7)$$

$$Sen(S(D_1)(D_2)) = Sen(S(D_1)) + Sen(S(D_2)), \quad (8)$$

$$SenS\left(\frac{(D_1)}{(D_2)}\right) = Sen(S(D_1)) - Sen(S(D_2)); \quad (9)$$

де  $D_1, D_2$  – вектори діагностичних параметрів:

$$(D_1) = (D_{11}, D_{12}, \dots, D_{1j}); \quad (D_2) = (D_{21}, D_{22}, \dots, D_{2j}).$$

$$\text{Якщо } S(D) = a^D, \quad \text{то } \text{Sen}S(D) = D \cdot \ln a. \quad (10)$$

Всі решта властивостей стану об'єктів, як функцій діагностичних параметрів не співпадають за властивостями логарифмів. Властивості сенситиву (коефіцієнта відносної чутливості) визначають, виходячи із визначення (3). При цьому область значень відносної чутливості становить:  $-\infty < \text{Sen}S(D) < +\infty$ . Властивості сенситивності, відображені формулами (2)-(9), дозволяють можливість зв'язку сенситиву з кількістю інформації Хартлі-Нейквіста-Больцмана, К.Шеннона – в області  $(0; +\infty)$  і Харкевича – в області  $(-\infty; +\infty)$ , в які входить логарифмічна функція.

Системна міра доцільності діагностичної інформації таких об'єктів як різноманітні технічні (елементи ТМ і АТТ, відокремлені одиниці ТМ і АТТ, модулі і парк машин в цілому) та транспортні системи, їх зв'язку, відображені у вигляді інформаційних функцій в узагальненій та класичній формул (рис. 1).

Використані у схемі зв'язків формул коефіцієнти квантовості (емерджентності) інформації визначаються виразами:

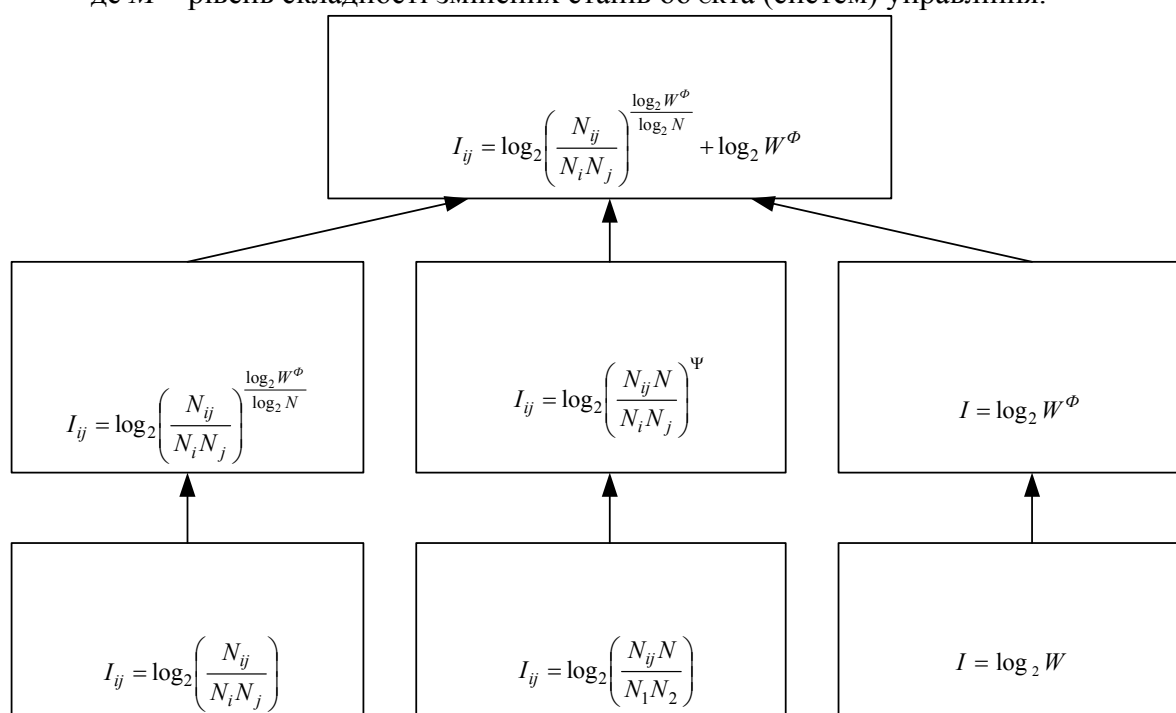
– Шеннона-Харкевича:

$$\Psi = \frac{\log_2 W^\Phi}{\log_2 N}; \quad (11)$$

– Хартлі:

$$\Phi = \frac{\log_2 \sum_{m=1}^M C_W^m}{\log_2 W}, \quad (12)$$

де  $M$  – рівень складності змінених станів об'єкта (систем) управління.



$W$  – кількість класів множини станів об'єкта управління;  $N_{ij}$  – сумарна кількість появи параметру  $D_i$  у об'єкта, що перейшов в стан  $S_j$ ;  $N_j$  – сумарна кількість параметрів у об'єкта, що перейшли в  $j$ -й стан;  $N_i$  – сумарна кількість  $i$ -го параметру у всіх об'єктів;  $N$  – сумарна кількість різних параметрів у всіх об'єктів

Рисунок 1 – Схема зв'язку класичних та узагальнених формул, що стосується функцій щільності діагностичної інформації про стан технічних і транспортних систем

Джерело: розроблено авторами

Авторами розроблено універсальний чисельний метод і інструментарій до нього, що дозволяє проводити інформаційні розрахунки на основі безпосередніх емпірично діагностичних даних, їх представлення наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Форми представлення емпіричної бази даних для розрахунку сенситиву впливу діагностичних параметрів на функцію стану об'єкта

$S(D_1 \dots D_M)$	$Sen_D S(D)$	$S_1(D_1 \dots D_M)$	$Sen_{D_1} S_1(D)$	$S_2(D_1 \dots D_M)$	$Sen_{D_2} S_2(D)$	...	$S_W(D_1 \dots D_M)$	$Sen_D S_W(D)$
$D_1$	$Sen_{D_1} S(D)$	$D_{11}$	$Sen_{D_{11}} S_1(D)$	$D_{12}$	$Sen_{D_{12}} S_2(D)$	...	$D_{1W}$	$Sen_{D_{1W}} S_W(D)$
$D_2$	$Sen_{D_2} S(D)$	$D_{21}$	$Sen_{D_{21}} S_1(D)$	$D_{22}$	$Sen_{D_{22}} S_2(D)$	...	$D_{2W}$	$Sen_{D_{2W}} S_W(D)$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
$D_M$	$Sen_{D_M} S(D)$	$D_{M1}$	$Sen_{D_{M1}} S_1(D)$	$D_{M2}$	$Sen_{D_{M2}} S_2(D)$	...	$D_{MW}$	$Sen_{D_{MW}} S_W(D)$

Джерело: розроблено авторами

Чисельний розрахунок сенситиву стану (коефіцієнту чутливості) технічної та транспортних систем проводять за формулами (6), (8)-(10).

В даній роботі процес інформаційного аналізу стану об'єктів дослідження пропонується на основі узагальнення класичної теорії інформації Хартлі-Шеннона, шляхом розгляду квантових і активних об'єктів та їх складових. Системну (узагальнену) теорію інформації (СТІ) можливо розглядати як систему або квантову (емерджентну). При цьому враховується передусім властивості системності як фундаментальної і універсальної властивості усіх об'єктів: системи ТМ, АТТ, транспортних систем.

Системна модифікація формули Хартлі для кількості інформації представляється у вигляді:

$$I = \log_2 \sum_{m=1}^M C_W^m, \quad (13)$$

де  $W$  – кількість класичних станів системи;  $C_W^m$  – сполука з  $W$  по  $m$  класичних станів.

Оскільки  $C_W^1 = W$ , то при  $M=1$  виконується принцип відповідності, що є обов'язковим для більш загальної теорії інформації. Формула (13) дає верхню оцінку можливої кількості інформації стану системи різної природи, тобто можливі різні правила заборони і реальна кількість можливих станів буде менша, ніж  $C_W^m$ .

Для системної модифікації, при використанні формули Р.Хартлі до випадку  $M=W$ , маємо:

$$I = \log_2(2^W - 1). \quad (14)$$

Визначено, що при  $W > 4$  похибка даного виразу (14) складає менше 1%. Додаткова інформація поведінки об'єкта в СТІ є інформацією про множину усіх її можливих станів, як системи елементом якої є об'єкт, що знаходиться в деякому стані. Чисельні розрахунки свідчать, що при зростанні кількості елементів в системах частка системної інформації в поведінці їх елементів прискорено зростає.

Модифікація класичної формули А. Харкевича є нелінійною суперпозицією класичних виразів для щільності інформації К.Шеннона і кількості інформації Р.Хартлі:

$$I_{ij} = \log_2 \left( \frac{N_{ij}}{N_i \cdot N_j} \right)^{\frac{\log_2 W^\Phi}{\log_2 N}} + \log_2 W^\Phi, \quad (15)$$

де  $\Phi$  – коефiцiєнт емерджентностi Р.Хартлi (рiвень системної органiзацiї об'єкта), що має  $W$  станiв:

$$\Phi = \left( \log_2 \sum_{m=1}^M C_W^m \right) / \log_2 W, \quad (16)$$

Останнiй вираз враховує взаємозв'язок мiж дiагностичними параметрами i майбутнiми станами дослiджуваних об'єктiв управлiння, та iх потужностю. Крім цього поєднується можливостi iнтегрального i дискретного опису об'єктiв, що є основою формалiзацiї змiсту, а також задовольняють принципову вiдповiднiсть. Зазначимо, що перетворення, якi вiдбуваються у формулi Р.Хартлi, характеризують випадок, коли кожному класу стану об'єкта вiдповiдає одна гранична ознака або граничне значення (дiагностичного показника), i кожнiй ознацi – один клас. Цi класи станiв мають бути рiвномiвiрнi.

Зазначене свiдчить про те, що вираз (15) є оптимальним за сформульованими критерiями для цiлей побудови семантичної iнформацiйної моделi об'єктiв управлiння. Iх можливо застосувати для синтезу рефлексивних автоматизованих систем управлiння або кiберфiзичних систем управлiння. В данiй семантичнiй iнформацiйнiй моделi генерується узагальнена таблиця рiшень, в яких входи (дiагностичнi параметри) i виходи майбутнiх станiв активного об'єкта управлiння (АОУ) зв'язанi один з одним.

Синтез узагальнюючих таблиць прийняття рiшень для управлiння станами технiчних (АТТ, парк машин) та транспортних систем здiйснюється безпосередньо на основi емпiричних вихiдних даних (табл.1). На основi узагальнюючих таблиць формуються прямi i зворотнi правдоподiбнi нечiткi) логiчнi мiркування за некласичними схемами з рiзним розрахунком значень iстинностi, що є узагальненням класичних iмплiкацiй.

При цьому в прямих мiркуваннях як передумови розглядаються дiагностичнi параметри, а як висновок – майбутнi етапи АОУ, а у зворотних – слiдують навпаки. Ступiнь iстинностi  $i$ -ої передумови – це кiлькiсть iнформацiї  $I_{ij}$ , що мiстить про реалiзацiю  $j$ -го майбутнього стану активного об'єкта управлiння. Зазначимо, що iнформацiйний семантичний простiр є неортонормованим. В такому просторi вiдстань П.Маханалобiса (евклiдовий простiр) є незастосовною, оскiльки вимiрюють вiдстань вiд центроїди, а не мiж векторами. Враховуючи останнє на основi леми Неймана-Пiрсона, в якостi неметричної мiри схожостi запропоновано використовувати сумарну кiлькiсть iнформацiї у рiзних формах:

– векторна:

$$I_j = (\bar{I}_{ij}, \bar{L}_i); \quad (17)$$

– координатна:

$$I_j = \sum_{i=1}^A I_{ij} L_i, \quad (18)$$

де  $\bar{I}_{ij} = (I_{ij})$  – вектор  $j$ -го стану об'єкта управлiння, координати якого в iнформацiйному семантичному просторi розраховуються згiдно системного узагальнення формули А.Харкевича;  $\bar{L}_i = L_i$  – булев-вектор стану дослiджуваного об'єкта, що включає усi види факторiв (параметрiв), характеризуючих систему управлiння й можливi управлiнськi впливи i зовнiшне середовище.

Семантична iнформацiйна модель дозволяє вирiшити завдання iдентифiкацiї та

прогнозування розвитку досліджуваних технічних і транспортних систем. При цьому здійснюються: розклад вектора об'єкта по векторах класів, а також розробляються ефективні управлінські впливи шляхом рішення зворотного завдання прогнозування і застосування елементів нетрадиційної логіки та нечітких міркувань. В семантичній інформаційній моделі об'єднані переваги змістовних і статистичних моделей, створені передумови для реалізації автоматизованої системи когнітивного аналізу транспортних та технічних систем.

З'ясовано, що взаємозв'язок, семантичної міри А.Харкевича зі  $\chi^2$  – статистикою Ч.Спірмена, дає можливість використовувати на практиці нову статистичну міру наявності причинно-наслідкових зв'язків  $H_{p-n}$  в транспортних і технічних системах. В основі статистичної міри лежить модифікована формула А.Харкевича:

$$H_{p-n} = \left( \frac{1}{AW-1} \sum_{j=1}^W \sum_{i=1}^A (I_{ij} - \bar{I})^2 \right)^{1/2}, \quad (19)$$

де  $\bar{I} = \frac{1}{AW} \sum_{j=1}^W \sum_{i=1}^A I_{ij}$  – середня інформативність ознак або діагностичних параметрів

по матриці інформативності.

Стійкість семантичної інформації моделі при малих вибірках та співставленість часткових критеріїв добре обґрунтованих інтерпретацій розпізнавання технічних станів об'єкта, розроблених по векторам класів. Це дає можливість запропонувати робасті процедури управління, а також розробки процедури забезпечення структурної репрезентативності вибірки. Коефіцієнт емерджентності Р.Хартлі  $\Phi$  при цьому характеризує відносне перевищення кількості інформації про систему, її елементи та модулі з урахуванням системних ефектів: зменшення числа станів, ієрархічна структура підсистем та ін. Розгляд кількості інформації без урахування системності, тобто коефіцієнту  $\Phi$ , відображає рівень системності досліджуваного об'єкта. При цьому рівень системності змінюється від 1 до  $W/\log_2 W$ . Для кожної кількості елементів технічних та транспортних систем існує свій максимальний рівень системності, реально не можливо досягати через ускладнення при реалізації в системі ряду підсистем різних рівнів ієрархій.

Характерним для коефіцієнту емерджентності А.Харкевича,  $\psi \in [0;1]$ , є те, що він визначає ступінь детермінованості системи. Якщо  $\psi=1$ , то система є повністю детермінованою і її поведінка однозначно визначається дією мінімальної кількості факторів (параметрів), яких стільки скільки є станів в системі. При  $\psi=0$  система є повністю випадковою, а її поведінка не залежить від дії факторів (параметрів), тобто є незалежно від їх кількості.

Більшість реальних технічних і транспортних систем мають  $0 < \psi < 1$ , поведінка яких залежить від багатьох факторів (параметрів), число яких не перевищує кількість станів системи, причому жодний з станів не визначається однозначно ніякими поєднаннями діючих факторів (параметрів).

Результати досліджень свідчать, що збільшення рівнів системності впливає на семантичну інформаційну модель аналогічно підвищенню рівня детермінованості. Якщо рівень системності, знижується як і ступінь детермінованості системи, то це приводить до послаблення впливу факторів (параметрів) на поведінку і стан технічних та транспортних систем. Зазначене характеризує інфляційні процеси впливу факторів (параметрів), в т.ч. діагностичних параметрів, на стан систем.

#### **Висновки.**

1. Для визначення ступеню впливу діагностичного параметру на сукупність



станів транспортної та технічної (сукупність елементів та одиниць автотракторної техніки або транспортних машин, модуль парку машин та ін.) запропоновано коефіцієнт чутливості або сенситив відносної зміни діагностичного параметра на стан досліджуваного об'єкта. Розглянуті основні властивості сенситивів станів транспортних та технічних систем.

2. Показано, що властивості сенситивності дозволяють їх зв'язати з кількістю інформації Хартлі-Нейквіста-Больцмана, К.Шеннона і А.Харкевича. Побудована схема зв'язку класичних і узагальнених формул, щільності діагностичної інформації про стан транспортних і технічних систем.

У схемі зв'язку використані коефіцієнти квантовості (емерджентності) інформації.

3. Розроблено універсальний чисельний метод і інструментарій, що дає можливостей проводити інформаційні розрахунки на базі емпіричних даних про стан транспортних і технічних систем, впливу на них діагностичних параметрів.

4. Розглянуто різні випадки системної модифікації формули Хартлі та формули Харкевича для кількості інформації, в яких враховано кількість станів системи та рівень системної організації об'єктів, який враховує як взаємозв'язок між діагностичними параметрами і майбутніми станами об'єкта управління, так і їх майбутніми станами об'єкта управління, так і їх потужністю.

5. За сформульованими критеріями інформативності і сенситивності та запропоновано семантичну інформаційну модель досліджуваних об'єктів управління. Показано, що її можливо застосувати для синтезу рефлексивних автоматизованих або кіберфізичних систем управління. Доведено синтез узагальнених таблиць прийняття рішень для управління станами технічних та транспортних систем.

6. Виявлено, що семантична інформаційна модель дозволяє вирішити завдання їх ідентифікації та прогнозування розвитку. Показано, що в даній моделі об'єднані переваги змістовних і статистичних моделей та створені передумови для реалізації автоматизованої системи когнітивного аналізу транспортних та технічних систем.

7. З'ясовано, що взаємозв'язок семантичної міри Харкевича з  $\chi^2$  – статистикою Спірмена дає можливість використовувати на практиці нову статистичну міру наявності причинно-наслідкових зв'язків в транспортних і технічних системах з використанням модифікованої формули Харкевича.

8. Розглянуто зв'язок кількості інформації з коефіцієнтом системності. Визначено, що для кожної кількості елементів транспортної та технічної системи існує свій максимальний рівень, який неможливо досягти на практиці. Показано, що ступінь детермінованості транспортних і технічних систем визначає коефіцієнт емерджентності Харкевича, за яким можливо оцінити поведінку системи, ступінь випадковості та детермінованості станів, а також зв'язок їх з кількістю елементів системи.

## Список літератури

1. Чехарин Е. Е. Большие данные: большие проблемы. *Перспективы науки и образования*. 2016. № 3. С. 7–11.
2. Аулин В.В., Замота Т.Н., Гриньків А.В., Лысенко С.В., Крупица О.В., Панайотов К.К. Обоснование использования современных подходов для усовершенствования диагностирования систем и агрегатов автомобиля. *Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 2(33). С.65-75.
3. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем : монографія / В. В. Аулін та ін.; під заг. ред. В. В. Ауліна. Кропивницький: Лисенко В. Ф., 2020. 428с.
4. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. та ін. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської

- техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: науковий журнал*. - Харків : ХНТУСГ, 2020. № 22. С. 162-174.
5. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Системна концепція аналізу автотранспортної техніки та зміни її технічного стану під час експлуатації. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали VIII-ої міжн. наук.-практичної інтернет-конф., 14-15 квітня 2020 р.: зб. наук. праць / МОН України, ВНТУ [та ін.]. Вінниця: ВНТУ, 2020. С.20-22.
  6. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В., Головатий А.О. Стан проблем щодо впровадження інтелектуальних транспортних і виробничих систем та методи їх вирішення в глобальному масштабі. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту*: зб. наук. матеріалів міжнар. науково-практичної інтернет-конференції, ЦНТУ м.Кропивницький, Україна, 18-19 листопада 2020 р. Кропивницький. 2020. С.13-18.
  7. Аулін В., Гриньків А., Головатий А. Рівні завдань та структура функціонування системи технічного сервісу транспортних машин. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: матеріали II Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції 25-27 березня 2020 р. Рівне : НУВГП, 2020. С. 123-125.
  8. Khaitan et al. Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey, *IEEE Systems Journal*, 2014, 9(2), pp.1-16.
  9. Аулін В.В., Гриньків А.В. Теоретичний аналіз діагностичних параметрів технічного стану систем та агрегатів засобів транспорту за допомогою методів теорії чутливості. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2017. Вип. 262. С. 227-239.
  10. Аулін В.В., Гриньків А.В. Метод визначення тенденцій зміни технічного стану засобів транспорту з використанням критеріїв статистичної інформативності та відносної чутливості. *Крамаровські читання*: зб. тез доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції, 22-23 лют. 2018 р., К.: Видавничий центр НУБіП України, 2018. С. 132-135.
  11. Аулін В.В., Панков А.А. Эволюционное вычисление жизненного цикла технических средств на основе генетических алгоритмов. *Вісник інж. академії України*. 2017. №2. С.116-119.
  12. Аулін В.В., Великодний Д.О., Дьяченко В.О. Теоретико-методологічні основи побудови транспортно-логістичних систем. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту*: Матеріали VI-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 12-13 квітня 2018 року. Вінниця: ВНТУ, 2018. С.9-10.
  13. Аулін В.В. Великодний Д.О., Дьяченко В.О. Оптимізація і управління ресурсами в транспортно-логістичній системі АПК. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. Луцьк: Луцький НТУ, 2018. №62. С.8-11.
  14. Аулін В.В., Великодний Д.О., Голуб Д.В., Дьяченко В.О. Підвищення ефективності управління логістичним ланцюгом постачання в транспортній системі. *Крамаровські читання*: зб. тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції. 21-22 лют. 2019 р., м. Київ: НУБіП, 2019. С. 195-198.
  15. Аулін В.В., Голуб Д.В. Реалізація фізико-інформаційного підходу дослідження проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування транспортних систем. *Вісник ХНАДУ*, 2018. вып. 81. С.21-28.
  16. Аулін В.В., Панков А.А. Автоматизация и информатизация транспортных средств на основе распределенной системы управления с интеллектуальными мехатронными модулями. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту*: збірник наукових матеріалів міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, ЦНТУ м.Кропивницький, Україна, 14-15 листопада 2018 року. Кропивницький. 2018. С.97-100.
  17. Аулін В.В., Панков А.О., Гриньків А.В., Голуб Д.В., Щеглов А.В. Розробка інтелектуального мехатронного модуля для системи управління дозуванням. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІІРТК-2019)*: збірник тез Дванадцятій міжнародної науково-практичної конференції, 21-22 травня 2019 року, Київ, Україна. К.: НАУ, 2019. С.173-175.
  18. Aulin V.V., Pankov A.O., Zamota T.M., Lyashuk O.L., Hrynkiv A.V., Tykhyi A.A., Kuzyk A. V. Development of mechatronic module for the seeding control system. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 2019. vol. 59, no.3. P. 181-188.
  19. Aulin V., Pavlenko O., Velikodnyu D., Kalinichenko O, Hrinkiv A., Diychenko V., Dzyura V. Methodological approach to estimation of efficiency of the facing of the stock complex of transport and logistic centers in Ukraine. *ICCPT 2019: Current Problems of Transport*: Proceedings of the 1st International Scientific Conference, May 28-29, 2019, Ternopil, Ukraine. С.120-134.
  20. Аулін В.В., Голуб Д.В. Забезпечення ефективності функціонування транспортних систем шляхом

підвищення надійності структурно-функціональних резервних схем процесу доставки. *Наука – виробництво 2019*: зб. тез доповідей викладачів, аспірантів та співробітників Л наукової конференції, 18 квітня 2019 року. Кропивницький: ЦНТУ, 2019. С. 17-20.

## References

1. Cheharin, E.E. (2016). Bolshie dannyye: bolshie problemyi [Big data: big problems]. *Perspektivy nauki i obrazovaniya – Prospects for science and education*. 3. 7-11 [in Russian].
2. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Hrynkiv, A.V., Lysenko, S.V., Krupitsa, O.V. & Panayotov, K.K. (2019). Rationale for the use of modern approaches to improve the diagnosis of systems and units of the car [Obosnovanie ispolzovaniya sovremennyih podhodov dlya usovershenstvovaniya diagnostirovaniya sistem i agregatov avtomobilya]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences.– Tsentralnoukrayinskiy naukoviy visnik. Tehnichni nauki. Vol. 2 (33)*. 65-75 [in Russian].
3. Methodological bases of designing and functioning of intellectual transport and production systems [Metodolohichni osnovy proektuvannya ta funktsionuvannya intelektualnykh transportnykh i vyrobnychyykh system : monohrafiia]: monograph / V.V. Aulin et al.; under the general ed. V.V. Aulin. Kropyvnytsky: Lysenko VF. 2020. 428 [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Lysenko, S.V. etc. (2020). Principles of construction and operation of the cyberphysical system of technical service of motor transport and mobile agricultural machinery [Pryntsy py pobudovy ta funktsionuvannya kiberfizychnoi systemy tekhnichnoho servisu avtotransportnoi ta mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki]. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes: scientific journal. – Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv: naukoviy zhurnal - Kharkiv: KhNTUSG*. 22. 162-174 [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Holovaty, A.O. (2020) System concept of analysis of motor vehicles and changes in its technical condition during operation [Systemna kontseptsiiia analizu avtotransportnoi tekhniki ta zminy yii tekhnichnoho stanu pidchas ekspluatatsii]. Problems and prospects for the development of road transport: *materials of the VIII International scientific-practical Internet conference – materialy VIII-oi mizhn. nauk.-praktychnoi internet-konf.*, April 14-15, 2020: coll. Science. works / MES of Ukraine, VNTU [etc.]. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
6. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Lysenko, S.V., Holub, D.V. & Holovaty, A.O. (2020) The state of problems in the implementation of intelligent transport and production systems and methods for solving them on a global scale [Stan problem shchodo vprovadzhennia intelektualnykh transportnykh i vyrobnychyykh system ta metody yikh vyrishennia v hlobalnomu masshtabi]. Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: *Coll. Science. materials international. scientific-practical Internet conference – zb. nauk. materialiv mizhnar. naukovopraktychnoi internet-konferentsii*, CNTU Kropyvnytskyi, Ukraine, November 18-19, 2020 Kropyvnytskyi [in Ukrainian].
7. Aulin, V., Hrynkiv, A. & Holovaty, A. (2020) Levels of tasks and the structure of the system of technical service of transport vehicles [Rivni zavdan ta struktura funktsionuvannya systemy tekhnichnoho servisu transportnykh mashyn]. Innovative technologies of machine building development and efficient functioning of transport systems: *materials of the II International scientific and technical Internet conference – materialy II Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi internet-konferentsii* on March 25-27, 2020. Rivne: NUVGP[in Ukrainian].
8. Khaitan et al. Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey (2014), *IEEE Systems Journal*, 9(2), pp.1-16 [in English].
9. Aulin, V.V. & Hrynkiv, A.V. (2017). Teoretychnyi analiz diahnostychnykh parametriv tekhnichnoho stanu system ta ahrehativ zasobiv transportu za dopomohoiu metodiv teorii chutlyvosti [Theoretical analysis of diagnostic parameters of technical condition of systems and units of means of transport by means of methods of the theory of sensitivity]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy. Serii: tekhnika ta enerhetyka APK - Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: machinery and energy of agro-industrial complex. Vol. 262*. 227-239 [in Ukrainian].
10. Aulin, V.V. & Hrynkiv, A.V. (2018). Metod vyznachennia tendentsii zminy tekhnichnoho stanu zasobiv transportu z vykorystanniam kryteriiv statystychnoi informatyvnosti ta vidnosnoi chutlyvosti [The method of determining trends in the technical condition of vehicles using the criteria of statistical informativeness and relative sensitivity]. *Kramarov readings: zb. tez dopovidei V Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii - collection. abstracts of the V International Scientific and Technical Conference*, 22-23 liut. 2018 r., K.: Vydavnychy tse ntr NUBiP Ukrainy [in Ukrainian].
11. Aulin, V.V. & Pankov, A.A. (2017). Evolyutsionnoe vyichislenie zhiznennogo tsikla tehniceskikh sredstv na osnove geneticheskikh algoritmov [Evolutionary calculation of the life cycle of technical means based

- on genetic algorithms]. *Visnyk inzh. akademii Ukrainy - Bulletin of Eng. Academy of Ukraine*. 2, 116-119 [in Russian].
12. Aulin, V.V., Velykodnyi, D.O. & Diachenko, V.O. (2018). Teoretyko-metodolohichni osnovy pobudovy transportno-lohistychnykh system [Theoretical and methodological foundations of construction of transport and logistics systems]. Problems and prospects for the development of road transport: *Materialy VI-oi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii - Proceedings of the VI International Scientific and Practical Internet Conference*, 12-13 kvitnia 2018 roku. Vinnytsia: VNTU, S.9-10 [in Ukrainian].
  13. Aulin, V.V., Velykodnyi, D.O. & Diachenko, V.O. (2018). Optyimizatsiia i upravlinnia resursamy v transportno-lohistychnii systemi APK [Optimization and management of resources in the transport and logistics system of agro-industrial complex]. *Mizhvuzivskiy zbirnyk "Naukovi notatky" - Interuniversity collection "Scientific Notes"*. Lutsk: Lutskiy NTU. 62. 8-11 [in Ukrainian].
  14. Aulin, V.V., Velykodnyi, D.O., Holub, D.V. & Dchenko, V.O. (2019). Pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia lohistrychnym lantsiuhom postachannia v transportnii systemi [Improving the efficiency of logistics supply chain management in the transport system]. *Kramarov readings: zb. tez dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii - collection. abstracts of the VI International Scientific and Technical Conference*. 21-22 liut. 2019 r., m. Kyiv: NUBiP, S. 195-198 [in Ukrainian].
  15. Aulin V.V., Holub D.V. (2018). Realizatsiia fizyko-informatsiinoho pidkhodu doslidzhennia problemy pidvyshchennia nadiinosti ta efektyvnosti funktsionuvannia transportnykh system [Implementation of the physical and information approach to the study of the problem of improving the reliability and efficiency of transport systems]. *Vestnik HNADU - Bulletin of KhNADU. Vol. 81*. 21-28 [in Ukrainian].
  16. Aulin V.V., Pankov A.A. (2018). Avtomatizatsiya i informatizatsiya transportnykh sredstv na osnove raspredelennoy sistemy upravleniya s intellektualnyimi mehatronnyimi modulyami [Automation and informatization of vehicles based on a distributed control system with intelligent mechatronic modules]. *Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: zbirnyk naukovykh materialiv mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii - a collection of scientific materials of the international scientific-practical Internet conference*, TsNTU m.Kropyvnytskyi, Ukraina, 14-15 lystopada 2018 roku. Kropyvnytskyi. S.97-100 [in Russian].
  17. Aulin, V.V., Pankov, A.O., Hrynkiv, A.V., Holub, D.V. & Shcheglov, A.V. (2019). Rozrobka intelektualnoho mehatronnoho modulua dlia systemy upravlinnia dozuvanniam. *Intehrovani intelektualni robototekhnichni komplekxy (IIRTK-2019): zbirnyk tez Dvanadtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, 21-22 travnia 2019 roku, Kyiv, Ukraina. K.: NAU, S.173-175 [in Ukrainian].
  18. Aulin, V.V., Pankov, A.O., Zamota, T.M., Lyashuk, O.L., Hrynkiv, A.V., Tykhyi, A.A. & Kuzyk, A.V. (2019). Development of mechatronic module for the seeding control system. *INMATEH – Agricultural Engineering. Vol. 59, no.3*. 181-188 [in English].
  19. Aulin, V., Pavlenko, O., Velikodnyy, D., Kalinichenko, O., Hrinkiv, A., Diychenko, V. & Dzyura, V. (2019). Methodological approach to estimation of efficiency of the facing of the stock complex of transport and logistic centers in Ukraine. *ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference*, May 28-29, 2019, Ternopil, Ukraine. Pp.120-134 [in English].
  20. Aulin, V.V. & Holub, D.V. (2019). Zabezpechennia efektyvnosti funktsionuvannia transportnykh system shliakhom pidvyshchennia nadiinosti strukturno-funktsionalnykh rezervnykh skhem protsesu dostavky [Ensuring the efficiency of transport systems by increasing the reliability of structural and functional backup schemes of the delivery process]. *Science - production 2019: zb. tez dopovidei vykladachiv, aspirantiv ta spivrobotnykiv L naukovo konferentsii - coll. abstracts of reports of teachers, graduate students and staff of the L scientific conference*, 18 kvitnia 2019 roku. Kropyvnytskyi: TsNTU, S. 17-20 [in Ukrainian].

**Viktor Aulin**, Prof., Dr. tech. sci., **Andrey Grinkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Livitskyi**, applicant, **Andrii Chernai**, applicant, **Dmytro Holub**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Artem Holovaty**, post-graduate

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Theoretical Substantiation of Management of Functioning of Technical and Transport Systems on the Basis of Methods of the System Theory of Information**

In the work from the theoretical point of view the management of functioning of transport and operation of technical systems on the basis of a method of the system theory of information is substantiated. The state vector and matrix on the basis of diagnostic information and sensitivity of influence of diagnostic parameters on a condition of transport or technical systems are offered. The properties of sensitivity (sensitivity) are reflected on the basis of classical and generalized information formulas of A. Kharkevich, K. Shannon, R. Hartley. The coefficients of quantum (emergence) of information according to the expressions of Shannon-Kharkevich and

Hartley are used, the level of complexity of the changed states of the control system is taken into account.

The scheme of connections of classical and generalized formulas which reflect functions of density of the diagnostic information on a condition of technical and transport systems is constructed.

A universal numerical method and tools for it have been developed, which allows to perform information calculations on the basis of diagnostic data of the state of the studied objects. Numerical calculation refers to the sensitivity of the state (sensitivity factor) of technical and transport systems. The level of system organization of transport and technical systems and their management as active objects is considered. It is noted that the principle of correspondence is fulfilled, which is mandatory for a more general information theory. The system modification is implemented using the Hartley formula, and the modification in the classical case is the Kharkevich formula.

It is determined that the semantic information model allows for small samples and comparison of partial criteria to well substantiate the interpretations of object state recognition, developed by the vectors of their classes.

It is revealed that the semantic information model combines the advantages of meaningful and statistical models created for the implementation of the automated system of cognitive analysis of transport and technical systems. The behavior of systems is revealed when they are completely deterministic and completely random, which is important in predicting their state.

**transport system, technical system, sensitivity, information theory, diagnostic information**

*Одержано (Received) 21.03.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 10.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 338.236

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).189-197](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).189-197)

**О.М. Лівіцький, асист.**

*Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: LivitskyiOM@gmail.com*

## Вдосконалення технічного сервісу автотракторної техніки в умовах агропромислового виробництва

Розглянуто стан технічного сервісу автотракторної техніки на підприємствах агропромислового виробництва Кіровоградської області. Визначено тенденції розвитку забезпеченості сільськогосподарського виробництва різноманітною автотракторною технікою. Розглянуто методику підвищення якості надання операцій технічного обслуговування та ремонту автотракторної техніки, поліпшення її технічного стану. Зазначено, що наявний стан, якість техніки, її продуктивність та оперативність не знаходиться на належному рівні, а отже потребує трансформації системи технічного сервісу.

Запропоновано перспективну організацію технічного сервісу на підприємствах різного рівня, в якій враховується попит та пропозиції на техніку, особливо закордонну. Зазначено, що фірмовий технічний сервіс проводиться заводом-виробником через центри сервісного обслуговування, головним з яких є торгівельно-накопичувальне координуюче підприємство в системі заводу виробника.

Показано, що схема технічного сервісу повинна базуватися на існуючій ремонтно-обслуговуючій базі, вказані основні напрямки, за яким здійснюється організація робіт.

Сформульовані основні положення модернізованого технічного сервісу, а також зазначено необхідність побудови повної структури управління системою технічного сервісу. Показано, що в сучасних умовах для підвищення ефективної системи технічного сервісу зростає роль і значення оперативного управління і інформаційного забезпечення, запропоновано в систему управління інженерною службою ввести інформаційний відділ, загальний для всього підприємства. З'ясовано основні етапи оперативного управління на підприємствах технічного сервісу.

**технічний сервіс, технічне обслуговування і ремонт, інформаційне забезпечення, автотракторна техніка, система**

**Постановка проблеми.** Моніторинг функціонування інженерно-технічної системи свідчить про те, що технічне оснащення підприємств агропромислового виробництва (АПВ) залишається нижчим за необхідний рівень і продовжує знижуватися. В той час парк машин поповнюється зарубіжними зразками техніки. Щорічне оновлення парку машин з традиційних до 1991р. 9...11% від наявності скоротилося до 0,3...3%. Це позначається на відставанні від досягнутого в 1990р. об'єму валового виробництва сільськогосподарської продукції та на зменшенні споживання населенням основних видів вітчизняних продуктів. Формування парку машин підприємств АПВ відбувається різнопланово і з різними зразками автотракторної техніки (АТТ), яка потребує реалізації різних операцій технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р).

Тому увага сьогодні зосереджена на розробці сучасних методів підтримки парку машин в працездатному стані і ефективного використання наявної техніки, тобто основним питанням є вдосконалення технічного сервісу і матеріально-технічного забезпечення АПВ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні ведуться дослідження по підвищенню технічного рівня наявних машин та подовження їх ресурсу до рівня нових шляхом модернізації при ремонті і організації вторинного ринку уживаної техніки [1-3], а також дослідження технічного сервісу як єдиного процесу його частин і взаємодії між ними.

До проведення обслуговуючих і ремонтних заходів слід проводити повне діагностування деталей і вузлів сільськогосподарської і транспортної техніки [4-6]. На думку В.І.Черноіванова, А.Є.Северного, Ю.Н. Сидиганова та інших ця процедура повинна проводитися з використанням ресурсозберігаючих технологій, що передбачають безрозбірне діагностування й дозволяє збільшити напрацювання на відмову в 1,5...2,0 рази вище за норму [7-10].

Організацію сервісних і ремонтних заходів неможливо проводити без ремонтно-обслуговуючої бази, яка являє собою сукупність служб і підприємств, що забезпечують весь обсяг робіт по підтримці парку машин в працездатному стані відповідно до існуючих нормативів. Важливість організації сервісного і технічного обслуговування парку машин на підприємствах АПВ обумовлена ще і тим, що в даний час відбувається зниження темпів виробництва сільськогосподарських машин і, як наслідок, спостерігається зростання їх вартості, а це призводить до того, що багато господарств не в змозі придбати нову техніку і вимушені експлуатувати ту, що є, проводячи регулярні її ремонти [11-15].

Для успішної реалізації програми вдосконалення системи технічного сервісу АТТ необхідний новий підхід до її організації [16-25]. Виробнича база технічного сервісу повинна зазнати зміни на всіх рівнях. У роботах А.Є. Северного визначено наукові основи реструктуризації і побудови ремонтно-обслуговуючої бази АПВ [8].

У зв'язку з цим Черноівановим В.І. запропоновано нову форму організації ТО і Р техніки в АПВ на основі створення дилерської служби, а також ним розроблено концепцію розвитку мережі машинно-тракторних станцій (МТС) як структури, що найбільше сприяє науково-технічному прогресу в АПВ [2,26]. Питанням організації технічного сервісу на МТС присвячені роботи багатьох учених [27,28].

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є аналіз системи технічного сервісу автотракторної техніки агропромислових підприємств, є методів її реалізації та ефективності проведення технічного обслуговування та ремонту.

**Виклад основного матеріалу.** Аналізуючи стан автотракторної техніки Кіровоградської області можна відзначити, що, починаючи з 1990р. щорічно

господарствами списувалося в середньому 9...10% одиниць АТТ, а з 1998р. ця цифра скоротилася до 3%. Якщо розглядати загальну картину наявності тракторів і комбайнів в господарствах Кіровоградської області, то можна відзначити, що їх кількість за останні 10 років різко скоротилося (автомобілів 27%, тракторів на 32%, а комбайнів на 37%). Що стосується забезпеченості виробників сільськогосподарської продукції основними видами АТТ, то починаючи з 2002 р господарства не були забезпечені технікою на 100%. В табл. 1 представлені дані по забезпеченості основною сільськогосподарською технікою господарств Кіровоградської області сьогодні.

Таблиця 1 – Забезпеченість Кіровоградської області основною АТТ на 01.01.2021р.

Найменування	Наявність	Потреба
Автомобілі	5630	7360
Трактори	8930	12237
Комбайни	540	620

*Джерело: розроблено автором*

Ці дані свідчать про те, що через таку нестачу техніки значно зростає навантаження на кожну її одиницю. Крім того, викликає турботу і віковий склад парку автомобілів і тракторів, оскільки 78% з них має вік більше 10 років (при нормативному терміні 10 років); 17% мають термін служби 6...10 років і лише 5% техніки можна вважати відносно новою – їх термін складає від одного до п'яти років. Доцільно зазначити і те, що останніми роками спостерігається тенденція зростання використання в підприємствах АПВ іноземної техніки. Наведені факти свідчать про необхідність і доцільність розробки цілого комплексу заходів, як по проведенню ремонтних робіт, так і по підтримці парку машин в працездатному стані, планування яких потребує чітко відлагодженої інформаційної системи.

Основними функціями системи технічного сервісу в сучасних умовах є:

- вивчення потреби і платоспроможного попиту сільських товаровиробників на машини і послуги;
- збір інформація про техніку, що випускається (реклама машин);
- постачання машин і механізмів;
- монтаж і наладка реалізованої техніки;
- виконання ТО і Р техніки, підтримка її в працездатному стані протягом всього терміну експлуатації;
- забезпечення ремонтно-технологічним устаткуванням, запасними частинами, обмінними агрегатами і матеріалами;
- забезпечення споживачів нормативно-технічною документацією;
- інформаційно-консультаційне забезпечення споживача з питань експлуатації машин;
- навчання персоналу експлуатаційників і ремонтників.

Однією з основних частин технічного сервісу є система ТО і Р, яка являє собою цілий комплекс організаційно-технічних заходів, що забезпечують найбільш економічними способами підтримку техніки у нормальному стані протягом всього терміну служби, аж до їх списання. Науково-обґрунтована система заходів щодо ТО і Р машин враховує закономірності прояву їх загальних властивостей. Ця система відповідно до технічних і конструктивних параметрів машин, особливостям їх експлуатації передбачає перелік робіт по ТО з метою профілактики, а також запобіганню аварійному зносу, поломкам, порушенню регулювань, що впливають на

якість роботи машин.

Ремонтно-обслуговуюча база АТТ підприємств АПВ, використовується в середньому на 15...20% своєї потужності, тоді, як потреба в ремонтних роботах постійно зростає. Це привело до зниження технічної оснащеності сільського господарства на 40%, а отже й до зниження внутрішнього валового продукту АПВ на 42%. У зв'язку з цим є нагальна необхідність вдосконалювати існуючі технології технічного сервісу.

На сьогодні, як правило, ремонтні підприємства самі не виходять на машинобудівні та інструментальні заводи, а використовують в основному торгово-провідну мережу.

Необхідно зазначити, що структура, яка здійснює забезпечення всім необхідним для проведення ремонту машин на підприємствах АПВ, містить ряд фірм і організацій матеріально-технічного забезпечення які відрізняються між собою по видах пропонуванних послуг, номенклатурі, обслуговуванні окремих категорій замовників і багатьох інших параметрів. Проте всіх їх об'єднує сфера діяльності, що полягає в обробці потоків інформації, яка надходить, як від нижчестоячих організацій (підприємств сервісу, ремонту), так і від підприємств, які безпосередньо займаються виробництвом запасних частин і агрегатів до сільськогосподарських машин і механізмів.

Основний обсяг робіт по ТО і Р та зберіганню автотракторної техніки виконується її власниками. У зв'язку з цим навіть в дрібних господарствах необхідно створювати виробничу базу для дрібного ремонту, а складні види ТО і Р необхідно проводити в ремонтних майстернях великих господарств і ремонтних підприємств. Районні сервісні підприємства можуть включати станції ТО тракторів, автомобілів, комбайнів, майстерні загального призначення, технічні обмінні пункти та інші. Вони вивчають попит і пропозиції на техніку, забезпечують господарства запасними частинами і іншими матеріально-технічними засобами.

Обласні підприємства технічного сервісу продовжуватимуть виконувати функції спеціалізованих підприємств по ремонту машин і агрегатів, виконуючи при цьому багатомарочний знеособлений ремонт. Фірмовий технічний сервіс проводиться заводом-виробником через центри сервісного обслуговування.

Регіональні центри технічного сервісу організовуються на базі обласних ремонтних сервісних підприємств. Зона діяльності таких центрів – область, частина області або декілька областей у складі України. Регіональний центр вивчає кон'юнктуру ринку; організує рекламу, продаж і доставку машин, запасних частин, матеріалів; координує діяльність сервісних підприємств і дилерів, а також виконує багато інших функцій.

Головний центр технічного сервісу – це торговельно-накопичувальне координуюче підприємство в системі заводу виробника. Воно організує збут, ТО і Р, вивчає кон'юнктуру ринку, складає прогнози і координує діяльність підприємств.

За статистичними даними, стан технічного сервісу АТТ наступний: на 8...12% скорочується час на ТО і Р; на 20...28% збільшується напрацювання на трактор і на 34...46% підвищується його продуктивність; на 12...15% збільшується навантаження на автомобіль і на 20...25% збільшується його продуктивність.

Розглянута схема технічного сервісу повинна базуватися на існуючій ремонтно-обслуговуючій базі, а організація робіт здійснюватися за такими напрямками:

- оптимальне розміщення підприємств з надання послуг з ТО і Р;
- спеціалізація і концентрація підприємств технічного сервісу, створення міжрайонних їх об'єднань;



- ремонт розглядається як рух системи, ланцюг перетворень стану техніки;
- підвищення якості операцій ТО і Р на спеціалізованих підприємствах за рахунок покращення ремонтного фонду.

В основі функціонування модернізованого технічного сервісу слід враховувати наступні основні положення:

- пріоритетність сільськогосподарського товаровиробника, тобто організація ТО і Р та матеріально-технічна база спрямовані на продуктивну та ефективну діяльність;
- урахування регіональних особливостей сільськогосподарського виробництва, формування парку автотракторної техніки, комплексу операцій, що виконує АТТ у АПВ;
- враховуються всі учасники процесів сільськогосподарського виробництва, техніко-економічні інтереси, незалежно від форм власності і типу фірм, підприємств;
- в організації операцій ТО і Р перевага надається власникам АТТ;
- підтримується раціональне співвідношення між виробництвом нових машин, обсягом запасних частин до них, рівень матеріально технічної бази і підприємства, що надають технічний сервіс;
- забезпечується логістичний підхід до розв'язання завдань технічного сервісу;
- враховуються новітні технології та розробки у сферах логістики та інформаційних технологій.

Для дотримання перерахованих положень виникає необхідність побудови повної структури управління системою технічного сервісу [28]. Через те, що в сучасних умовах для підвищення ефективності системи технічного сервісу особливо зростає роль і значення оперативного управління і інформаційного забезпечення, то запропоновано в систему управління інженерною службою ввести інформаційний відділ, загальний для всього підприємства АПВ, і ввести фахівця з інформатизації у відділі головного інженера.

Це дозволить ефективно обробляти оперативну інформацію, особливо в пікові періоди (посівна, жнива) і мати повну статистичну інформацію про стан машино-парку машин підприємств АПВ, потребах в запасних частинах, здійсненні ремонтно-обслуговуючих робіт, а також багато інших аспектах, пов'язаних з ремонтно-технічними заходами на підприємствах АПВ.

Оперативне управління при цьому повинне містити такі етапи:

- збір інформації про функціонування об'єктів управління і протікання виробничого процесу;
- методи і засоби передачі інформації;
- математично статистичні методи обробки інформації на ПК з подальшим її аналізом згідно поставлених завдань;
- корегування оперативних планових завдань;
- складання оперативних планів.

**Висновки.** Аналіз системи технічного сервісу підприємств АПВ показав, що нагальною постає трансформація її структури і методів ТО і Р. Успішної реалізації прогресивних перетворень в цій системі не можливо без використання сучасних засобів зв'язку і засобів обчислювальної техніки, які, у свою чергу, припускають використання обчислювальних мереж і відповідних математичних методів і моделей прийняття рішень щодо організації і оперативного управління виробництвом.

## Список літератури

1. Артюшин А.А. Основные итоги направления развития агроинженерной науки. *Техника в сельском хозяйстве*. 2003. № 4. С. 3-6.

2. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. та ін. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСХ. 2020. № 22. С. 162-174.
3. Аулін В.В., Лівіцький О.М., Жулай О.Ю. Стан проблеми підвищення ефективності технічного сервісу СГТ в нових умовах господарювання. *Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин*. Кіровоград:КНТУ. 2007. Вип.37. С. 158-162.
4. Аулін В.В., Жулай О.Ю., Лівіцький О.М. Транспортні засоби в агропромисловому комплексі та система діагностичного моніторингу їх технічного стану. *Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин*. Кіровоград:КНТУ. 2007. Вип.37. С. 146-154.
5. Аулін В.В., Лівіцький О.М. Концепція управління технічним станом і безпекою експлуатації транспортних засобів сільськогосподарського виробництва. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. Луганськ: СХУ. 2010. №6(148). С. 173-177.
6. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лівіцький О.М. Підвищення надійності мобільної та автотранспортної техніки сільськогосподарського виробництва на основі діагностики їх стану. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с.-г. техніки*: матеріали X Міжнар. наук.-практичної конференції. Кіровоград:КНТУ, 2015. С.163-164.
7. Лезин П.П., Комаров В.А. Формирование структуры, содержания и правил на значения ремонтных работ. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2004. №3 С.45-48.
8. Северный Э. А., Биднин В. В., Ольховацкий А. И., и др. Методически особенности определения параметров технической структуры МТС. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2000. № 1. С. 2-6.
9. Козаченко О.В. Проблеми та перспективи розвитку технічного сервісу машин АПК. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 145. С. 3-7.
10. Молодик М. В. Наукові основи системи технічного обслуговування і ремонту машин. Кіровоград: КОД, 2009. 180 с.
11. Молодик М. В., Моргун А. М., Шаповал Л. І., Єна О. В. Організаційні форми технічного сервісу та прогноз їх розвитку в ринкових умовах господарювання в агропромисловому комплексі України. Київ: Рекомендації, 2001. 170 с.
12. Сидорчук О. В., Семерак М. М., Кузьмінський Р. Д., Барабаш Р. І. Концепція управління проектом технічного обслуговування тракторів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2008. № 12, т. 1. С. 16-21.
13. Сидорчук О. В., Кузьмінський Р. Д., Барабаш Р. І., Михалюк М. А. Обґрунтування виробничої структури пунктів технічного обслуговування тракторів ХТЗ. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2013. № 17. С. 54-64.
14. Войтюк В. Д., Рубльов В. І., Роговський І. Л. Системні принципи забезпечення якості технічного сервісу сільськогосподарської техніки: монографія. Київ: НУБіП України, 2016. 360 с.
15. Портнов В. И. Повышение эффективности технического сервиса мобильной сельскохозяйственной техники машинно-технологических станций: дисс. ... канд. техн. наук, Уфа, 2008. 140 с.
16. Аулин В.В., Ливецкий А., Замота О., Гринькив А. Повышение эффективности использования мобильной сельскохозяйственной техники на предприятиях АПК. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol.18. No.2. P. 117-122.
17. Аулін В.В., Лівіцький О.М. Інформаційне забезпечення в системі технічного сервісу, діагностичного моніторингу та охорони праці в с/г виробництві. *Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин*. Кіровоград:КНТУ. 2009. Вип.39. С. 287-291.
18. Аулін В.В., Жулай О.Ю., Лівіцький О.М. Порівняльний аналіз технічного стану дизелів засобів транспорту в АПК при планово-попереджувальній та адаптивній стратегії ТОР. *Науковий вісник Луганського нац. аграр. університету. Серія: Технічні науки*. Луганськ:Вид-во ЛНАУ, 2009. №2. С.5-8.
19. Аулін В.В., Лівіцький О.М. Система трибомоніторингу технічного стану МСГТ – інженерно-технічне рішення її безпеки. *Суднова енергетика: стан та проблеми*: Матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, науковців та фахівців. Миколаїв: НУК, 2009. С. 182-184.
20. Аулін В.В., Ігнатенко С.Г., Лівіцький О.М. та ін. Діагностичний моніторинг технічного стану дизелів транспортних засобів у с/г виробництві. *Молодеж і с/х техніка в XXI столітті*: матеріали VI-го міжнарод. форуму молодежи. Харків: ХНТУСХ. 2010. С. 94.
21. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лівіцький О.М. Математичний апарат для оцінки діагностичних параметрів та визначення оптимальної їх кількості. *Автомобіль і електроніка. сучасні технології*. матеріали IV міжнародної науково-технічної інтернет-конференції. Харків. 2015. С. 126-128.

22. Бут Г.П., Коноводов В.В., Мальшко А.А. и др. Формирование структуры информационной системы технического сервиса в АПК. *Техника в сельском хозяйстве*. 2002. №4 С.33-35.
23. Аулін, В.В., Лівіцький О.М., Замота О.М. Методологія вибору та управління ефективністю використання техніки у сільськогосподарському виробництві. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кіровоград: КНТУ, 2016. Вип. 29. С. 3-12.
24. Аулін В.В., Замота Т.М., Гриньків А.В., Лівіцький О.М., Замота О.М. Перспективність впровадження системи технічного обслуговування і ремонту мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки з елементами прогнозування. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 245-246.
25. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Принципи побудови та функціонування кіберфізичної системи технічного сервісу автотранспортної та мобільної сільськогосподарської техніки. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків: ХНТУСГ, 2020. № 22. С. 162-174.
26. Наявність сільськогосподарської техніки та енергетичних потужностей у сільському господарстві у 2016 році: стат. бюл. *Державна служба статистики України*. Київ, 2017-2020.
27. Кушнарєв Л.И. Организация технического сервиса на МТС. *Тракторы сельскохозяйственные машины*. 2002. №1. С. 36-38.
28. Черноиванов В.И. Стратегия развития технического сервиса в АПК. *Техника в сельском хозяйстве*. 2004. №3. С. 3-6.

## References

1. Artyushin, A.A. (2003). Osnovnyie itogi napravleniya razvitiya agroinzhenernoy nauki [The main results of the direction of development of agroengineering science] *Tekhnika v selskom hozyaystve – Machinery in agriculture*. 4. 3-6 [in Russian].
2. Aulin, V.V., Hryniv, A.V., Lysenko, S.V. et al. (2020). Pryntsypy pobudovy ta funktsionuvannya kiberfizychnoy systemy tekhnichnoho servisu avtotransportnoi ta mobilnoi silskohospodarskoi tekhniky [Principles of construction and functioning of cyberphysical system of technical service of motor transport and mobile agricultural machinery]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*. 22. 162-174 [in Russian].
3. Aulin, V.V., Livitskyi, O.M. & Zhulai, O.Iu. (2007). Stan problemy pidvyshchennia efektyvnosti tekhnichnoho servisu SHT v novykh umovakh hospodariuvannya [The state of the problem of increasing the efficiency of technical service of HRT in the new economic conditions]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s/h mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*. Vol. 37. 158-162 [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V., Zhulai, O.Iu. & Livitskyi, O.M. (2007). Transportni zasoby v ahropromyslovomu kompleksi ta systema diahnostychnoho monitorynhu yikh tekhnichnoho stanu [Vehicles in the agro-industrial complex and the system of diagnostic monitoring of their technical condition]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s/h mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery*. Vol.37. 146-154 [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V. & Livitskyi, O.M. (2010). Kontseptsiiia upravlinnia tekhnichnym stanom i bezpekoiu ekspluatatsii transportnykh zasobiv silskohospodarskoho vyrobnytstva [The concept of management of technical condition and safety of operation of agricultural vehicles]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. Volodymyra Dalia – Bulletin of the East Ukrainian National University. Vladimir Dahl*. 6(148). 173-177 [in Ukrainian].
6. Aulin, V.V., Hryniv, A.V. & Livitskyi, O.M. (2015). Pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi ta avtotransportnoi tekhniky silskohospodarskoho vyrobnytstva na osnovi diahnostyky yikh stanu [Improving the reliability of mobile and motor vehicles of agricultural production based on the diagnosis of their condition]. *Problems of design, production and operation of agriculture techniques: materialy X Mizhnar. nauk.-praktychnoi konferentsii – materials X International. scientific-practical conference*. Kirovohrad: KNTU [in Ukrainian].
7. Lezin, P.P. & Komarov, V.A. (2004). Formirovanie strukturyi, soderzhaniya i pravil na znacheniya remontnykh rabot [Formation of structure, maintenance and rules on values of repair work]. *Traktory i selskohozyaystvennyie mashyny – Tractors and agricultural machinery*. 3. 45-48 [in Russian].
8. Severnyiy, E. A., Bidnin, V. V., Olhovatskiy, A. I. et al. (2000). Metodicheski osobennosti opredeleniya parametrov tehniceskoy strukturyi MTS [Methodologically features of definition of parameters of

- technical structure of MTS]. *Mehanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo hozyaystva – Mechanization and electrification of agriculture. 1.* 2-6 [in Russian].
9. Kozachenko, O.V. (2014). Problemy ta perspektyvy rozvytku tekhnichnoho servisu mashyn APK [Problems and prospects for the development of technical service of agricultural machinery]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka – Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. Vol. 145.* 3-7 [in Ukrainian].
  10. Molodyk, M.V. (2009). Naukovi osnovy systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu mashyn. Kirovohrad: KOD [in Ukrainian].
  11. Molodyk, M.V., Morhun, A.M., Shapoval, L.I. & Yena, O.V. (2001). Orhanizatsiini formy tekhnichnoho servisu ta prohnoz yikh rozvytku v rynkovykh umovakh hospodariuvannya v ahropromyslovomu kompleksi Ukrainy. Kyiv: Rekomendatsii [in Ukrainian].
  12. Sydoruk, O.V., Semerak, M.M., Kuzminskyi, R.D. & Barabash, R.I. (2008). Kontseptsiiia upravlinnia proektom tekhnichnoho obsluhovuvannya traktoriv [The concept of project management of tractors]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu: ahroinzhenerni doslidzhennia – Bulletin of Lviv National Agrarian University: agro-engineering research. 12, Vol.1.* 16-21 [in Ukrainian].
  13. Sydoruk, O.V., Kuzminskyi, R.D., Barabash, R.I. & Mykhaliuk, M.A. (2013). Obruntuvannya vyrobnychoi struktury punktiv tekhnichnoho obsluhovuvannya traktoriv KhTZ [Substantiation of the production structure of maintenance points for HTZ tractors]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu: ahroinzhenerni doslidzhennia – Bulletin of Lviv National Agrarian University: agro-engineering research. 17.* 54-64 [in Ukrainian].
  14. Voitiuk, V.D., Rublov, V.I. & Rohovskyi, I.L. (2016). *Systemni pryntsypy zabezpechennia yakosti tekhnichnoho servisu silskohospodarskoi tekhniki [System principles of quality assurance of technical service of agricultural machinery]*. Kyiv: NUBiP Ukrainy [in Ukrainian].
  15. Portnov, V.I. (2008). Povyshenie effektivnosti tehniicheskogo servisa mobilnoy selskohozyaystvennoy tehniki mashinno-tehnologicheskikh stantsiy [Improving the efficiency of technical service of mobile agricultural machinery of machine-technological stations]. *Candidate's thesis.* Ufa [in Russian].
  16. Aulin, V.V., Livitskiy, A., Zamota, O. & Grinkiv, A. (2016). Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya mobilnoy selskohozyaystvennoy tehniki na predpriyatiyah APK. [Improving the efficiency of mobile agricultural machinery at agricultural enterprises] *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Vol.18, No.2.* 117-122 [in Russian].
  17. Aulin, V.V. & Livitskiy, O.M. (2009). Informatsiine zabezpechennia v systemi tekhnichnoho servisu, diahnostychnoho monitorynhu ta okhorony pratsi v s/h vyrobnytstvi [Information support in the system of technical service, diagnostic monitoring and labor protection in agricultural production]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia s/h mashyn – Design, manufacture and operation of agricultural machinery. Vol.39.* 287-291 [in Ukrainian].
  18. Aulin, V.V., Zhulai, O.Iu. & Livitskiy, O.M. (2009). Porivnialnyi analiz tekhnichnoho stanu dyzeliv zasobiv transportu v APK pry planovo-poperedzhuvalnii ta adaptivnii stratehii TOR [Comparative analysis of the technical condition of diesel vehicles in the agro-industrial complex with a planned warning and adaptive maintenance strategy]. *Naukovyi visnyk Luhanskoho nats. ahrar. universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – Scientific Bulletin of Luhansk National University agrarian. university. Series: Technical Sciences. 2.* 5-8 [in Ukrainian].
  19. Aulin, V.V. & Livitskiy, O.M. (2009). Systema trybomonitorynhu tekhnichnoho stanu MSHT – inzhenerno-tekhnichne rishennia yii bezpeky [Tribomonitoring system of technical condition of MSGT is an engineering and technical solution of its safety]. *Ship energy: state and problems: Materialy IV mizhnar. nauk.-tekhn. konf. studentiv, aspirantiv, naukovtsiv ta fakhivtsiv – Proceedings of the IV International. scientific and technical conf. students, graduate students, scientists and professionals.* Mykolaiv: NUK, S.182-184 [in Ukrainian].
  20. Aulin, V.V., Ihnatenko, S.H., Livitskiy, O.M. et al. (2010). Diahnostychnyi monitorynh tekhnichnoho stanu dyzeliv transportnykh zasobiv u s/h vyrobnytstvi [Diagnostic monitoring of the technical condition of diesel vehicles in agricultural production]. *Youth and agricultural machinery in the XXI century: materyaly VI-ho mezhdunar. foruma molodezhy – materials of the VI international. youth forum.* Kharkov: KhNTUSKh, 94 [in Ukrainian].
  21. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Livitskiy, O.M. (2015). Matematychnyi aparat dlia otsinky diahnostychnykh parametrov ta vyznachennia optimalnoi yikh kilkosti [Mathematical apparatus for estimating diagnostic parameters and determining their optimal number]. *Car and electronics. modern technology. materialy IV mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii – materials of the IV international scientific and technical Internet conference.* Kharkiv, 126-128 [in Ukrainian].
  22. But, G.P., Konovodov, V.V., Maltshko, A.A. et al. (2002). Formirovanie struktury informatsionnoy

- sistemyi tehniceskogo servisa v APK [Formation of the structure of the information system of technical service in the agro-industrial complex]. *Tehnika v selskom hozyaystve – Agricultural machinery. 4.* 33-35 [in Russian].
23. Aulin, V.V., Livitskyi O.M., Zamota O.M. (2016). Metodolohiia vyboru ta upravlinnia efektyvnosti vykorystannia tekhniki u silskohospodarskomu vyrobnytstvi [Methodology of selection and management of efficiency of use of equipment in agricultural production]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation. Vol. 29.* 3-12 [in Ukrainian].
  24. Aulin, V.V., Zamota, T.M., Hrynkiv, A.V., Livitskyi, O.M. & Zamota, O.M. (2017). Perspektyvnist vprovadzhennia systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki z elementamy prohnozuvannia [Prospects for the implementation of a system of maintenance and repair of mobile agricultural and motor vehicles with forecasting elements]. Problems of design, production and operation of agricultural machinery: *materialy XI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – materials of the XI International scientific-practical conference.* Kropyvnytskyi: TsNTU, 245-246 [in Ukrainian].
  25. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Lysenko, S.V. (2020). Pryntsypy pobudovy ta funktsionuvannia kiberfizychnoi systemy tekhnichnoho servisu avtotransportnoi ta mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki [Principles of construction and functioning of cyberphysical system of technical service of motor transport and mobile agricultural machinery]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes. 22.* 162-174 [in Ukrainian].
  26. Naiavnist silskohospodarskoi tekhniki ta enerhetychnykh potuzhnosti u silskomu hospodarstvi u 2016 rotsi: stat. biul. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Kyiv, 2017-2020 [in Ukrainian].
  27. Kushnarev, L.I. (2002). Organizatsiya tehniceskogo servisa na MTS [Organization of technical service on MTS]. *Traktoryi selskohozyaystvennyie mashyny – Tractors are agricultural machines. 1.* 36-38 [in Russian].
  28. Chernoiivanov V.I. (2004). Strategiya razvitiya tehniceskogo servisa v APK [Strategy of development of technical service in agrarian and industrial complex]. *Tehnika v selskom hozyaystve – Machinery in agriculture. 3.* 3-6 [in Russian].

**Oleksandr Livitskyi**, assistant

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Improving the Technical Service of Motor Vehicles in Terms of Agro-industrial Production**

The state of technical service of tractor equipment at the enterprises of agro-industrial production of Kirovograd region is considered. The tendencies of development of provision of agricultural production with various autotractor equipment are determined. The method of improving the quality of maintenance and repair of tractor equipment, improving its technical condition is considered. It is noted that the current condition, quality of equipment, its productivity and efficiency is not at the proper level, and therefore requires the transformation of the technical service system.

The perspective organization of technical service at the enterprises of various level in which demand and offers for technics, especially foreign is considered is offered. It is noted that the branded technical service is carried out by the manufacturer through service centers, the main of which is the trade and accumulation coordinating enterprise in the system of the manufacturer.

It is shown that the scheme of technical service should be based on the existing repair and maintenance base, the main directions in which the organization of works is carried out are specified.

The main provisions of the modernized technical service are formulated, as well as the need to build a complete management structure of the technical service system. It is shown that in modern conditions to increase the effective system of technical service the role and importance of operational management and information support grows, it is offered to enter the information department common to all enterprise into the management system of engineering service. The main stages of operational management at technical service enterprises are clarified.

**technical service, maintenance and repair, information support, tractor equipment, system**

*Одержано (Received) 11.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 17.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 621.56:622.691.6:629.114 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).198-207](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).198-207)

**В.В. Клименко**, проф. д-р. техн. наук., **М.В. Босий**, викл., **В.В. Аулін**, проф. д-р. техн. наук, **І.І. Філімоніхіна**, доц. к.ф.-мат наук, **С. В.Лисенко**, доц, канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, ст. наук. співр., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*klytmvas@ukr.net; bosiytmv@ukr.net*

## Енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом при використанні газогідратного акумулятора

В роботі запропоновано схемно-конструктивне рішення заправки стиснутим природним газом в АГНКС з газогідратним акумулятором (АГНКС-ГА) та описано принцип її дії на конкретному прикладі. Показано, що в АГНКС-ГА з 4-ма ступенями компримування і акумуляторами стиснутого газу АСГ газ з ГА до АСГ рухається в з'єднувальному трубопроводі при адіабатних умовах з докритичною швидкістю, тобто менше, ніж швидкість звуку, оскільки відношення тисків  $p_{АСГ}/p_{ГА}$  більше критичного. Для характеристики енергоефективності заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом в АГНКС-ГА запропоновано використовувати коефіцієнт корисної дії заправки (ККД)  $\eta_{запр}^{га}$ . За результатами розрахунків показано, що енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом в АГНКС-ГА вище на 6%, ніж в традиційній АГНКС для тих же умов: відповідні значення коефіцієнтів корисної дії заправки  $\eta_{запр}^{га} = 0,47$  і  $\eta_{запр} = 0,41$ . Обгрунтовано можливість використання АГНКС-ГА для заправки пересувних автомобільних газових заправокників (ПАГЗ) без застосування додаткового компресорного обладнання.

**природний газ, автомобільний транспорт, АГНКС, газогідрати, тиск, температура, газогідратний акумулятор, енергоефективність, ККД заправки**

**Постановка проблеми.** Використання природного газу, основним компонентом якого є метан, в якості газомоторного палива для автомобільного транспорту є важливою альтернативою традиційним нафтовим газомоторним паливам [1].

Для заправки автомобілів або інших транспортних засобів, двигуни яких розраховані на роботу на стисненому (компримованому) природному газі, використовують, в основному, автомобільні газонаповнювальні компресорні станції (АГНКС). До АГНКС природний газ надходить по газопроводах під тиском 0,6-1,2 МПа, стискується до 25 МПа і через газорозподільну систему в такому стані направляється на заправку газових балонів транспортних засобів [1,2]. З метою підвищення ефективності в сучасних АГНКС для стиснення газу застосовують переважно 4-х ступеневі компресорні установки, що дозволяє більш оптимально здійснювати заправку балонів, початковий тиск газу в яких 0,2-0,4 МПа, шляхом часткового заповнення балонів після кожної ступені стискування [1]. При цьому після кожної ступені стискування газ спочатку направляється в акумулятори стиснутого газу (АСГ), а вже з них здійснюється подача газу на заправку балонів. Це стабілізує роботу компресорів, знижує частоту їх включення при спрощеній автоматизації АГНКС, але необхідно відмітити високу вартість АСГ, яка складає ~ 50% вартості всього обладнання АГНКС [1].

© В.В. Клименко, М.В. Босий, В.В. Аулін, І.І. Філімоніхіна, С. В.Лисенко, А.В. Гриньків, 2021

Відомо, що на заправку в АГНКС автомобілі поступають суттєво нерівномірно на протязі доби: відношення максимальної кількості автомобілів в денний період до мінімальної в нічний становить  $\sim 7$  [1]. Але традиційні схемно-конструктивні рішення із застосуванням АСГ не дають можливості зменшити нерівномірність споживання стиснутого природного газу при заправці автомобілів в денний і нічний періоди доби, що призводить до оснащення АГНКС обладнанням завищеної продуктивності та понижує ефективність його використання [1].

В роботі [2] запропоновано здійснювати заправку автомобільного транспорту природним газом із застосуванням газогідратної технології для процесів стискування та акумулювання газу, що дозволяє підвищити ефективність використання АГНКС при неоднаковому споживанні стиснутого природного газу в денний і нічний періоди доби.

Для реалізації цієї технології використовується газогідратний акумулятор, в якому газ низького тиску контактує з водою або водним розчином в замкненому об'ємі при відповідній температурі з утворенням газогідратів, які зберігають та плавлять в цьому ж об'ємі з виділенням газу та води при більш високій температурі та відповідно більш високому тиску, ніж вони були утворені [3-6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [1] проведено дослідження термогазодинамічних процесів в традиційних АГНКС та розглянуті основні технологічні процеси.

Математична модель розрахунку необхідного числа і продуктивності заправних колонок на АГНКС з АСГ, розроблена з використанням теорії масового обслуговування, приведена в роботі [7]. Даний підхід також можна буде використовувати для розрахунку необхідного числа компресорів, акумуляторів, систем осушки і підготовки природного газу для заправки балонів автомобільного транспорту.

В роботі [8] запропонована нова схема комутації газорозподільних ліній на АГНКС, алгоритм управління компресорним обладнанням і розглянуто умови роботи динамічного секційного акумулятора газу з регулюванням по об'єму.

Математична модель робочого процесу лінії нагнітання з використанням багатоступневих поршневих компресорів, фізико-математична модель руху газу на лінії високого тиску та математична модель заправки в балони автомобільного транспорту стиснутого газу приведені у роботі [9].

В згаданих вище роботах розглядаються різні варіанти заправки автомобільного транспорту стиснутим газом в АГНКС з традиційними АСГ.

Авторами [2] описано схемне рішення АГНКС з газогідратним акумулятором (ГА), визначено термодинамічні параметри реперних точок процесів циклу для конкретного складу природного газу, розраховано питомі енерговитрати в денний і нічний періоди роботи.

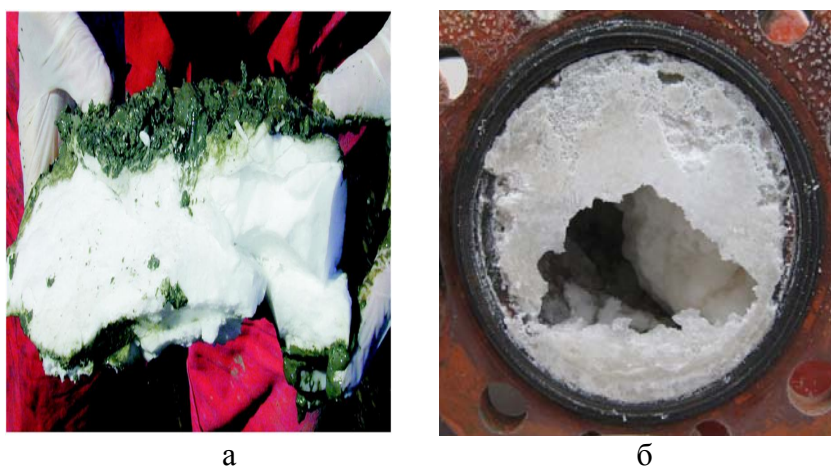
За результатами досліджень визначено, що застосування ГА в АГНКС дозволяє не тільки зробити більш рівномірним добове навантаження на обладнання АГНКС, а і зменшити добове енергоспоживання.

Але в роботі не розглянуто схемно-конструктивні рішення газогідратного акумулятора, не проаналізовано особливості термодинамічних процесів роботи ГА в режимах зарядки і розрядки та не визначено енергоефективність саме заправки в балони стиснутого газу при використанні ГА.

**Постановка завдання.** Метою даної статті є розробка схемно-конструктивного рішення заправки стиснутим природним газом в АГНКС з газогідратним акумулятором ГА (АГНКС-ГА) та аналіз її енергоефективності.

**Виклад основного матеріалу.** Газові гідрати – це супрамолекулярні кристалічні сполуки включення клатратного типу, у яких “включені” у льодоподібну структуру води молекули неполярних або малополярних речовин утримуються ван-дер-ваальсовими силами. Такі сполуки здатні утворювати більшість газів, розмір молекул яких знаходиться в межах 3,8...9,2 Å, та їх суміші, і деякі органічні рідини. Термобаричні умови процесів утворення, зберігання і плавлення газогідратів є досить «м'якими», що дозволяє їх ефективно використовувати в різних технологічних напрямках, зокрема для виробництва та акумулювання холоду, стиснення газів, розділення газових сумішей, опріснення солоних вод тощо [10-12]. Слід відмітити, що газогідрати існують також в природних умовах, а за сучасними прогнозними оцінками більшість покладів вуглеводневих газів знаходиться саме в газогідратному стані [10-12, 14].

Зовнішній вигляд газогідратів техногенного та природного походження показано на рис.1.



а – природні газогідрати; б – техногенні газогідрати

Рисунок 1 – Зовнішній вигляд газових гідратів

*Джерело: на підставі [10-12]*

Технологія використання газогідратного акумулятора в АГНКС містить такі основні процеси: утворення газогідратів природного газу, їх накопичення та зберігання і плавлення з виділенням природного газу при високому тиску  $p = 25$  МПа, достатньому для повної заправки газових балонів автомобільного транспорту [2,13].

Дані, необхідні для розрахунку кінетики процесів утворення газогідратів природного газу можна знайти в роботах [15-18]. В них описано моделі механізмів зародження і росту газогідратів, напівемпіричні вирази для розрахунку швидкості утворення газогідратів.

Особливості механізму та кінетики розкладання газогідратів природного газу досліджено в роботах [15,16,19]. Визначено, що теплота розкладання гідрату метану ( $\text{CH}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ) на газ і воду складає 54,2 кДж/моль, наведено напівемпіричні вирази для розрахунку швидкості плавлення газогідратів.

Газогідратну технологію стиснення та зберігання газів, отриманих при регазифікації зрідженого природного газу, апробовано в Японії на дослідному заводі по виробництву газогідратних гранул продуктивністю п'ять тонн на добу [20].

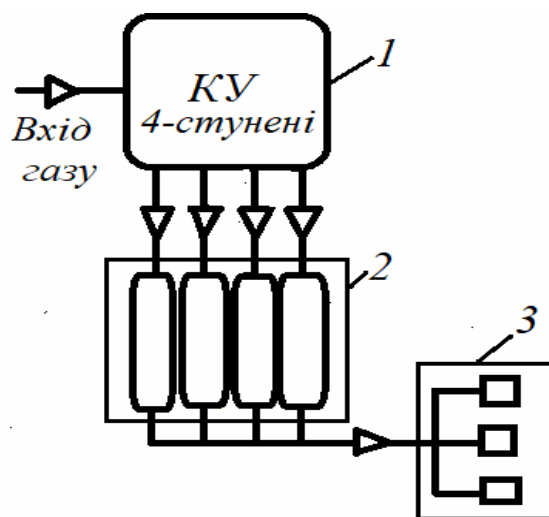
Аналіз роботи традиційних АГНКС з 4-ма ступенями стискування показує, що заправка газових балонів автомобілів починається з подачі газу з акумуляторів стиснутого газу (АСГ) при непрацюючих компресорах [1]. При пониженні тиску в



АСГ до значення технологічно нормованого, включаються в роботу компресори відповідної ступені стискування. Компресор останньої 4-ої ступені включається при пониженні тиску в АСГ-4 з 25 МПа до тиску остаточної заправки 21-22 МПа.

Використання загального акумулятора призводить до непродуктивної витрати 50% затраченої енергії на стискування, чому й застосовують дві, а частіше чотири ступені заправки автомобільного транспорту [1,9]. При цьому тиск в акумуляторних ємностях підтримується на меншому рівні, порівняно з робочим тиском в балонах автомобільного транспорту.

Схемне рішення заправки на традиційній АГНКС показано на рис. 2.



1 – компресорна установка (КУ) – чотири ступені; 2 – акумулятори стиснутого газу (АСГ) – чотири ємності (АСГ1-АСГ4); 3 – газобалонна установка автомобіля (ГБУ)

Рисунок 2 – Схема рішення заправки на традиційній АГНКС

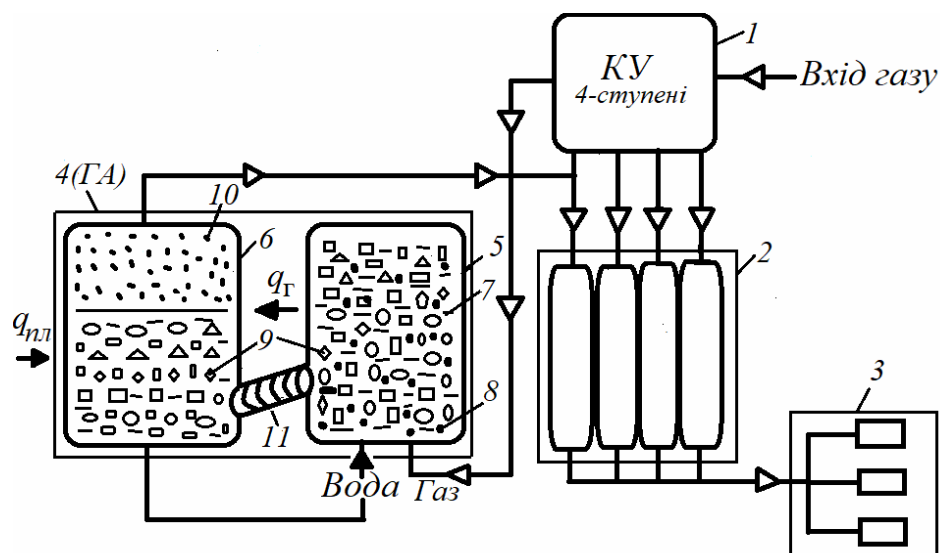
Джерело: розроблено авторами на підставі [1, 9].

За такою схемою реалізується ступенева заправка з використанням 4-х АСГ. Заправка здійснюється поступово із акумулятора більшої ємності з меншим тиском, а потім з акумулятора меншої ємності і більшим тиском.

Але, як було згадано вище, таке схемно-конструктивне рішення заправки на традиційній АГНКС, не дає можливості зменшити нерівномірність споживання стиснутого природного газу при заправці автомобілів в денний і нічний періоди доби, що призводить до використання обладнання завищеної продуктивності та знижує енергоефективність заправки.

Авторами в роботі [2] показано, що для вирішення цієї проблеми доцільно в АГНКС використовувати газогідратний акумулятор, який надає можливість в піковий денний період підвищити кількість заправок автомобілів на обладнанні АГНКС, розрахованому на середньодобову кількість заправок.

Нами пропонується схемно-конструктивне рішення заправки стиснутим газом в АГНКС з ГА (АГНКС-ГА), яке приведено на рис. 3.



1 – компресорна установка (КУ) – чотири ступені стискування; 2 – акумулятори стиснутого газу (АСГ1-АСГ4) чотири ємності; 3 – газобалонна установка автомобіля (ГБУ); 4 – газогідратний акумулятор (ГА); 5 – кристалізатор утворення газогідратів; 6 – плавитель газогідратів; 7 – вода; 8 – газ; 9 – газогідрати; 10 – газ високого тиску; 11 – гвинтовий шнек (екструдер)

Рисунок 3 – Схемно-конструктивне рішення заправки стиснутим газом в АГНКС - ГА  
Джерело: розроблено авторами

Роботу ГА при заправці стиснутим газом в АГНКС - ГА розглянемо на наступному прикладі. В нічний період, при меншому завантаженні АГНКС, природний газ з початковим тиском  $p = 1,2$  МПа і температурою  $t = 18$  °С спочатку подається в першу ступінь і компримується до тиску  $p = 3,5$  МПа, охолоджується і подається в акумулятор газу АСГ-1 для заправки балонів стиснутим газом або в другу ступінь, в якій газ компримується до тиску  $p = 7,5$  МПа. Газ при цьому тиску охолоджується і подається в акумулятор газу АСГ-2 для заправки балонів стиснутим газом або в третю ступінь, в якій газ компримується до тиску  $p = 15$  МПа. Стиснутий газ при цьому тиску охолоджується і подається в акумулятор газу АСГ-3 для заправки балонів стиснутим газом або в четверту ступінь, в якій газ компримується до тиску  $p = 25$  МПа. Надлишкова частина газу, що не використовується в цей період для заправки балонів стиснутим газом надходить в кристалізатор 5, де при контакті з водою утворюються газогідрати при тиску  $p = 7,5$  МПа і температурі  $t = 16$  °С, а теплота гідратуутворення  $q_{\Gamma}$  відводиться холодильною машиною (ХМ), яку на схемі не показано. Утворені газогідрати 9 накопичують та зберігають в кристалізаторі 5, або в окремій ємності, яка на рис. 3 не показана.

В піковий період, при збільшенні завантаження АГНКС, накопичені газогідрати 9 подають за допомогою гвинтового шнекового (екструдера) 11 до плавителя газогідратів 6, в якому здійснюється підігрівання і плавлення газогідратів при температурі  $t = 22$  °С і тиску  $p = 25$  МПа з виділенням газу 8 і води 7, шляхом підведення теплоти  $q_{\text{пл}}$  від охолодження газу після ступенів компресорного стиснення. Виділена вода подається в кристалізатор на повторне гідратуутворення, а отриманий газ при тиску  $p = 25$  МПа направляють в акумулятор газу АСГ 4, з якого здійснюється остаточне наповнення газових балонів стиснутим природним газом.

Потрібно відмітити, що плавити газогідрати 9 в плавителі 6 можливо і при тиску  $p = 30-35$  МПа та отримувати стиснутий газ при цьому тиску, але при плавленні газогідратів необхідно буде підтримувати більш високу температуру  $t = 26-28$  °С. Такий

режим роботи АГНКС-ГА дозволить без застосування додаткового компресорного обладнання заправляти пересувні автомобільні газові заправники (ПАГЗ), в яких оптимальні значення максимального тиску знаходяться в межах 32-35 МПа [1]. В роботах [21,22] показано, що ПАГЗ доцільно використовувати для заправки техніки, яка знаходиться на відстанні більше 20 км від АГНКС.

Проведений аналіз показав, що в процесі подачі газу з ГА в АСГ він рухається в з'єднувальному трубопроводі при адіабатних умовах з докритичною швидкістю, тобто менше, ніж швидкість звуку, оскільки відношення тисків  $p_{АСГ}/p_{ГА}$  більше критичного, значення якого в першому наближенні можна прийняти  $\beta_{кр} = 0,546$  [23].

Виконані для наведених вище умов розрахунки за відомими термодинамічними рівняннями для потоку газу в докритичному режимі руху, без врахування втрат [23], показали, що швидкість руху по з'єднувальному трубопроводу діаметром  $d = 15$  мм має значення  $w = 793$  м/с. Це забезпечить питому подачу газу з ГА в АСГ на рівні  $m = 0,178$  кг/с.

В роботі [1] коефіцієнт корисної дії заправки балонів через ємність-аккумулятор газу  $\eta_{запр}$  визначають як відношення мінімальної роботи  $L_{min}$  на стиск газу для заповнення балонів за наявності холодильника, що підтримує постійною температуру газу, до затраченої роботи  $L_{затр}$ . Після нескладних математичних перетворень автори отримали для розрахунків  $\eta_{запр}$  наступний вираз:

$$\eta_{запр} = \frac{\frac{k}{2k-1} \left( \frac{p_p}{p_{вс}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\left( \frac{p_e}{p_{вс}} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \cdot \frac{\frac{p_p}{p_{вс}} - 1}{\frac{p_e}{p_{вс}}}, \quad (1)$$

де  $p_{вс}$  і  $p_p$  – відповідно тиск всмоктування компресора і робочий тиск в балонах, МПа;

$p_e$  – тиск в ємності-аккумуляторі, МПа;

$k$  – показник адіабати для природного газу.

Але у випадку застосування ГА при визначенні  $L_{затр}$  потрібно враховувати затрати енергії в холодильній машині, яка забезпечує необхідні умови для утворення та накопичення газогідратів, що не дозволяє використовувати вираз (1) для розрахунку коефіцієнта корисної дії заправки балонів АГНКС-ГА. Тому нами для розрахунків  $\eta_{запр}^{га}$  – коефіцієнта корисної дії заправки балонів через ємність-аккумулятор газу із застосуванням ГА, пропонується такий вираз:

$$\eta_{запр}^{га} = \frac{e_{пр.г.}^{ст}}{I_k^{к.ст} + I_{ГТ}^{ст}}, \quad (2)$$

де  $e_{пр.г.}^{ст}$  – питома ексергія стиснутого газу в балоні при середніх значеннях робочих термодинамічних параметрів, кДж/кг;

$I_k^{к.ст} = I_{k1}^{к.ст} + I_{k2}^{к.ст}$  – питома робота на компримування газу в 1-й і 2-й ступенях компресорного стискування, кДж/кг;

$I_{ГТ}^{ст} = I_{ХМ}$  – питома робота газогідратного стискування природного газу, що дорівнює питомій роботі холодильної машини  $I_{ХМ}$ , кДж/кг.

Енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом при використанні газогідратного акумулятора визначалася для умов наведеного вище прикладу роботи АГНКС-ГА за величиною коефіцієнта  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}}$ . Для порівняння при цих же умовах визначалася і енергоефективність заправки в традиційній АГНКС за величиною коефіцієнта  $\eta_{\text{запр}}$ .

Величини, що необхідні для розрахунку  $\eta_{\text{запр}}$  за формулою (1) і  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}}$  за формулою (2), визначалися згідно методикам, наведеним в роботах [1, 2, 23].

За результатами виконаних розрахунків було визначено, що  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}} = 0,47$ , а  $\eta_{\text{запр}} = 0,41$ , тобто енергоефективність заправки автомобільного транспорту в АГНКС-ГА на 6% вища, ніж в традиційній АГНКС.

Отже використання ГА дозволяє не тільки підвищити ефективність використання обладнання АГНКС в умовах роботи при нерівномірній добовій заправці автомобільного транспорту, а і підвищити енергоефективність заправки автомобільного транспорту.

#### Висновки.

1. Запропоновано схемно-конструктивне рішення заправки стиснутим газом в АГНКС з газогідратним акумулятором та на конкретному прикладі розглянуто принцип її дії.

2. Визначено, що в процесі подачі газу з ГА в акумулятор стисненого газу АСГ він рухається в з'єднувальному трубопроводі при адіабатних умовах з докритичною швидкістю, тобто менше, ніж швидкість звуку, оскільки відношення тисків  $p_{\text{АСГ}}/p_{\text{ГА}}$  більше критичного, значення якого в першому наближенні можна прийняти  $\beta_{\text{кр}} = 0,546$ . Виконані для умов розглянутого прикладу розрахунки показали, що швидкість руху по з'єднувальному трубопроводу діаметром  $d = 15$  мм має значення  $w = 793$  м/с і це забезпечить питому подачу газу з ГА в АСГ на рівні  $m = 0,178$  кг/с.

3. Запропоновано вираз для розрахунку  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}}$  – коефіцієнта корисної дії заправки балонів через ємність-акумулятор стиснутого газу із застосуванням ГА.

4. За результатами розрахунків показано, що енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом в АГНКС-ГА вище на 6%, ніж в традиційній АГНКС для тих же умов: відповідні значення коефіцієнтів корисної дії заправки  $\eta_{\text{запр}}^{\text{га}} = 0,47$  і  $\eta_{\text{запр}} = 0,41$ .

5. Показано, що в АГНКС-ГА можна розкладати газогідрати в плавителі при температурі 26-28 °С та отримувати стиснутий газ при тиску  $p = 30-35$  МПа. Такий режим роботи АГНКС-ГА дозволить без застосування додаткового компресорного обладнання заправляти пересувні автомобільні газові заправники (ПАГЗ), в яких оптимальні значення максимального тиску знаходяться в межах 32-35 МПа.

#### Список літератури

1. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Костів В.В., Михалків В.Б. Автомобільні газонаповнювальні компресорні станції (АГНКС): монографія. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2014. 320 с.
2. Підвищення ефективності автомобільної газонаповнювальної компресорної станції шляхом застосування газогідратного акумулятора. / М.В. Босий та ін. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2021. №57(1). С. 45-54. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i1.1978> (дата звернення: 02.04.2021)
3. Клименко В.В., Босий М.В., Парафійник В.П., Прилипко С.О. Газотурбінний привід з газогідратним дотискувачем паливного газу. *Холодильна техніка та технологія*. 2014. № 4(150). С. 37-40.

4. Клименко В.В. Научно-технические основы газогидратной технологии (термодинамика та кінетика процесів, схемні рішення): автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.14.06. Київ, 2012. 40 с.
5. Онищенко В.О., Клименко В.В. Застосування газогидратних технологій в нафтогазовій промисловості. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 4(41). С. 5-8.
6. Klymenko V.V., Bosiy M.V., Yakymenko M.S., Martynenko V.V. Application of gas hydrated battery in automobile gas-containing compressor station . *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference. Conference proceedings, December 27-28, 2017*. Radom: Izdevnieciba "Baltija Publishing". P. 156-159.
7. Евстифеев А.А. Математическая модель процесса заправки транспортных средств КПГ на АГНКС. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2014. № 1 (37). С. 24-31.
8. Евстифеев А.А., Никорук И.Ф., Математическое моделирование режимов работы и производственных процессов АГНКС . *Транспорт на альтернативном топливе*. 2018. № 3 (63). С. 25-38.
9. Евстифеев А.А. Математическое моделирование производственных процессов АГНКС . *Транспорт на альтернативном топливе*. 2017. № 6 (60). С. 43-52.
10. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов, Москва: Недра, 1974. 208 с.
11. Макогон Ю.Ф. Газогидраты, история изучения и перспективы освоения . *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2010. № 2. С. 5-21.
12. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases . CRC Press, 2008. 752 p.
13. Клименко В.В., Босий М.В. Патент на корисну модель Україна, №134025 МПК F04B1/00, F25B1/00 Спосіб заправки автомобільного транспорту природним газом // u201812187; заявл. 10.12.2018; опубл. 25.04.2019, бюл. №8/2019.
14. Koltun P., Klymenko V. Methane hydrates – Australian perspective / *Mining of Mineral Deposits*, 2016 Volume 10, Issue 4, P.11-18. <https://doi.org/10.15407/mining10.04.011> (Last accessed: ...)
15. Бондаренко В.І., Витязь О.Ю., Зоценко М.Л. Газогідрати. Гідратоутворення та основи розробки газових гідратів; монографія. Дніпропетровськ. Літограф, 2015. 219с.
16. Истомина В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях, М: Недра, 1992. 236 с.
17. Vysniaukas A.A. P. R. Bichnoi. Kinetic study of methane hydrate formation. *Chem. Eng. Sci*, 1983. Vol.38. P.1061-1072.
18. Englezos P., Kalogerakis N., Dholabhai P.D., Bishnoi P.R. Kinetics of formation of methane end ethane gas hydrates. *Chem. Eng. Sci*, 1987. Vol.42. P.2647-2658.
19. Семенов М.Е., Калачова Л.П., Шиц Е.Ю., Рожин И.И. Разложение природного газа в присутствии метанола . *Химия в интересах устойчивого развития*. 2010. №18. С.153-157.
20. Horiguchi K., Watanabe S., Moriya H., Nakai S. Completion of natural gas hydrate overland transportation demo project // *Proceedings of the 7 th International Conference on gas hydrates*. - Edinburgh, Scotland, 2011.
21. Гавриш В.І. Оцінка ефективності застосування автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій у сільськогосподарському виробництві . *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2006. Вип. № 4. С. 66-71.
22. Сидоров Н. Метановые микрозаправки . *АГЗК+АТ*. 2008. №4 (40). С. 35-37.
23. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика, М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 496 с.

## References

1. Grudz, V.Ya., Grudz, Ya.V., Kostov, V.V. & Mikhalkov, V.B. (2014) Automobile gas filling compressor stations (AGNKS): monograph. Ivano-Frankivsk: Lileya-NV, 320 [in Ukrainian].
2. Bosiy M.V., Klymenko V.V. Magopets S.O., Garaseva N.Yu., Ovcharenko A.O. (2021) Improving the efficiency of the automobile gas-filling compressor station by using a gas-hydrate battery. *Refrigeration Engineering and Technology*, № 57 (1) .45-54 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15673/ret.v57i1.1978>
3. Klymenko V.V., Bosiy M.V., Parafinyuk V.P., Prilipko S.O. (2014) Gas turbine drive with gas-hydrated fuel gas distributor // *Refrigeration equipment and technology*, № 4(150). 37-40 [in Ukrainian].
4. Klymenko V.V. (2012) Scientific and technical bases of gas-hydrated technology (thermodynamics and kinetics of processes, circuit decisions: the dissertation author's abstract of the doctor of technical sciences: 05.14.06. K. 40 [in Ukrainian].
5. Onychenko V.O., Klymenko V.V. (2011) The application of gas-hydrate technologies in the oil and gas-industry // *Exploration and development of oil and gas deposits*, № 4(11). 5-8 [in Ukrainian].
6. Klymenko V.V. Application of gas hydrated battery in automobile gas-containing compressor station / Klymenko V.V., Bosiy M.V., Yakymenko M.S. Martynenko V.V. (2017) // *International research and practice conference "Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of*

- technical sciences”: Conference proceedings, December 27-28, Radom: Izdavniceiba “Baltija Publishing”.156-159 [in Poland].
7. Evstifeev A.A. (2014) Mathematical model of the process of refueling CNG vehicles at CNG stations // Transport on alternative fuels, № 1 (37). 24-31 [in Russian].
  8. Evstifeev A.A., Nikoruk I.F. (2018) Mathematical modeling of operating modes and production processes of CNG stations // Transport on alternative fuels, № 3 (63). 25-38 [in Russian].
  9. Evstifeev A.A. (2017) Mathematical modeling of CNG production processes // Transport on alternative fuels, № 6 (60). 43-52 [in Russian].
  10. Makogon Yu.F. (1974) Hydrates of natural gases, M: Subsoil, 208 [in Russian].
  11. Makogon Yu.F. (2010) Gas hydrates, history of study and prospects of development // Geology and minerals of the World ocean, № 2. 5-21[in Russian].
  12. Sloan E.D., Koch C.A. (2008) Clathrate hydrates of natural gases // CRC Press, 752 p [in USA].
  13. Klymenko V.V., Bosiy M.V. (2019) Patent for utility model Ukraine, №134025 IPC F04B1 / 00, F25BJ1 / 00 Method of refueling motor transport with natural gas // u201812187; declared 12/10/2018; publ. 25.04.2019, bldg. №8 / 2019 [in Ukrainian].
  14. Koltun P., Klymenko V. (2016) Methane hydrates – Australian perspective / Mining of Mineral Deposits, Volume 10, Issue 4,11– 18. <https://doi.org/10.15407/mining10.04.011>
  15. Bondarenko V.I., Vityaz O.Y., Zotsenko M.L. Gashydrates. (2015) Hydrate formation and basics of gas hydrates development; monograph, Dnepropetrovsk. Lithograph. 219 [in Ukrainian].
  16. Istomin V.A., Yakushev B.C. (1992) Gas hydrates in natural conditions. M: Nedra. 236 [in Russian].
  17. Vysniauskas A.A. (1983) Kinetic study of methane hydrate formation / A. Vysniauskas, P. R. Bichnoi //Chem. Eng. Sci, V.38. 1061-1072 [in Canada].
  18. Englezos P., Kalogerakis N., Dholabhai P.D., Bishnoi P.R. (1987) Kinetics of formation of methane end ethane gas hydrates./ P. Englezos, N. Kalogerakis, P.D. Dholabhai, P.R. Bishnoi // Chem. Eng. Sci. V.42. 2647-2658 [in Canada].
  19. Semenov M.E., Kalachova L.P., Shits E.Yu., Rozhin I.I. (2010) Decomposition of natural gas in the presence of methanol // Chemistry in the interests of sustainable development, №18.153-157 [in Russian].
  20. Horiguchi K., Watanabe S., Moriya H., Nakai S. (2011) Completion of natural gas hydrate overland transportation demo project // Proceedings of the 7th International Conference on gas hydrates. – Edinburgh, Scotland [in English].
  21. Gavrish V.I. (2006) Estimation of efficiency of application of automobile gas-filling compressor stations in agricultural production // Bulletin of agrarian science of the Black Sea region, Vip. № 4. 66-71[in Ukrainian].
  22. Sidorov N. (2008) Methane refueling // AGZK + AT, №4 (40). 35-37 [in Ukrainian].
  23. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheindlin A.E. (2016) Technical thermodynamics, M.: MEI Publishing House, 496 [in Russian].

**Vasyl Klymenko**, Prof., DSc., **Mykola Bosiy**, Sen. Lect., **Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Irina Filimonikhina** Assos. Prof., PhD of Phys.& Math. Sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Hrynkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **The energy efficiency of refueling automobile transport with compressed natural gas when using a gas hydrate accumulator**

The article briefly describes the processes carried out during the operation of the gas hydrate accumulator (GHA) at the automobile gas-filling compressor station (AGCS): formation of natural gas hydrates, their accumulation and storage, and melting with the release of natural gas at high-pressure  $p = 25\text{MPa}$ , sufficient for full refueling gas cylinders. The circuit-constructive solution of filling with compressed natural gas in AGCS-GHA is offered, and the principle of its work is described in a good example. It is shown that during AGCS-GHA operation with four compression stages and ACG compressed gas accumulators, the gas from GHA to ASG moves in the connecting pipeline at adiabatic conditions at subcritical speed, i.e., below the speed of sound, because the pressure ratio  $p_{\text{ASG}} / p_{\text{GHA}}$  coefficient is more critical. Calculations performed for these conditions by thermodynamic equations of gas flow in the subcritical mode of motion, without losses, showed that the velocity in a pipe with a diameter of  $d = 15\text{ mm}$  has a value of  $w = 793\text{ m/s}$ . This will ensure a specific gas supply from GHA to ASG at the level of  $m = 0.178\text{ kg/s}$ .

It is proposed to use the coefficient efficiency of refueling to characterize the energy efficiency of refueling vehicles with compressed natural gas in AGCS-GHA. According to the results of calculations, it is evident that the energy efficiency of refueling vehicles with compressed natural gas in AGCS-GHA is 6%

higher than in traditional AGCS at the same conditions: the corresponding values of coefficient refueling efficiency  $\eta_{\text{GHA}} = 0.47$  and  $\eta_{\text{AGCS}} = 0.41$ .

The article also illustrates that in the process of melting gas hydrates in GHA at a temperature of  $t = 26-28$  °C, one can get compressed natural gas at a pressure of  $p = 30-35$  MPa, which will use AGCS-GHA without additional compressor equipment for refueling mobile gas stations (PAGZ), in which the optimal values of the maximum pressure are in the range of 32-35 MPa.

*Одержано (Received) 06.03.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 24.03.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.072

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).208-221](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).208-221)**М.Є. Кристопчук**, доц., канд. техн. наук*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна**e-mail: m.ie.krystopchuk@nuwm.edu.ua*

### Аналіз індикаторів сталого розвитку міської пасажирської транспортної системи

Проведено аналіз результатів досліджень функціонування пасажирської транспортної системи громадського транспорту міста Рівне в розрізі розвитку принципів сталої міської мобільності. Використання системи індикаторів сталого розвитку міської пасажирської транспортної системи дозволяє провести оцінку поточної ситуації в місті та окреслити перспективні напрямки удосконалення системи громадського транспорту у взаємозв'язку з просторовим розвитком міських територій з метою забезпечення комфортного пересування мешканців для задоволення трудових та культурно-побутових пересувань.

**міський пасажирський транспорт, транспортна система, сталий розвиток, індикативні показники, матриця пасажирських кореспонденцій, ефективність**

**Постановка проблеми.** Встановлення основних атрибутів мобільності населення один із найважливіших показників розвитку міських територій, який досліджували вітчизняні і закордонні вчені для використання у практиці транспортного планування міст та розвитку сталих транспортних систем. Характеристики мобільності також є важливим джерелом та результатом для розроблення змін у генплані міста та створення нових управлінських рішень у експлуатації та функціонуванні маршрутної мережі міського пасажирського транспорту.

Однак, на сучасному етапі виконання транспортних досліджень пересувань міського населення потребує врахування показників сталого розвитку транспортних систем міст.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблему розподілу пасажирських переміщень між транспортними районами міст досліджували Горбачов П.Ф., Доля В.К., Вдовиченко В.А., Лобашов О.О., Любий Є.В., Россолов О.В. та інші дослідники. Відправною інформацією для оцінки матриць кореспонденцій у працях дослідників є кількість пасажирів, що входять і виходять з транспортного засобу на кожному зупиночному пункті пасажирського громадського транспорту. Серед закордонних науковців, що займалися цією тематикою, варто відзначити Н. Оппенхайма, Ю. Шеффі, Ж. Ортузара, Д. Лозе, Д. Дрю та інші.

Сучасні наукові дослідження закономірностей пересування населення базуються, в основному, на статистичних матеріалах, отриманих у результаті вибіркового комплексного транспортного обстеження міста [1 - 4]. Існують прямі методи отримання матриць через анкетні опитування мешканців міста (потребують багато часу, коштів та залежать від бажання людей брати участь в опитуванні) [5, 6] і непрямі, що передбачають розрахунок матриць кореспонденцій через обсяги відправлень і прибуття з використанням моделей розподілу пересувань між парами транспортних зон [3 - 7].



Моделі розподілу пересувань призначені для отримання даних прогнозування вибору місця призначення пересування на основі інформації про потужність генерування та привабливості кожної зони і загальної вартості пересування між ними.

У більшості випадків, попит населення на пересування з різною метою формується у вигляді матриць кореспонденцій – кількісної характеристики пересувань у межах території планування, елементами якої є обсяги пересувань (автомобілів чи пасажирів за годину) між кожною парою умовних транспортних зон. Всі кореспонденції, що здійснюються у мережі території планування, умовно поділяють на окремі групи - за цілями пересувань, за вибором типу та маршруту пересування [1 - 3].

Серед груп пересувань з різними цілями найбільш важливими є [1, 2, 3 - 7, 9 – 18]: пересування від місця проживання до місця прикладання праці (навчання) і в зворотному напрямку (трудова кореспонденція); пересування від місця проживання до місць культурно-побутового обслуговування і у зворотному напрямку; пересування між місцями праці (ділові поїздки); пересування між об'єктами культурно-побутового обслуговування.

Для кожної із цих груп пересувань будується окрема матриця міжзональних кореспонденцій, вхідною інформацією для побудови якої є загальні обсяги прибуття і відправлення у кожній зоні. Виділяють такі типи пересувань: громадським транспортом; власним автомобілем; велосипедом або пішки. Вибраний тип пересування не змінюється на етапі розподілу кореспонденцій по мережі. Процедура вибору користувачем маршруту пересування передбачає два етапи [4 - 9]. Перший - вибір типу пересування (модальний вибір). Другий - вибір маршруту пересування, який здійснюється на основі певного критерію оцінки маршруту (критеріальний вибір). Модальний вибір реалізується на етапі розрахунку кореспонденцій, критеріальний вибір – на етапі розподілу кореспонденцій по мережі.

Для моделювання комплексного завантаження мережі з урахуванням дії різних чинників всі користувачі поділені на класи, для кожного з яких розраховується окрема матриця кореспонденцій та здійснюється їх розподіл по мережі. Серед впливових чинників такі [4, 5], як: стохастичність процесів формування пасажирських потоків; відсутність математичного опису визначення основних причиннонаслідкових зв'язків процесу вибору суб'єктом пари «житло-робота»; нестационарність об'єктів у часі (зміни в планувальній структурі міста, міграції населення); складність збору початкової інформації про наміри суб'єктів, активність суб'єкту з його мотивами поведінки та цілями, невідтворюваність експериментів.

Існують, різні класифікації моделей та підходів до визначення попиту на послуги міського пасажирського транспорту, які можна сформувати в окремі групи [3 - 7, 9 - 14]: перша - моделі точкового попадання матриці кореспонденцій, до яких відносяться статистичні моделі, моделі сукупного попиту та дискретного вибору; друга група - інтервальна концепція формування матриці пасажирських кореспонденцій, згідно з якою попит на пересування описується певною кількістю матриць кореспонденцій.

Крім того, залежно від груп населення міста та обсягу наявних даних, виділяють три групи математичних моделей для визначення обсягу кореспонденцій [3 - 7, 9 – 18]:

- детерміновані (розглядають пересування у вигляді однозначної функції визначальних чинників);
- ймовірнісні (розглядають пересування у вигляді випадкових величин, що підпорядковуються статистичним закономірностям);
- евристичні (визначають динаміку зростання обсягів пересувань на основі евристичного пересування).

У працях [15, 25] методи визначення попиту на пересування сформовані у дві групи - моделі сукупного (aggregate demand models) та роздільного попиту (disaggregate demand models).

У сучасній практиці для розрахунку транспортних кореспонденцій між зонами міста поширені різні типи гравітаційних моделей (модель Н. Генрі, логіт-гравітаційна). Такі моделі базуються на аналогії з законом всесвітнього тяжіння. В них величини кореспонденцій прямо пропорційні обсягам відправлень з однієї транспортної зони і прибуття в іншу, і обернено пропорційні відстаням між ними [3 - 7, 9 – 18]. Ці моделі більш повно враховують зміни в розміщенні житлових і промислових районів, транспортної мережі, в системі культурно-побутового обслуговування населення.

Загальний вигляд гравітаційної моделі розрахунку матриці кореспонденцій [3 - 7, 9 – 18]:

$$h_{ijk} = \frac{HO_i \cdot HP_{jk} \cdot k_{jk} \cdot D_{ij}}{\sum_{j=1}^n (HP_{jk} \cdot k_{jk} \cdot D_{ij})}, \quad (1)$$

де  $h_{ijk}$  - кореспонденція між зонами  $i$  і  $j$  на ітерації  $k$ ;

$HO_i$  - обсяг відправлень з  $i$ -го центроїда;

$HP_{jk}$  - обсяг прибуття в  $j$ -й центроїд;

$k_{jk}$  - коефіцієнт балансування;

$D_{ij}$  - функція тяжіння між  $i$ -м та  $j$ -м центроїдами;

$n$  - кількість центроїдів мережі.

Введено також і обмеження для цієї формули, пов'язане з балансуванням за прибуттям та відправленням:

$$\sum HO_i = \sum HP_j. \quad (2)$$

Інший вигляд гравітаційної моделі [24] передбачає, що кореспонденції між районами визначаються за формулою:

$$h_{ij} = HO_i \cdot \frac{HP_j \cdot c_{ij} \cdot k_{ij}}{\sum_m HP_m \cdot c_{im} \cdot k_m}, \quad (3)$$

де  $HO$  - місткість транспортної зони за відправленням;

$HP$  - місткість транспортної зони за прибуттям;

$c_{ij}$  - функція тяжіння між  $i$ -ою і  $j$ -ою транспортними зонами;

$k_{ij}$  - калібрувальний коефіцієнт.

Очевидними перевагами гравітаційних моделей є доступність початкової інформації (кількість мешканців, відстань між транспортними районами), простота виконання розрахунків, як для існуючих умов міста, так і для прогнозування на перспективу, простота реалізації. Одним із головних недоліків – неврахування індивідуальних запитів населення.

Поряд з поширеними гравітаційними та ентропійними моделями у закордонній практиці набули застосування й інші імовірнісні методи розрахунку, зокрема модель, що використовує методи регресійного аналізу. Регресійний аналіз дає можливість ввести в розрахунок додаткові незалежні змінні, які дають змогу враховувати не лише

чисельність населення зони, дальність пересування, але й показник використання території та рівень автомобілізації [16 - 22].

У моделі Л. Ейнгорна враховуються розміри місць прикладання праці, проживання працюючих, тривалість пересування, поява нових трудових зв'язків тощо. Модель відображає зв'язок чинників-аргументів у вигляді добутку статичних функцій, показники і розподіл яких визначаються для існуючого положення на основі результатів обстеження [16 - 22]:

$$P_{ij} = A_i^d \cdot B_j^u \cdot t_{ij}^{-h} \cdot \left( \sum_1^h \sum_1^m A_i^a \cdot B_j^h \cdot t_{ij}^{-h} \right), \quad (4)$$

де  $P_{ij}$  - кількість пересувань із зони  $i$  в зону  $j$ ;

$A_i$  - трудове населення, що вибуває в інші зони до місць прикладання праці;

$B_j$  - чисельність населення, яка проживає в зоні;

$t$  - тривалість пересування;

$a, i, h$  - емпіричні показники, які отримують на основі обстеження.

Перевагою таких моделей є врахування ними показника використання території і рівня автомобілізації. Серед недоліків - великий обсяг початкових даних та зниження точності прогнозу із збільшенням тривалості розрахунків [16 - 22].

Для прогнозування попиту на перевезення також використовуються моделі, які ґрунтуються на нечіткій логіці та генетичних алгоритмах [3 - 7, 9 - 18]. Дослідження кореспонденцій за цим методом, показують високу вірогідність результатів (розбіжності між реальними і розрахунковими пасажиропотоками незначні). Недоліком - суб'єктивний вибір функцій належностей.

Для розрахунку транспортних кореспонденцій між районами (зонами) міста використовується також модель «перешкоди – можливості» (intervening opportunities). Відповідно до неї [3 - 7, 9 - 18], обсяг кореспонденцій між двома зонами визначається не настільки відстанню між ними, а наскільки залежить від рівня задоволення цілей пересування:

$$T_{ij} = T_i (e^{-LT} - e^{-LT(T+T_j)}), \quad (5)$$

де  $T_{ij}$  – кількість пересувань з зони  $i$  в зону  $j$ ;

$T$  – кількість пересувань, що є ближчими за часом здійснення до зони  $i$ , ніж до зони  $j$ ;

$T_i$  – кількість пересувань, що завершуються в зоні  $i$ ;

$T_j$  – кількість пересувань, що завершуються в зоні  $j$ .

Заслуговує уваги інтервальна концепція визначення попиту на послуги пасажирського транспорту, яка ґрунтується на гіпотезі про випадковий характер вибору суб'єктами напрямків пересувань. Основними параметрами такої функції виступають місткості транспортних зон великих міст щодо відправлення і прибуття. Довжина інтервалу можливих варіантів матриць пасажирських кореспонденцій оцінюється за формулою:

$$\Delta W = \sum_{d=1}^{N_{TP}} \sum_{\sigma=1}^{N_{TR}} h_{d\sigma} \cdot L_{d\sigma} - \sum_{d=1}^{N_{TP}} \sum_{\sigma=1}^{N_{TR}} h'_{d\sigma} \cdot L_{d\sigma}, \quad (6)$$

де  $N_{TP}$  - кількість транспортних зон;

$h_{de}$  - величина кореспонденцій між районами  $d$  і  $e$  у початковій (базовій) матриці;

$L_{de}$  - мінімальна відстань між зонами  $d$  і  $e$  ;

$h'_{de}$  - величина кореспонденції між районами  $d$  і  $e$  у експериментальній (новій) матриці.

Основною перевагою інтервального моделювання є можливість отримання найімовірніших варіантів МПК, які максимально наближені до реального стану попиту на послуги МПТ. Однак, модель потрібно адаптувати до особливостей використання її у середніх містах.

На основі виконаного аналізу встановлено основні вимоги до моделей пасажирських кореспонденцій [3 - 7, 9 – 18, 23, 25]: гнучкість (можливість введення додаткових параметрів для врахування змін транспортної ситуації в містах); універсальність (можливість описувати різні типи пересувань); відносна простота (широке застосування в різних умовах проектування з використанням обчислювальної техніки та без неї).

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є аналіз закономірностей зміни індикативних показників сталого розвитку міської мобільності з урахуванням змін у міській пасажирській транспортній системі.

**Виклад основного матеріалу.** До поняття «пересування населення» відноситься ряд конкретних показників транспортного планування. Ці параметри визначають на 4-х етапах розрахунку класичної моделі транспортного планування через обсяги пересувань; обсяги кореспонденцій пересувань; обсяги пересувань за типами та через визначення обсягів пересувань на мережі. Таким чином, оцінка пересування населення в межах території планування визначається з використанням конкретних числових даних. Відповідно до традиційного підходу, процес транспортного планування системи пасажирських перевезень складається з чотирьох етапів [3 - 7, 9 – 18, 23, 25]: генерування пересувань (trip generation) – оцінка загальних обсягів прибуття та відправлення з кожної транспортної зони території планування; кореспонденції пересувань (trip correspondence) – отримання матриць кореспонденцій, які визначають обсяги пересувань між кожною парою зон, що досліджуються; розподіл кореспонденцій за типом пересування (modal split); розподіл кореспонденцій за шляхом пересувань (network assignment).

Рівне - місто обласного значення в Україні, обласний центр Рівненської області, центр Рівненського району Рівненської області. Місто розташоване на північному заході країни. Площа - 64 км<sup>2</sup>. Чисельність населення міста складає 248,8 тис. чол., з них 115,3 тис. - чоловіки (46 %) і 133,5 тис. жінки (54 %). Щільність населення - 3913 осіб/км<sup>2</sup>

В місті функціонує 12 тролейбусних маршрутів, (тролейбусний парк налічує 78 одиниць) та функціонує 28 маршрутів автобусів та маршрутних таксі (щоденно автобусну маршрутну мережу обслуговує 280 одиниць транспортних засобів).

Для аналізу функціонування транспортної системи міста використано метод мікрорайонування, згідно з яким територія міста розбивається на транспортні райони з зазначеними центрами.

Для дослідження пересувань населення у м. Рівне була розроблена анкета та здійснено опитування громадян стосовно їх пересувань протягом дня. Опитування проводилося як онлайн так і «face to face», загалом участь взяло 669 респондентів віком від 18 до 70 років. Анкета складена за 14 розділами, зокрема:

1. Загальні відомості, які стосуються місць роботи або навчання. Вікові та гендерні характеристики.

2. Загальні питання щодо поїздок, які розривають вид транспорту, переваги, оцінювання умов поїздки в громадському транспорті.

3. Питання щодо автомобілекористування.

4. Основна частина щодо переміщень протягом дня, ця частина включає:

- кількість поїздок;
- початковий і кінцевий пункти поїздок;
- вид транспорту;
- часові і просторові параметри поїздки.

За гендерним розподілом кількість респондентів склала 47,5% жінок і 52,5% чоловіків. В статевому-віковому зрізі, можна відзначити, що працездатна молодь (18-35) дещо більш мобільна, ніж діти та люди середнього віку, а літні люди менш мобільні, а у статевому зрізі дівчата та жінки середнього віку здійснюють дещо більшу кількість переміщень за день, ніж чоловіки, тоді як для решти груп подібної відмінності немає.

Загалом кількість пересувань коливалася від 1 до 6 за добу. Найбільше відсоток припадає на 1-2 пересування. Найбільше поїздок, серед опитаних респондентів, здійснюється за допомогою громадського транспорту (71,2%); на другому місці за популярністю - переміщення автомобілем (14,2%).

Вибір режимів переміщення відрізняється в статевому зрізі: чоловіки частіше використовують індивідуальний транспорт, як-от легковий автомобіль чи велосипед, тоді як жінки частіше здійснюють переміщення пішки (це може бути зумовлено розподілом цілей подібних переміщень). Значно менша частка жінок, що використовують для пересування велосипед, оскільки за відсутності відповідної інфраструктури вважають це небезпечним.

Індикатори та показники сталої міської мобільності є корисним інструментом для міст та міських районів для виявлення сильних та слабких сторін їхньої системи мобільності та зосередження уваги на чинниках, що потребують вдосконалення. Оскільки міста та міські поселення продовжують розробляти плани стійкої міської мобільності (SUMP) та працювати над досягненням цілей політики ЄС, важливо, щоб цей прогрес був задокументований, для забезпечення можливості кількісної оцінки таких досягнень. Європейські практики та рекомендації, загалом виділяють 18 індикативних показників, з них, 13 основних та 5 допоміжних. До основних належать: доступність громадського транспорту за показником найбільш вразливих верств населення; показник доступності громадського транспорту для груп з обмеженими фізичними можливостями; індекс забрудненості повітря; індикатор перешкоди шуму; показник смертності на дорогах; індикатор доступу до послуг мобільності; показник викидів парникових газів; індикатор заторів та затримок; показник енергоефективності; індикатор можливості активної мобільності; індикатор мультимодальної інтеграції; показник задоволеності громадським транспортом; індикатор активних режимів безпеки дорожнього руху. До допоміжних, віднесено: показник якості громадських площ; показник функціональної різноманітності міст; індикатор часу в дорозі; індикатор використання простору мобільності; індикатор безпеки.

Індикатор доступу до послуг мобільності – це частка населення, що має відповідний доступ до послуг мобільності (громадського транспорту). Відсоток населення з відповідним доступом до громадського транспорту (автобус, тролейбус, електричка) визначається з виразу:

$$Accl = \frac{\sum_i PR_i \cdot W_i}{cap}, \quad (7)$$

де  $Accl$  - відповідний індекс доступу (% від населення);

$PR_i$  - кількість осіб, які проживають у зоні типології доступу  $i$ , визначена комбінацією рівня доступності громадського транспорту;

$W_i$  - вага, що визначає, чи є доступність послуг мобільності відповідною (залежно від комбінації рівня доступності громадського транспорту). Вага диференційована для невеликих (тобто менше 100 000 жителів) або великих міських районів.

Вага  $W_i$  є заздалегідь визначеною (не змінюється користувачем) та визначає, чи є доступність відповідною, наступним чином: 1 – повністю відповідає; 0,5 – частково відповідає; 0 – не відповідає;  $cap$  - кількість жителів на міській території.

Індикатор можливості активної мобільності відображає інфраструктуру для активної рухливості, а саме ходьби та їзди на велосипеді та визначається за формулою:

$$R_{am} = \frac{(L_{pv} + L_{bl} + L_{z30} + L_{pz})}{L_{rn}}, \quad (8)$$

де  $R_{am}$  - частка довжини дороги, пристосована для активної рухливості;

$L_{pv}$  - довжина дорожньої мережі з тротуарами (не в пішохідній зоні), (км);

$L_{bl}$  - довжина дорожньої мережі з велодоріжками (не в зоні 30 км/год), (км);

$L_{z30}$  - довжина дорожньої мережі в зоні 30 км/год, (км);

$L_{pz}$  - довжина пішохідної зони, (км);

$L_{rn}$  - загальна довжина дорожньої мережі міста (крім автомагістралей), (км).

Довжина доріг та вулиць з тротуарами, велодоріжками, зонами обмеження швидкості 30 км/год (20 км/год) та пішохідними зонами, що відносяться до загальної довжини міської вулично-дорожньої мережі (крім автомагістралей).

Показник задоволеності громадським транспортом відображає відносний рівень задоволення від користування громадським транспортом.

Середній рівень задоволеності пересуванням у місті на громадському транспорті, визначається:

$$\overline{SAT} = \frac{\sum_m \overline{ASPECT}_m}{m}, \quad (9)$$

де  $m$  – кількість аспектів (вибірка).

$$\overline{ASPECT}_m = \sum_h \overline{AGREE}_{h,m}, \quad (10)$$

де  $h$  – чотири можливі варіанти відповідей: цілком згідний, частково згідний, частково не згідний, цілком не згідний, з відповідними оцінками:  $C_h$  = цілком згідний = 10;  $C_h$  = частково згідний = 6,66;  $C_h$  = частково не згідний = 3,33;  $C_h$  = цілком не згідний = 0.

Даний показник призначений для аналізу результатів міського аудиту – опитування сприйняття якості життя в містах, яке проводиться на основі телефонних інтерв'ю на регулярній основі. Параметр є усередненою оцінкою відповідей опитування щодо сприйняття респондентом задоволення від користування громадським транспортом.

Індикатор доступу до послуг мобільності – це частка населення, що має відповідний доступ до послуг мобільності (громадського транспорту). Вихідні дані  $PR_i$

відносяться до населення, яке проживає в межах п'яти типологічних зон у місті, визначених комбінацією рівня доступності громадського транспорту. При цьому, усі зупиночні пункти, розташовані на відстані 50 м від інших, слід розглядати як один зупиночний пункт (наприклад, якщо автобусна зупинка розташована по обидва боки вулиці, по одній для кожного напрямку, пов'язаний зупиночний пункт слід розглядати як один - і відповідні поїздки повинні підсумовуватися за двома напрямками). Зони типології поділяються за рівнем доступності громадського транспорту з параметрами доступу:

- дуже високий - особи, які мешкають менш ніж за 5 хвилин (радіус 417м) від автобусної чи тролейбусної зупинки з більш ніж 10 відправленнями/годину і менше 10 хвилин (радіус 833 м) від залізничної станції з більш ніж 10 відправленнями/годину (обидві умови повинні бути дійсними);

- високий - особи, які мешкають менш ніж за 5 хвилин від автобусної або тролейбусної зупинки з більш ніж 10 відправленнями/годину або менш ніж за 10 хвилин ходьби від залізничної станції з більш ніж 10 відправленнями/годину (дійсна має бути лише одна умова);

- середній - особи, які мешкають менш ніж за 5 хвилин від автобусної або тролейбусної зупинки з якої відправляється від 4 до 10 транспортних засобів на годину або менш ніж за 10 хвилин ходьби від залізничної станції з 4-10 відправленнями/годину;

- низький - особи, які мешкають менш ніж за 5 хвилин від автобусної або тролейбусної зупинки з якої відправляється до 4 транспортних засобів на годину або менш ніж за 10 хвилин ходьби від залізничної станції з менш ніж 4 відправлень/годину;

- немає доступу - особи, які проживають на відстані більше 5 хвилин ходьби від автобусної або тролейбусної зупинки і більше 10 хвилин від залізничної станції (обидві умови повинні бути дійсними).

Таблиця 1 – Результати розрахунку індикатора доступу до послуг мобільності

Населення, що проживає в кожній типологічній зоні доступу, $i$		Великий міський район	Малий міський район	Розрахункові параметри			
$i$	Рівень доступу до громадського транспорту	$W_i$		$PR_i$	$W_i \cdot PR_i$	$C_{ap}$	$A_{ccl}$
1	Немає доступу	0	0	12 196	0	243 934	75%
2	Низький доступ	0	0,5	24 394	0		
3	Середній доступ	0,5	1	48 787	24393		
4	Високий доступ	1	1	141 481	73180		
5	Дуже високий доступ	1	1	17 076	85377		
Всього населення, осіб				243 934			

Джерело: розроблено автором

Вага  $W_i$  є попередньо визначеною (не змінюється користувачем) та визначає, чи є доступність послуг мобільності доречною: 1, де це цілком доречно; 0,5, де це не повністю доречно; 0 там, де це недоречно.

В результаті отримуємо індикатор доступності до послуг мобільності, відносне значення якого становить 73% або 0,73.

Індикатор активної мобільності - надає оцінку, отриману із сукупної частки загальної дорожньої мережі, пристосованої як для пішої руху, так і для їзди на велосипеді.

Протяжність дорожньої мережі, пристосованої до пішого руху, обчислюється на основі довжини тротуарів плюс довжина пішохідних зон, як частка загальної дорожньої мережі.

Довжина дорожньої мережі, пристосована до їзди на велосипеді, розраховується на основі довжини дорожньої мережі з велодоріжками плюс довжини доріг в зоні обмеження швидкості руху 30 км/год, як частка загальної дорожньої мережі.

Рекомендується використовувати для розрахунку мінімальну ширину дорожніх покриттів (0,6 м) та мінімальну ширину велодоріжок (0,75 м). Протяжність пішохідної зони стосується лише пішохідних вулиць. Площа пішохідних зон (наприклад, ринкові площі) не враховується в розрахунку - можна врахувати лише довжину доріг, які потрапляють у пішохідну зону або навколо неї.

Значення індикатора активної мобільності - це середнє значення довжини дорожньої мережі, пристосованої до пішого руху і довжина дорожньої мережі, адаптована до їзди на велосипеді. Значення показника виражається за шкалою 1 - 10. В результаті досліджень, для міста Рівне індикатор активної мобільності складає, відповідно: параметр - 0,57; показник - 2,83.

Індикатор задоволеності громадським транспортом призначений для аналізу результатів опитування сприйняття якості життя в місті, яке проводилося за допомогою анкетного опитування «Дослідження мобільності населення у місті Рівне».

Параметр є усередненою оцінкою відповідей опитування про сприйняття респондентом задоволення від користування громадським транспортом. У анкеті були поставлені такі групи питань:

П1.1. Будь ласка, дайте відповідь, чи ви (1) задоволені, (2) скоріше задоволені, (3) досить незадоволені, (4) зовсім не задоволені, або (5) не знаєте / (немає відповіді), пересуваючись на громадському транспорті (наприклад, автобусі, маршрутному таксі чи тролейбусі) у місті.

П2. Громадський транспорт у вашому місті, виходячи з вашого досвіду та сприйняття, будь ласка, дайте відповідь на запитання, чи ви (1) повністю згодні, (2) дещо згодні, (3) дещо не згодні, (4) категорично не згодні або (5) не знаєте (немає відповіді), на кожне з цих тверджень.

Громадський транспорт у вашому місті:

П2.1 Недорогий;

П2.2 Безпечний;

П2.3 Доступний;

П2.4 Частий (велика кількість відправлень транспортних засобів від зупиночних пунктів);

П 2.5 Регулярний (чітко виконується розклад руху).

Результати опитування, відсоток задоволеності громадським транспортом, значення перевідних коефіцієнтів та розрахункові бали подані в табл. 2 - 5.



Таблиця 2 – Результати анкетного опитування щодо рівня задоволеності громадським транспортом

Індикатор	Аспект	Питання	Кількість респондентів	Не знаю / немає відповіді	Повністю згідний ( $h_1$ )	Частково згідний ( $h_2$ )	Частково не згідний ( $h_3$ )	Повністю не згідний ( $h_4$ )
Задоволеність громадським транспортом	Загальне задоволення	П1.1	669	45	36	257	272	59
	Недорогий	П2.1	669	28	190	315	82	54
	Безпечний	П2.2		36	27	182	326	98
	Доступний	П2.3		21	227	258	117	46
	Частий	П2.4		19	116	228	209	97
	Регулярний	П2.5		33	61	296	219	93

Джерело: розроблено автором

Таблиця 3 – Розрахунок відсотка задоволеністю громадським транспортом по кожному аспекту

Повністю згідний ( $h_1$ )	Частково згідний ( $h_2$ )	Частково не згідний ( $h_3$ )	Повністю не згідний ( $h_4$ )
0,06	0,41	0,44	0,09
0,30	0,49	0,13	0,08
0,04	0,29	0,52	0,15
0,35	0,40	0,18	0,07
0,18	0,35	0,32	0,15
0,09	0,44	0,33	0,14

Джерело: розроблено автором

Таблиця 4 – Перевідні коефіцієнти до розрахунку балів

$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
10	6,66	3,33	0

Джерело: розроблено автором

Таблиця 5 – Результати розрахунку балів за встановленими аспектами

Повністю згідний ( $h_1$ )	Частково згідний ( $h_2$ )	Частково не згідний ( $h_3$ )	Повністю не згідний ( $h_4$ )	Бали
0,58	2,74	1,45	0	4,8
2,96	3,27	0,43	0	6,7
0,43	1,91	1,71	0	4,1
3,50	2,65	0,60	0	6,8
1,78	2,34	1,07	0	5,2
0,91	2,95	1,09	0	4,9

Джерело: розроблено автором

В результаті розрахунків, отримуємо показник рівня задоволеності від користування громадським транспортом, значення якого становить 54%, тобто, значення індикатора задоволення від користування громадським транспортом становить 5,4.

### Висновки.

Система показників та індикаторів сталої міської мобільності, відповідно до Європейських практик та рекомендацій, загалом виділяє 18 індикативних показників, з них, 13 основних та 5 допоміжних. В якості вихідних даних для визначення індикативних показників функціонування пасажирської транспортної системи громадського транспорту міста Рівне, в розрізі сталого її розвитку, використовувалася анкета «Дослідження мобільності населення у місті Рівне» [19, 21, 24 ]. До розрахунку прийнято три індикативних параметри, а саме:

1. Індикатор доступу до послуг мобільності, показник, який дозволяє визначити частку населення, що має відповідний доступ до послуг мобільності (громадського транспорту). Для поточного стану розвитку системи громадського транспорту міста Рівне становить 73% або 0,73.

2. Індикатор можливості активної мобільності, що надає оцінку, отриману із сукупної частки загальної дорожньої мережі, пристосованої як для пішої прогулянки, так і для їзди на велосипеді, згідно розрахунків становить 0,57. Чисельне розрахункове значення показника (значення, виражене за шкалою 1 – 10) становить 2,83.

3. Показник рівня задоволеності громадським транспортом – індикатор, що дає можливість оцінити відносне задоволення від користування громадським транспортом та середній рівень задоволеності пересуванням у місті на громадському транспорті становить – 54%, тобто значення показника становить 5,4.

В цілому, ґрунтуючись на розрахункових значеннях індикативних показників, можна підсумувати, що окремі індикатори сталої міської мобільності для міста Рівне мають посереднє значення. Це вказує на необхідність розробки стратегічних заходів щодо удосконалення системи громадського пасажирського транспорту міста у взаємозв'язку з його просторовим розвитком для підвищення комфорту пересування мешканців всіх груп.

### Список літератури

1. *Horizon 2020 - Smart, Green and Integrated transport. Important Notice on the Second Horizon 2020.* (2016). Work Programme: European Commission.
2. Li, Y., Voegelé, T. Mobility as a Service (MaaS): Challenges of Implementation and Policy Required. *Journal of Transportation Technologies*. 2017. Vol. 7. P. 95-106. <https://doi.org/10.4236/jtts.2017.72007>.
3. Yatskiv, I., Pticina, I., Savrasovs, M. Urban Public Transport System's Reliability Estimation Using Microscopic Simulation. *Transport and Telecommunication Journal*. 2012. Vol. 13(3). P. 219-228. <https://doi.org/10.2478/v10244-012-0018-4>
4. *Public Transport Assignment.* (2013). Transport Analysis Guidance: Department for Transport, London.
5. Ortuzar, J. de D., Willumsen, L. G. Modelling transport. Third edition. John Wiley & Sons Ltd., 2006. 499 p.
6. Winston, C., Small, K. A. The Demand for Transportation: Models and Applications. C.: University of California, 1998. 51 p.
7. Любий Є. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2012. 19 с.
8. Горбачев П. Ф., Россолов А. В. Моделирование спроса на услуги пассажирского маршрутного транспорта в крупных городах : монография. Харьков : ХНАДУ, 2012. 152 с.
9. Горбачов П. Ф. Нова концепція моделювання потреб населення у трудових пересуваннях міським пасажирським транспортом. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2009. №27. С. 210-214.
10. Кристопчук М. Є., Лобашов О. О. Приміські пасажирські перевезення : навч. пос. Харків : НТМТ, 2012. 224с. URL: [http://ep3.nuwm.edu.ua/11277/1/Приміські\\_пасажи́рські\\_перевезення.pdf](http://ep3.nuwm.edu.ua/11277/1/Приміські_пасажи́рські_перевезення.pdf). (дата звернення: 25.03.2021)

11. Khitrov, I., Tkhoruk, Y. Formation and Distribution Flows of External Transport in the City. *In Reliability and Statistics in Transportation and Communication: Selected Papers from the 19th International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat'19, 16-19 October 2019*, Riga, Latvia (Vol. 117, p. 141). Springer Nature.
12. Wegener M. Operational urban models: state of the art. *APA Journal*. 1994. - P.55-61.
13. Пашкевич С. М., Кристопчук М. Є. Аналіз параметрів функціонування об'єктів транспортної інфраструктури на формування транспортних та пасажирських потоків у містах. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2018. № 1. С. 66-72. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ctmbt\\_2018\\_1\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ctmbt_2018_1_13). (дата звернення: 20.03.2021)
14. Россолов О. В. Моделирование популы на послуги міського пасажирського транспорту при проведенні масових заходів у містах. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. Вип. 3/63. С. 22-25.
15. Fratar, T. J. Vehicular Trip Distribution by Successive Approximation. *Traffic Quarterly*. 1954. Vol. 8. P. 53-65.
16. Кристопчук М. Є. Соціально-економічна ефективність пасажирської транспортної системи приміського сполучення : монографія. Рівне : НУВГП, 2012. 158 с. URL: [http://ep3.nuwm.edu.ua/1645/1/Кристопчук Соціально-економічна zah.pdf](http://ep3.nuwm.edu.ua/1645/1/Кристопчук%20Соціально-економічна%20zah.pdf) (дата звернення: 22.03.2021)
17. Любий С. В., Россолов О. В. Формування моделі популы на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом. *Комунальне господарство міст*. 2013. № 107. С. 422-426.
18. Дмитриченко М.Ф. Концепція проектування систем міських пасажирських перевезень. *Проблеми транспорту: зб. наук. пр.* Київ: НТУ. 2011. Вип.8. С. 3-8.
19. Кристопчук М. Є. Вплив місць розташування об'єктів транспортної інфраструктури на просторовий розвиток міста. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка». Сер. Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. 2017. Вип. 866. С. 166-171.
20. Berlingerio M. AllAboard: a system for expioring urban mobility and optimizing public transport using cellphone data. *Mobile Phone Data for Development: The main conference on the scientific analysis of mobile phone datasets*. Italy. 2013. P. 397-411.
21. Кристопчук М. Є. Оцінка параметрів сталої міської мобільності. *Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг = Crisis and Risk Engineering for Transport Services* : зб. доповідей Міжнар. науково-метод. конф. Маріуполь, 20–21 січня 2021 р. ДВНЗ «ПДТУ» [та ін.]. Маріуполь : ПДТУ, 2021. С. 355-362.
22. Daamen W. Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities. *Trail Thesis Series*. The Netherlands TRAIL Research School. 2004. P. 377.
23. Kalis M., Teodorovic D. Trip distribution modeling using fussy logic and a genetic algorithm. *Transportation Planning and Technology*. 2003. Vol. 26, № 3. P. 213–238.
24. Кристопчук М. Є. Європейські підходи до оцінки сталої міської мобільності. *Четверта Всеукраїнська науково-теоретична конференція «Проблеми з транспортними потоками і напрями їх розв'язання», 25 – 26 березня 2021 року: Тези доповідей*. Львів: Галицька видавнича спілка, 2021. С. 18-20.
25. Amini A. The Differing Tribal and Infrastructural Influences on Mobility in Developing and Industrialized Regions. *Mobile Phone Data for Development*. 2013. 849 p.

## References

1. *Horizon 2020 - Smart, Green and Integrated transport. Imporant Notice on the Scond Horizon 2020*. (2016). Work Programme: European Comission.
2. Li, Y., & Voegel, T. (2017). Mobility as a Service (MaaS): Challenges of Implementation and Policy Required. *Journal of Transportation Technologies*, Vol. 7, 95-106. <https://doi.org/10.4236/jtts.2017.72007>.
3. Yatskiv, I., Pticina, I., & Savrasovs, M. (2012). Urban Public Transport System's Reliability Estimation Using Microscopic Simulation. *Transport and Telecommunication Journal*, 13(3), 219-228. doi: <https://doi.org/10.2478/v10244-012-0018-4>
4. *Public Transport Assignment*. (2013). Transport Analysis Guidance: Department for Transport, London.
5. Ortuzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2006). *Modelling transport*. (3d ed.). John Wiley & Sons Ltd.
6. Winston, C., & Small, K. A. (1998). *The Demand for Transportation: Models and Applications*. C.: Univesity of California.

7. Lyubiy Ye. V. (2012). Любий Є. Vyznachennia popytu na peresuvannia naselennia malykh mist marshrutnym pasazhyrskym transportom [Determining the demand for the movement of the population of small towns by scheduled passenger transport]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
8. Gorbachov, P.F., & Rossolov A.V. (2012). *Modelyrovanye sprosa na usluhy passazhyrskoho marshrutnoho transporta v krupnykh horodakh* [Modeling the demand for passenger route transport services in large cities]. Kharkiv: KhNADU [in Russian].
9. Gorbachov, P.F. (2009). Горбачов П. Ф. Nova kontsepsiia modeliuвання potreb naselennia u trudovykh peresuvanniakh miskym pasazhyrskym transportom [A new concept of modeling the needs of the population in labor movements by urban passenger transport]. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named Academician V. Lazaryan*. Vol. 27, 210-214 [in Ukrainian].
10. Krystopchuk, M.YE., & Lobashov, O.O. (2012). *Prymiski pasazhyrski perevezennia* [Suburban passenger traffic]. Kharkiv: NTMT [in Ukrainian].
11. Khitrov, I., & Tkhoruk, Y. (2020). *Formation and Distribution Flows of External Transport in the City*. In Reliability and Statistics in Transportation and Communication: Selected Papers from the 19th International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat'19, 16-19 October 2019, Riga, Latvia (Vol. 117, p. 141). Springer Nature.
12. Wegener, M. (1994). Operational urban models: state of the art. *APA Journal*, 55-61.
13. Pashkevych, S.M., & Krystopchuk, M.YE. (2018). Analiz parametriv funktsionuvannia obyektiv transportnoyi infrastruktury na formuvannya transportnykh ta pasazhyrskykh potokiv u mistakh [Analysis of the parameters of the functioning of transport infrastructure facilities for the formation of transport and passenger flows in cities]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern technologies in mechanical engineering and transport*, 1, 66-72. *nbuv.gov.ua*. Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ctmbt\\_2018\\_1\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ctmbt_2018_1_13) [in Ukrainian].
14. Rossolov, O.V. (2013). Modeliuвання popytu na posluhy miskoho pasazhyrskoho transportu pry provedenni masovykh zakhodiv u mistakh [Modeling the demand for urban passenger transport services during mass events in cities]. *Eastern European Journal of Advanced Technology*. Vol. 3/63, 22-25 [in Ukrainian].
15. Fratar, T. J. (1954). Vehicular Trip Distribution by Successive Approximation. *Traffic Quarterly*. Vol. 8. 53-65.
16. Krystopchuk, M.YE. (2012). *Sotsialno-ekonomichna efektyvnist pasazhyrskoi transportnoi systemy prymiskoho spoluchennia* [Socio-economic efficiency of the suburban passenger transport system]. Rivne: NUVHP [in Ukrainian].
17. Lyubiy, Ye. V., & Rossolov, O.V. (2013). Formuvannya modeli popytu na peresuvannia naselennia malykh mist marshrutnym pasazhyrskym transportom [Formation of a model of demand for the movement of the population of small towns by scheduled passenger transport]. *Municipal utilities*. Vol. 107, 422-426. [in Ukrainian].
18. Dmytrychenko, M.F. (2011). Kontsepsiia proektuvannia system miskykh pasazhyrskykh perevezen [The concept of designing urban passenger transport systems]. *Transport problems*. Vol. 8, 3-8. [in Ukrainian].
19. Krystopchuk, M. (2017). Vplyv mist roztashuvannia obektiv transportnoi infrastruktury na prostorovyi rozvytok mista [The impact of transport infrastructure locations on the spatial development of the city]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, Vol. 866, 166-171. [in Ukrainian].
20. Berlingerio, M. (2013). AllAboard: a system for exploring urban mobility and optimizing public transport using cellphone data. *Mobile Phone Data for Development: The main conference on the scientific analysis of mobile phone datasets*. Italy. 397-411.
21. Krystopchuk, M. (2021). Otsinka parametriv staloi miskoi mobilnosti [Estimation of parameters of sustainable urban mobility]. Proceedings from Crisis and Risk Engineering for Transport Services. *Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia (20-21 sichnia 2021 roku) - International Scientific-Practical Conference*. (pp. 355-362). Mariupol: PSTU [in Ukrainian].
22. Daamen, W. (2004). Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities. *Trail Thesis Series. The Netherlands TRAIL Research School*. 377.
23. Kalis, M. & Teodorovic, D. (2003). Trip distribution modeling using fuzzy logic and a genetic algorithm. *Transportation Planning and Technology*. Vol. 26, № 3. 213–238.
24. Krystopchuk, M. (2021). Yevropeiski pidkhody do otsinky staloi miskoi mobilnosti [European approaches to the assessment of sustainable urban mobility]. Proceedings from Problems with Traffic Flows and Ways to Solve Them 'Chetverta Vseukrainska naukovoteoretychna konferentsiia (25–26 bereznia 2021 roku) – 4th International Scientific-Practical Conference. (pp. 18-20). Lviv: Galician Publishing Union [in Ukrainian].
25. Amini, A. (2013). *The Differing Tribal and Infrastructural Influences on Mobility in Developing and Industrialized Regions*. Mobile Phone Data for Development.

**Mykhailo Krystopchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine*

### **Analysis of Indicators of Sustainable Development Urban Passenger Transport System**

Establishing the main attributes of population mobility is one of the most important indicators of urban development, which has been studied by domestic and foreign scientists for use in the practice of urban transport planning and the development of sustainable transport systems. Mobility characteristics are also an important source and result for the development of changes in the city master plan and the creation of new management decisions in the operation and operation of the route network of urban passenger transport.

However, at the present stage of implementation of transport studies of urban population movement requires consideration of indicators of sustainable development of urban transport systems. In this regard, a study of the functioning of the passenger transport system of public transport in the city of Rivne in terms of the development of the principles of sustainable urban mobility. The use of the system of indicators of sustainable development of urban passenger transport system allows to assess the current situation in the city and outline promising areas for improving the public transport system in conjunction with the spatial development of urban areas to ensure comfortable movement of residents to meet labor and cultural movements.

The questionnaire "Study of mobility of the population in the city of Rivne" was used as initial data for definition of indicative indicators of functioning of passenger transport system of public transport of the city of Rivne, in the context of its sustainable development. Three indicative parameters are taken into account, namely: the indicator of access to mobility services, the indicator of the possibility of active mobility and the indicator of the level of satisfaction with public transport. Based on the calculated values of indicative indicators, it can be argued that some indicators of sustainable urban mobility for the city of Rivne are of mediocre importance. This indicates the need to develop strategic measures to improve the city's public passenger transport system in conjunction with its spatial development to increase the comfort of movement of residents of all groups.

**urban passenger transport, transport system, sustainable development, indicative indicators, matrix of passenger correspondence, efficiency**

*Одержано (Received) 18.03.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**УДК 656.025**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).221-231](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).221-231)

**О. В. Россолов**, доц., канд. техн. наук, **С. Е. Лифенко**

*Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна*

*e-mail: rossolovalex@gmail.com*

## **Оцінка сценаріїв сталого розвитку транспортних систем міст з автомобіле-орієнтованою мобільністю**

В статті представлено результати експериментальних досліджень з розробки сценаріїв сталого транспортного обслуговування населення міст. Зроблено акцент на автомобіле-орієнтовану мобільність, яка є небажаною з точки зору плану сталої мобільності. Розроблено модель транспортної пропозиції, яка враховує пропускну спроможність вуличної дорожньої мережі міста Бровари. Поряд з цим проведено моделювання попиту на транспортне обслуговування з імплементацією процедури агрегування площі жилої забудови міста. Проведено оцінку альтернативних сценаріїв транспортного обслуговування, які відрізняються рівнем жорсткості заходів щодо обмежень на пересування в центральній частині міста.

**автомобіле-орієнтована мобільність, модель транспортного попиту, модель транспортної пропозиції, екологічний ефект**

**Постановка проблеми.** В умовах зростання рівня автомобілізації, що спостерігається в Україні в останні роки, реалізація сталого розвитку міст стає складною задачею. Орієнтація на індивідуальні засоби пересування, серед яких найбільшого поширення набули моторизовані транспортні засоби, є одним з ключових аспектів зниження ефективності впровадження сценаріїв сталої мобільності в містах України. Негативна епідеміологічна ситуація, яка спричинена стрімким розповсюдженням вірусу SARS-CoV-2 (COVID-19), лише підштовхує населення міст активно застосовувати індивідуальні транспортні засоби, навіть нехтуючи негативними економічними та екологічними наслідками цього процесу. За таких умов необхідна розробка сталих сценаріїв розвитку транспортних систем з врахуванням активного застосування мешканцями міст приватних транспортних засобів. Безумовно, це вносить деякі протиріччя в саму концепцію сталого розвитку міст, яка базується на активному застосуванні мешканцями міст «зелених» видів транспорту та орієнтацію на міський громадський транспорт. Незважаючи на це, вочевидь транспортні системи міст України потребують розробки адаптивних заходів щодо нівелювання негативного впливу стрімкого розвитку автомобілізації та формування парадигми «м'якого» переходу до сталої міської мобільності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** «Стала міська мобільність» це розвиток транспортної системи, який сприяє формуванню безпечного, рівного і справедливого доступу людей до місць задоволення своїх потреб [1]. В результаті зростаючого інтересу до цього питання, на рівні Європейського Союзу було розроблено кілька проектів і ініціатив (CH4ALLENGE, CIVITAS, ELTIS), в рамках яких були опрацьовані керівні принципи сталого розвитку міської мобільності. Одним з таких документів є розробка плану сталої міської мобільності (SUMP), що передбачає собою функціональну стратегію, яка розроблена для задоволення потреб мешканців і бізнесу в місті і його околицях [1]. В рамках розробки SUMP ключовим завданням є кардинальне зниження рівня застосування приватних автомобілів для реалізації поїздок мешканцями міст [2]. Але, як зазначається в [3] навіть при розбудові нових житлових районів з компактним проектуванням ця задача є важко досяжною. Одним з шляхів вирішення даної проблеми згідно з С. Curtis [4] є ефективне формування системи громадського транспорту, яка повинна забезпечувати однаково високу транспортну доступність для мешканців різних районів міста [5]. В таких умовах транспортна доступність формується як інтегральний показник, в який вагомий вклад вносить пішохідна доступність елементів транспортної інфраструктури [6]. В контексті громадського транспорту в рамках SUMP перевага повинна надаватися «зеленим» видам транспорту, серед яких метро відіграє ключову роль в великих містах [7]. За відсутності розвиненої інфраструктури даного магістрального виду транспорту трамвай повинен виступати у якості базового для розбудови сталої міської мобільності [8].

В рамках концепції сталого розвитку міської мобільності необхідним елементом є оптимізація дорожньої мережі за рахунок підвищення рівня адміністративного управління дорогами. Такий підхід особливо важливий для законодавчого органу країн, що розвиваються, оскільки, як показує досвід, стрімкий ріст населення в містах пригнічує поліпшення доріг. Аналіз попиту на пересування на основі відображення конфігурації дороги є головним етапом для подальшої оптимізації [9]. При розробці SUMP слід брати до уваги тип вуличної дорожньої мережі (ВДМ) та саму планувальну структуру міста. Так в роботі [10] показано, що місто являє собою загальне середовище, яке повинне забезпечувати продуктивне проживання мешканців міст з можливістю реалізації великого спектру соціально-економічних потреб. Особливу

увагу в рамках території міста заслуговує його центральна частина, яка характеризується високою концентрацією ділової та культурної активності людей, що супроводжується високим рівнем мобільності [11]. Негативний вплив автомобільного транспорту саме в центральній частині міста повинен бути нівельований шляхом розробки комплексу заходів щодо організації руху та формування обмежень для транзитних переміщень на приватному автомобільному транспорті [12].

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є розробка альтернативних сценаріїв розвитку транспортних систем міст при активному використанні автомобільного транспорту мешканцями міст. Об'єктом дослідження є процес пересування на приватному автомобільному транспорті. Предметом дослідження є вплив параметрів транспортної мережі на соціально-екологічні характеристики пересувань.

**Виклад основного матеріалу.** Розробка моделі реалізації сценаріїв сталого розвитку транспортної системи передбачає виконання комплексу робіт, які повинні бути взаємозв'язані між собою. В рамках даної роботи розглядаються трудові переміщення жителів міста в ранковий час пік з використанням індивідуальних автомобілів. Тому для вирішення поставленої задачі формалізовано у виді структурно-логічну схеми основні етапи роботи, які включають в себе: збір статистичних даних, побудову транспортних моделей пропозиції та попиту, аналіз поточного стану транспортної мережі міста (приклад дослідження), імітаційне моделювання альтернативних сценаріїв, проведення порівняльної оцінки та вибір перспективного сценарію розвитку міста. В якості взаємозв'язків між різними етапами впровадження виступають стандартні і уніфіковані моделі, які в сукупності дозволяють легко генерувати декілька сценаріїв та порівнювати кожен з них за різними показниками. На рис. 1 зображена структурно-логічна схема, яка включає в себе усі необхідні кроки досягнення реалізації сценарію.

Отже, формуванню сценаріїв розвитку транспортних систем передують розробка моделей транспортного попиту та пропозиції (рис. 1). Моделювання транспортної пропозиції пропонується виконувати в PTV Visum, який дозволяє описати просторові характеристики транспортної мережі у вигляді двох вимірної моделі. Для виконання даної процедури на першому кроці необхідно обрати об'єкт моделювання – місто. Так як дане дослідження носить пошуковий характер, пропонується обрати невелике місто, що дозволить сконцентрувати зусилля на процедурі розробки сценаріїв та мінімізує трудомісткість розробки моделі транспортної пропозиції. Для дослідження обрано місто Бровари в якості об'єкту розробки комплексу заходів щодо сталого розвитку. Характеристика моделі транспортної пропозиції для м. Бровари представлена в табл. 1.

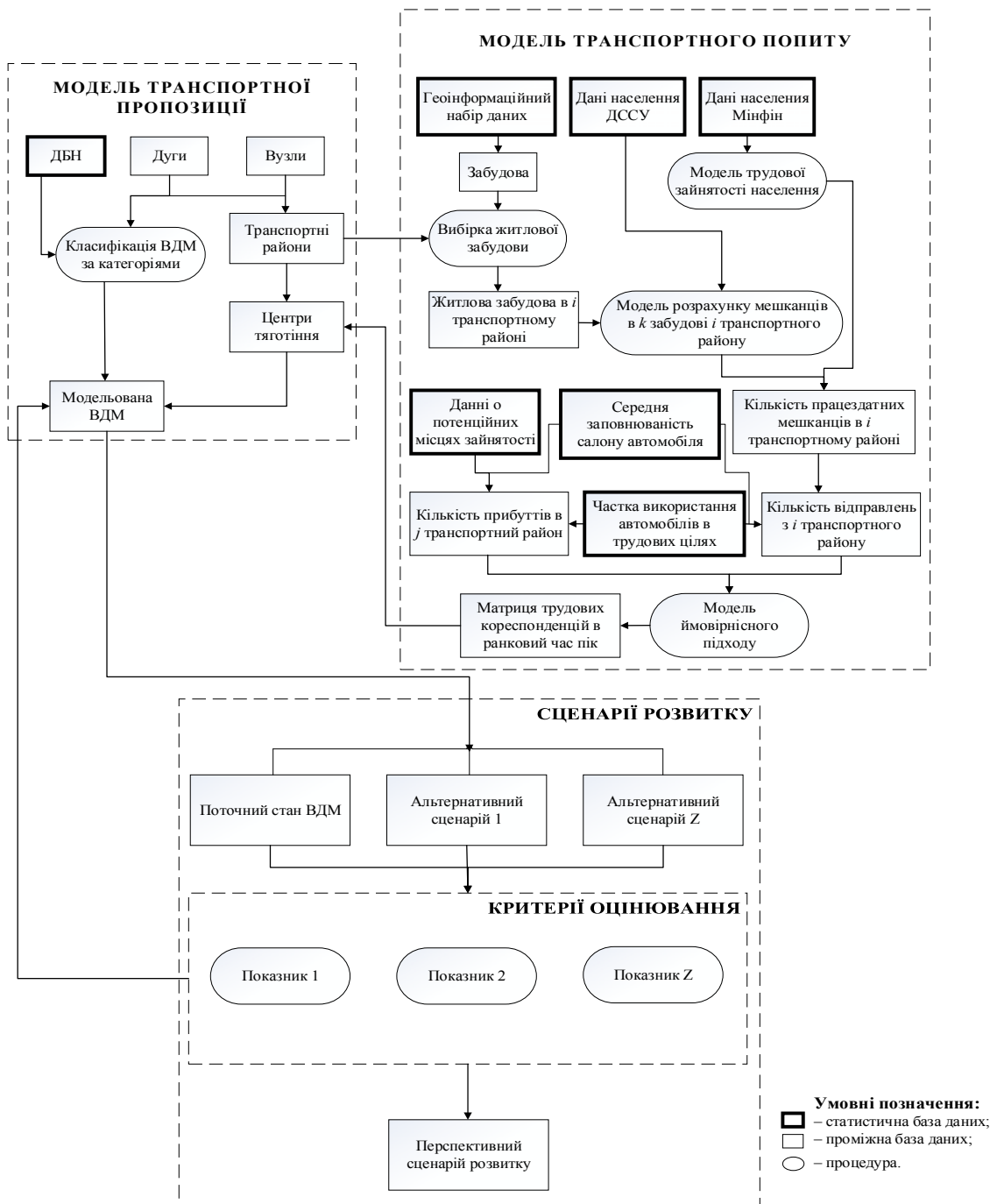


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема формування альтернативних сценаріїв сталого розвитку транспортної системи

Джерело: розроблено авторами



Таблиця 1 – Загальна характеристика ВДМ м. Бровари

Характеристика ВДМ	Значення					
	I-а	I-б	I-в	II	III	IV
Категорія дороги						
Кількість смуг руху, од.	4	4	6	2	2	2
Ширина смуги руху, м.	3,75	3,75	3,75	3,75	3,50	3
Пропускна здатність, авт./год	3000	3000	4500	1500	1500	1200
Максимально допустима швидкість пересування, км/год	90	50	50	50	50	50
Загальна протяжність кожної категорії, км.	9,55	14,55	1,41	23,26	2,91	100,79
Кількість вузлів, од.	499					
Загальна протяжність ВДМ, км.	153,50					
Кількість дуг, усього:	1444					
	одностороннього руху					
	двостороннього руху					
Кількість транспортних районів	29					
Загальна площа транспортних районів, км <sup>2</sup>	36,21					
Кількість примикань, од.	138					

В свою чергу моделювання транспортного попиту виконується згідно методики [13]. В якості методу розрахунку матриці транспортних кореспонденцій обрано рівно ймовірнісний підхід, який не враховує вплив відстані на формування пар кореспонденцій. Це є актуальним в контексті моделювання пересувань на індивідуальних транспортних засобах, так як для таких кореспонденцій відстань не є жорстко детермінуючою складовою. Місткості транспортних районів по відправленню запропоновано формалізувати як наступну функцію:

$$O_i = f(S_{жб}^i, \rho_{нас}, k_{мз}, \bar{q}), \quad (1)$$

де  $O_i$  – місткість  $i$ -го транспортного району по відправленню, авт.;

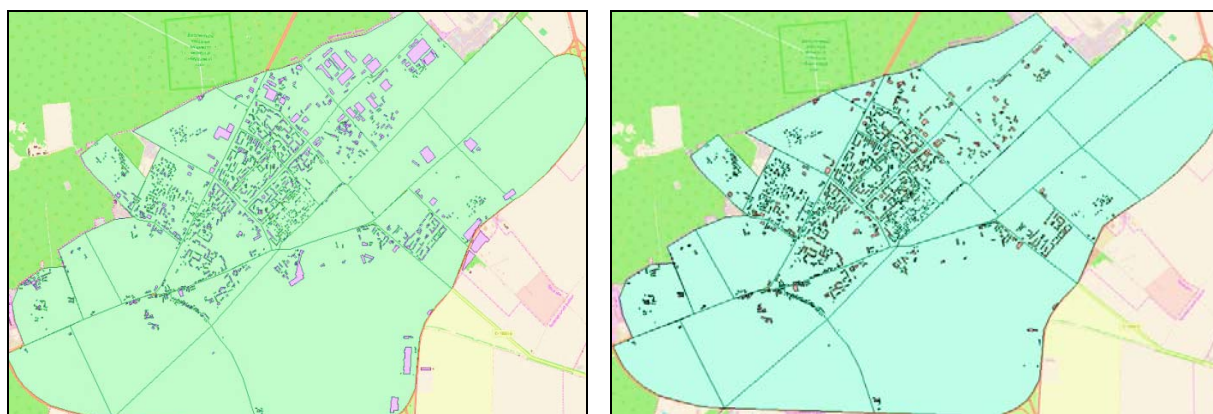
$S_{жб}^i$  – площа житлової забудови з урахуванням поверховості, км<sup>2</sup>;

$\rho_{нас}$  – щільність населення, ос./км<sup>2</sup>;

$k_{мз}$  – коефіцієнт трудової зайнятості;

$\bar{q}$  – середнє заповнення одного транспортного засобу, ос./од.

Ключовим компонентом  $O_i$  є складова  $S_{жб}^i$ , яка формує рівень масштабу відправлень з транспортного району. Для визначення цього показника для сформованих транспортних районах застосовано ArcGIS. Результати формування даних щодо площі забудови по ділянках міста Бровари наведено на рис. 2. Фрагменти атрибутивної інформації по цифрових шарах міської забудови та житлових будинках представлено в табл. 2 та 3. Для формування даних по  $S_{жб}^i$  на першому кроці проведено формування шарів будівель в місті Бровари (рис. 2а та табл. 2).



а) б)  
Рисунок 2 – Результати формування цифрових шарів міської забудови (а) та безпосередньо житлової забудови (б) в місті Бровари

Таблиця 2 – Фрагмент атрибутивної інформації цифрового шару міської забудови

№ з/п	Тип забудови	Призначення	Поверховість	Площа першого поверху, м <sup>2</sup>
1	garages	-	1	24
2	build	школа № 3	3	3417,63
3	build	РУВД	2	5158,08
4	build	сільпо	1	4925,05
5	garages	-	1	32
6	apartment	ЖК «Лісовий Кварт»	24	2659,56
7	build	прокуратура	2	459,11
....	.....	.....	.....	.....
1722	apartment	житловий будинок	9	1623,72

Таблиця 3 – Фрагмент атрибутивної інформації житлової забудови

№ з/п	Тип забудови	Призначення	Поверховість	Площа першого поверху, м <sup>2</sup>
1	house	житловий будинок	17	2470,51
2	apartments	житловий будинок	5	898,83
3	build	житловий будинок	5	926,38
4	apartments	житловий будинок	9	1338,07
5	build	житловий будинок	5	1473,30
6	apartment	житловий будинок	9	1927,72
7	build	житловий будинок	5	592,24
....	.....	.....	.....	.....
1548	build	житловий будинок	12	704,50

Після цього проведено «очищення» шарів з метою виділення лише житлової забудови, яка виступає в якості базису для формування місткості по відправленню транспортних районів. Інформація щодо житлової площі з урахуванням поверховості була агрегована за транспортними районами, що в результаті дозволило отримати масив  $S_{жб}^i$ .

Формування місткості транспортних районів по прибуттю виконано на основі методики представленої в [13] з попередньою оцінкою дислокації місць прикладання праці по території міста. Остаточною умовою формування місткостей транспортних районів по відправленню та прибуттю є:

$$Q = \sum_{i=1}^R O_i = \sum_{j=1}^R D_j, \quad (2)$$

де  $Q$  – обсяг пересувань, авт.;

$D_j$  – місткість транспортного району по прибуттю, авт.;

$R$  – кількість сформованих транспортних районів, од.

Розробка сценаріїв сталого розвитку транспортної системи міста повинна передувати етап «діагностики» поточного стану. Виходячи з того, що в роботі приділена увага сталим заходам з транспортного обслуговування населення на індивідуальному транспорті етап аналізу поточного стану системи виконується з акцентом на даний спосіб пересувань. Ключовим аспектом при аналізі поїздок на приватних автомобілях є рівень заповнення ВДМ транспортними засобами. Небажаним є граничне заповнення міських вулиць, при якому інтенсивність потоку наближається або перевищує пропускну здатність ділянки ВДМ. Результат моделювання пересувань при поточному стані транспортної мережі міста Бровари наведено на рис. 3.

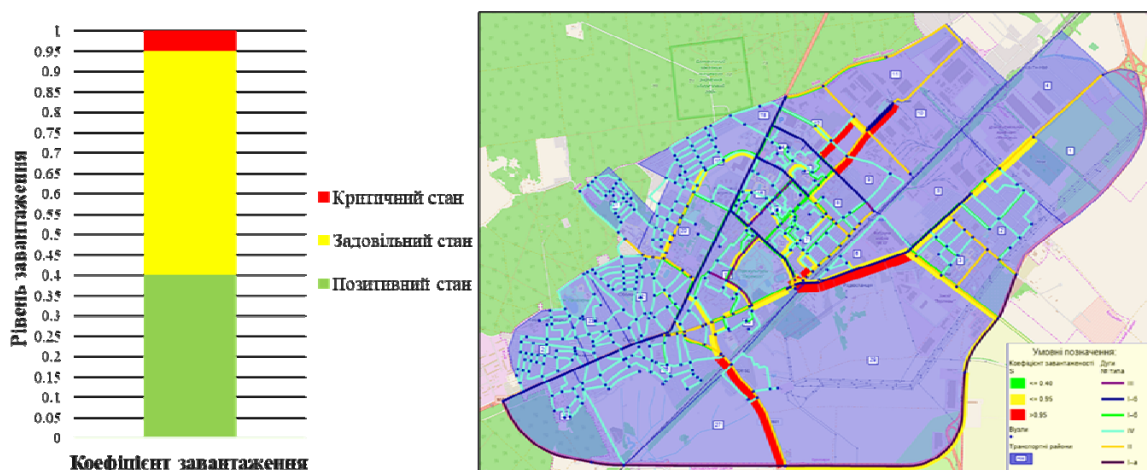


Рисунок 3 – Результат оцінки поточного стану транспортного обслуговування населення на індивідуальних транспортних засобах

Результати моделювання дозволили виявити низку ділянок ВДМ, на яких в поточний час якість транспортного обслуговування є незадовільною. Наявність заторів на ряді вулиць формує негативні наслідки соціального та екологічного характеру для мешканців досліджуваного міста. На основі діагностичних заходів щодо поточного стану транспортної мережі необхідно виконати розробку альтернативних сценаріїв розвитку. Слід брати до уваги, що при розробці сценаріїв не розглядаються варіанти розширення ділянок ВДМ для підвищення їх пропускну здатності. Це обумовлено тим, що згідно парадоксу Бреса [14] це може призвести до погіршення транспортного обслуговування в порівнянні з «базовим» варіантом. Поряд з цим імплементація сценаріїв не повинна супроводжуватись зі значними капітальними вкладками.

Керуючись вище позначеними правилами розроблено два альтернативні сценарії функціонування транспортної мережі. Перший сценарій передбачає впровадження жорстких мір щодо заборони руху в центральній частині міста. Другий сценарій

передбачає дозвіл пересувань на приватних автомобілях в центральній частині, але з обмеженням швидкості руху до 30 км/год. Поряд з цим кожен з сценаріїв передбачає низку заходів з реорганізації дорожнього руху в місті, серед яких в якості ключового є реверсивний рух по ділянках ВДМ. Це дозволяє врахувати нерівномірність транспортних потоків по напрямках руху в залежності від годин доби.

В якості критеріїв оцінювання сценаріїв впровадження сталого транспортного обслуговування застосовано соціальні та екологічні характеристики, які представлені наступними показниками:

$$t_a^{\text{день}} = \left( \frac{\Delta t_a}{60} \right) \cdot \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^R h_{ij}, \quad (3)$$

де  $t_a^{\text{день}}$  – сукупна економія часу на пересування транспортних засобів, хв.;

$\Delta t_a$  – економія часу пересування одного автомобіля, хв.;

$h_{ij}$  – кореспонденція між  $i$ -м та  $j$ -м транспортними районами міста, авт.

$$E_{CO_2} = \frac{\sum_{k=1}^K \left( 4 + \frac{472}{V_{c(k)}} \right) \cdot L_k \cdot Volume_k}{1000000}, \quad (4)$$

де  $V_{c(k)}$  – швидкість транспортного потоку на  $k$ -й ділянці ВДМ, км/год;

$L_k$  – довжина  $k$ -ї ділянки ВДМ, км;

$Volume_k$  – розмір транспортного потоку на  $k$ -й ділянці ВДМ, авт.

Безпосередньо масштабування добових значень (3) та (4) по кількості днів в році дозволяє виконати перехід до середньорічних показників. Для монетарної оцінки соціального ефекту враховується вартість одного часу для кожної особи, що виконує пересування в транспортній системі міста. Результати оцінки показників за альтернативними сценаріями наведено на рис. 4 та 5.

ОЦІНКА ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ				
Показники оцінювання	Базовий стан мережі	Сценарій 1	Сценарій 2	
Середня швидкість автомобіля по мережі, км/год.	36,79	38,82	39,01	Позитивний ефект
Середній час пересування автомобіля по мережі, хв.	8,67	8,07	7,78	
Середня дальність поїздки автомобіля, км.	5,05	5,10	5,02	Негативний ефект

Рисунок 4 – Результати моделювання базових атрибутів оцінки альтернативних сценаріїв

Аналіз показників транспортного обслуговування за Сценарієм 1 дозволив виявити зростання середньої швидкості руху та, як наслідок, скорочення часу пересування. Але заборона руху в центральній частині призвела до зростання середньої дальності пересування, що суперечить принципам SUMP. В свою чергу Сценарій 2 по усіх вище позначених показниках є кращим за поточний стан транспортної системи та Сценарій 1.

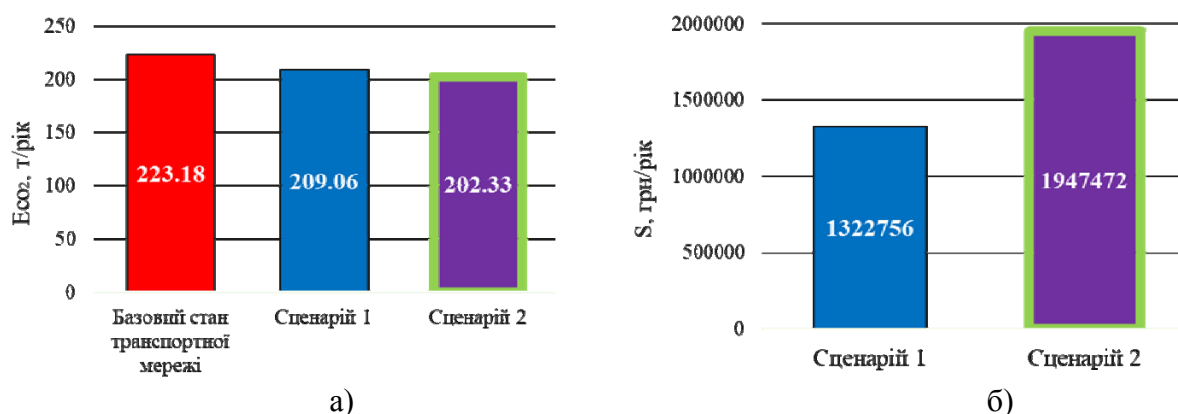


Рисунок 5 – Результати оцінки екологічного (а) та соціально-економічного (б) ефектів від впровадження альтернативних сценаріїв розвитку транспортної системи

Оцінка валових показників за альтернативними сценаріями дозволила сформувати остаточне уявлення про можливі результати від впровадження запропонованих заходів. На основі інтегральної оцінки екологічних та соціально-економічних показників зроблено висновок про доцільність впровадження Сценарію 2, який не передбачає жорсткої заборони на рух в центральній частині міста. Поряд з цим, згідно даних на рис. 5а видно, що екологічна ситуація не змінюється кардинально в кращу сторону. Це обумовлено автомобіле-орієнтованою мобільністю, яка розглядалась в роботі. Таким чином, покращення транспортних умов при автомобіле-орієнтованій мобільності не формує значного сталого ефекту, що вказує на необхідність застосування принципів TOD [5, 15, 16] при розробці сценаріїв сталого розвитку міст.

#### Висновки:

1. В умовах впровадження SUMP в країнах з автомобіле-орієнтованою мобільністю перехід на «зелені» види громадського транспорту повинен виконуватись поступово з імплементацією проміжного етапу, який включає в себе комплекс заходів щодо обмежень пересувань на приватних автомобілях в центральній частині міста (найбільш завантажена частина міста).

2. В умовах обмеження інформації щодо місткості транспортних районів по відправленню, яка є необхідною для розробки моделі транспортного попиту, доцільно застосування програмних продуктів на базі GIS даних. Вони дозволяють компенсувати відсутність статистичної інформації про кількість мешканців транспортних районів та виконати агрегування даної інформації шляхом формування цифрових шарів міської забудовлі.

3. Розроблені сценарії сталого розвитку транспортної системи міста дозволили оцінити екологічний вплив автомобіле-орієнтованої мобільності. Встановлено, що незважаючи на альтернативні заходи щодо обмежень пересувань на приватних автомобілях в центральній частині міста очікуваний екологічний ефект від таких заходів буде не суттєвим. Досягнуте зниження рівня заторів на ВДМ формує позитивний ефект лише для користувачів транспортної мережі в той час як непрямий вплив транспортної системи на мешканців міст залишається негативним.

#### Список літератури

1. Guidelines for Developing and Implementing a Sustainable Urban Mobility Plan, Consult Rupprecht, 2019. №2. P. 166.

2. Car-free development through UK community travel plans / D. Morris, M. Enoch, D. Pitfield, S. Ison. *Urban Design and Planning*. 2009. №162. P. 19-27
3. Khreis H., Nieuwenhuijsen M. J. Car free cities: Pathway to healthy urban living. *Environment International*. 2016. №94. P. 251-262.
4. Curtis C. Planning for sustainable accessibility: The implementation challenge. *Transport Policy*. 2008. №15. P. 104-112.
5. Papa E., Bertolini L. Accessibility and Transit-Oriented Development in European metropolitan areas. *Journal of Transport Geography*. 2015. №47. P. 70-83.
6. Estimation of transport accessibility in case of rational transport hub location / A. Rossolov, V. Naumov, N. Popova, E. Vakulenko, O. Levchenko. *Transport*. 2021. №36(1). P. 1-12
7. Rethinking bus-to-metro accessibility in new town development: Case studies in Shanghai / S.-s. Wu, Y. Zhuang, J. Chen, W. Wang, Y. Bai, S.-m. Lo . *Cities*. 2019. №94. P. 211-224.
8. Hickman R., Hall P., Banister D. Planning more for sustainable mobility. *Journal of Transport Geography*. 2013. №33. 210-2019.
9. Yang H., Bell, M. G H. Models and algorithms for road network design: a review and some new developments. *Transport Reviews*. 1998. №18. P. 257-278.
10. Kenworthy J., Hu G. Transport and urban form in Chinese cities: An international comparative and policy perspective with implications for sustainable urban transport in China. *The Planning Review*. 2002. №38. P. 4-14.
11. Koike H. Mobility perspective for a local city in Japan. *IATSS Research*. 2014. №38. P. 32-39.
12. Measurement of black carbon concentration as an indicator of air quality benefits of traffic restriction policies within the ecopass zone in Milan, Italy / G. Invernizzi, A. Ruprecht, R. Mazza, C. De Marco, G. Mocnik, C. Sioutas, D. Westerdahl . *Atmospheric Environment*. 2011. №45. P. 3522-3527.
13. Горбачёв П. Ф., Россолов А. В. Моделирование спроса на услуги пассажирского маршрутного транспорта в крупных городах: монография. Харьков. 2012. 152 с.
14. D. Braess, Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. *Unternehmensforschung*. 1969. №12, 258-268.
15. Carlton I. Histories of Transit-Oriented Development: Perspectives on the Development of the TOD Concept, Working Paper. 2009. No. 2009,02. University of California, Institute of Urban and Regional Development (IURD), Berkeley, CA
16. Кристопчук, М. Є. Оцінка параметрів сталої міської мобільності. *Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг = Crisis and Risk Engineering for Transport Services* : зб. доповідей Міжнар. науково-метод. конф. 2021. С. 355-362.

## References

1. Guidelines for Developing and Implementing a Sustainable Urban Mobility Plan, Consult Rupprecht, 2019. №2. P. 166 [in English].
2. Morris, D., Enoch, M., Pitfield, D. & Ison, S. (2009). Car-free development through UK community travel plans . *Urban Design and Planning*. 162. P. 19-27 [in English].
3. Khreis, H. & Nieuwenhuijsen, M. J. (2016). Car free cities: Pathway to healthy urban living. *Environment International*. 94. P. 251-262 [in English].
4. Curtis, C. (2008). Planning for sustainable accessibility: The implementation challenge. *Transport Policy*. 15. P. 104-112 [in English].
5. Papa, E. & Bertolini, L. (2015). Accessibility and Transit-Oriented Development in European metropolitan areas. *Journal of Transport Geography*. 47. P. 70-83 [in English].
6. Rossolov, A., Naumov, V., Popova, N., Vakulenko, E. & Levchenko, O. (2021). Estimation of transport accessibility in case of rational transport hub location . *Transport*. 36(1). P. 1-12 [in English].
7. Wu S.-s., Zhuang Y., Chen J., Wang W., Bai Y. & Lo S.-m. (2019). Rethinking bus-to-metro accessibility in new town development: Case studies in Shanghai . *Cities*. 94. P. 211-224 [in English].
8. Hickman, R., Hall, P. & Banister, D. (2013). Planning more for sustainable mobility. *Journal of Transport Geography*. 33. 210-2019 [in English].
9. Yang H. & Bell, M. G H. (1998). Models and algorithms for road network design: a review and some new developments. *Transport Reviews*. 18. P. 257-278 [in English].
10. Kenworthy, J. & Hu, G. (2002). Transport and urban form in Chinese cities: An international comparative and policy perspective with implications for sustainable urban transport in China. *The Planning Review*. 38. P. 4-14 [in English].
11. Koike, H. (2014). Mobility perspective for a local city in Japan. *IATSS Research*. 38. P. 32-39[in English].

12. G. Invernizzi et al. (2011). Measurement of black carbon concentration as an indicator of air quality benefits of traffic restriction policies within the ecopass zone in Milan, Italy . *Atmospheric Environment*. 45. P. 3522-3527 [in English].
13. Horbachov, P. & Rossolov, A. (2012). *Modelirovanie sprosa na uslugi passazhirskogo marshrutnogo transporta v krupnykh gorodakh: monografiya* [Modeling the demand for passenger route transport services in large cities]. Khar'kov [in Russian].
14. Braess, D. (1969). Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. *Unternehmensforschung*. 12, 258-268 [in Germanin].
15. Carlton I. Histories of Transit-Oriented Development: Perspectives on the Development of the TOD Concept, Working Paper. 2009. No. 2009,02. University of California, Institute of Urban and Regional Development (IURD), Berkeley, CA [in English].
16. Krystopchuk, M. (2021). Otsinka parametriv staloi miskoi mobilnosti. *Inzhynirynh kryz ta ryzykiv transportnykh posluh – Crisis and Risk Engineering for Transport Services* : zb. dopovidei Mizhnar. naukovo-metod. konf. P. 355-362 [in Ukrainian].

**Alexander Rossolov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergii Lyfenko**, Master's Student  
*O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine*

### **Assessing the Scenarios for Sustainable Development of Transport Systems in the Cities With Car-oriented Mobility**

The paper aimed at assessing the scenarios for transport systems sustainable development under car-oriented society.

As SUMP supposes limitation in private cars usage, we focused within this study on assessing the direct and indirect effects due to sustainable measures deployment in a case of car-based mobility. Also, we proposed a new option to determine the number of cars origin from the transport zones using GIS-based data. To achieve the major aims of this study we conducted the experimental research on urban mobility when people tend to use the private cars instead of public transit. The simulation has been conducted with PTV Visum software. Brovary city has been chosen as a case study to reveal the advantages and disadvantages of the car-oriented mobility. We developed two alternative scenarios considering the total ban for entering the city center by the private cars and soft conditions when the cars can cross the city center but with speed restriction. Besides that, both scenarios supposed the changes in traffic organization, namely the revers movement introduction. As the results we revealed the reduction in travel times for both scenarios, but the average travel distance has increased for scenario with ban for entering the city center by the cars. As for the second scenario with soft restrictions it allowed to reduce the travel time, travel distance and increase the traffic speed. But the indirect effect reflected by the CO<sub>2</sub> emissions reduction has not changed significantly.

Based on these results we can state that sustainable measures in a case of car-oriented mobility can provide only the direct effect for car users. The indirect effect remains quite low allowing to conclude that sustainable development should be grounded on TOD and non-motorized modes.

**car-oriented mobility, transport demand model, supply model, ecological effect**

*Одержано (Received) 08.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 20.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).232-247](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).232-247)

**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **Д.В. Голуб**, доц., канд. техн. наук, **А.С. Замуренко**, асп., **А.В. Гриньків**, ст. наук. співр., канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **В.О. Дьяченко**, асп.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: AulinVV@gmail.com, dimchik529@gmail.com*

## Теоретичний системно-спрямований підхід до визначення інтегрального показника ефективності реалізації операцій в транспортних системах

Наведено підхід до визначення показника ефективності реалізації операцій в транспортних системах, що є мірою відповідності реального результату операцій бажаному, а отже є мірою гарантії або ймовірністю того, що термін служби транспортної послуги буде не менше необхідного. Дано алгоритм його визначення та графічно зображено функції розподілу результату операції, показано схеми оцінки ймовірнісної гарантії. Розглянуто перелік вимог, яким повинен задовольняти показник ефективності та форми його виміру.

Виявлено, що при дослідженні ефективності операцій широко поширений показник середнього результату, який використовується в тих випадках, коли мета операції виражається числовою змінною.

З'ясовано, що важливою властивістю показника середнього результату є його адитивність, а збільшення кількісного показника періодичності призводить до зниження якості транспортної системи і не виконання властивості адитивності.

Наведено принципи використання характеристики розсіювання реального результату відносно необхідного значення або математичного очікування в якості показника ефективності при умовах описання результату випадковою величиною. Наведено графічну ілюстрацію функцій відповідності щодо показників розсіювання результату.

**транспортна система, підсистема, показник, ефективність, операція, ймовірність, міра гарантії**

**Постановка проблеми.** Відомо, що в реальних системах може мати місце суперечність цілей підсистем різних рівнів ієрархії систем [1]. Врахування цього показника передбачається забезпечувати за рахунок відповідного вибору змінних для дослідження ефективності на кожному рівні ієрархії, оскільки часто показники для оцінки підсистем, що знаходяться нижче, призначаються вищестоящою системою. А тому має сенс оцінювати ефективність системи з двох позицій: з точки зору міри досягнення мети (тобто відповідності бажаних і досягнутих показників) і з точки зору співвідношення витрат і результатів.

Якщо мета (мінімально прийнятний рівень) в принципі не досягнута, то тоді вести мову про співвідношення витрат і результатів не має сенсу. При дослідженні багаторівневої системи важливим чинником, що ускладнює оперативне ухвалення рішень, що стосуються оцінки ефективності, є великий об'єм числових даних, оскільки показник ефективності може бути визначений для кожної підсистеми і кожного елемента в кожній підсистемі [2].

З метою зниження інформаційного перевантаження верхніх рівнів ієрархії [3] необхідно запропонувати системі прийняття рішень деякий узагальнений показник,



який характеризував би внутрішню ефективність усієї системи в цілому і був би осяжним, тобто доступним для сприйняття без подальшої математичної обробки. Під зовнішньою ефективністю розумітимемо ефективність системи, визначену при погляді на систему ззовні [4], тобто як на монолітний об'єкт, що не має структури.

Представляється доцільним побудувати такий інтегральний показник на основі показників ефективності підсистем і елементів досліджуваної системи. При цьому, необхідно врахувати і міру важливості підсистем і елементів.

Так само, як і при розв'язанні задачі перерозподілу ресурсів в підсистемах [5], нам не обійтися без використання штучних еталонних меж ефективності, оскільки існуючі методи у своїй традиційній формі дозволяють отримати лише показник відносної ефективності об'єктів шляхом зіставлення їх між собою. Але у такому разі об'єднувати показники ефективності, розраховані для елементів різних підсистем, не представляється можливим: така інтегральна оцінка не буде коректною, оскільки в кожній підсистемі буде, фактично, своя точка відліку для визначення показників ефективності елементів кожної підсистеми.

Пропонований підхід призначений для дослідження ефективності складних ієрархічних систем, в яких є підсистеми дискретного типу, що мають при цьому властивість взаємної компенсації чинників, таких як транспортні системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним з шляхів підвищення ефективності системи є раціональний (оптимальний) розподіл ресурсів усередині системи [6].

Теорія потенційної ефективності складних систем, приведена в роботі [7], займає проміжне положення між концептуальною частиною системології і більш конкретними, розрахунковими методами аналізу систем. Метою цієї теорії є формулювання загальних граничних законів, що обмежують ефективність складних систем будь-якої природи [7]. Основним поняттям цієї теорії є поняття  $(u, v)$  - обміну між системою А і середовищем В, де  $u$  - деяка кількість абстрактних ресурсів, що витрачаються системою, які система «платить» середовищу за кількість  $v$  абстрактних ресурсів. При цьому вказується на дуже примітну обставину: на загальний характер граничного закону для різноманітних моделей складних систем, що виникають незалежно один від одного в теоріях надійності, інформації, ігор та інших областях [8]. Це пов'язано з проявом імовірнісного закону великих відхилень, властивого асимптотичній поведінці усіх даних моделей. Імовірнісна форма визначення ефективності системи досягаючи окремих її тактичних цілей дозволяє оцінити ймовірність досягнення нею стратегічної мети за допомогою нерівності Буля [8]. Зокрема, на основі оцінок ефективності за окремими якістьями можливо оцінити якість самої цілісної системи.

У роботі [8] відзначається, що досконала теорія дозволяє оцінити потенційну ефективність складних технічних систем в цілому і залежно від цього призначити раціональні вимоги до ефективності їх підсистем. Вона може бути використана при дослідженні транспортних систем [7].

У методиці, запропонованій в роботі [9], використовується дещо спрощений показник ефективності. Його роль відіграє скаляр, який є об'ємом одного виду продукції, що виробляється в підсистемах ієрархічної системи. Ресурси, що використовуються системою, в явному виді не включені в розгляд. Мова про структуру вхідних і вихідних змінних (якби це були вектори) не йдеться. Рекомендації по перерозподілу ресурсів не сформульовані у формі алгоритму, а тому носять досить узагальнений характер.

Методика, пропонується в роботі [10], слугує хорошим інструментом для проведення оцінки досягнутого рівня ефективності в досліджуваній системі, не

дозволяє дати для неї яких-небудь прогнозів відносно ефективності в майбутні періоди і запропонувати рекомендації по перерозподілу ресурсів в системі з метою підвищення її ефективності. Вона пропонує механізм коригування значень показників ефективності об'єктів на різних рівнях ієрархії з урахуванням ефективності груп, в які входять ці об'єкти. При цьому ураховується ефективність вищестоящих об'єктів.

Проте не запропоновано способу визначення інтегральної внутрішньої ефективності усїєї ієрархічної системи. Такий показник міг би відображати ефективність усіх підсистем складної багаторівневої системи, такої як транспортної. При оцінці ефективності системи, що має ієрархічну структуру, виникає проблема оцінки ефективності підсистем на різних рівнях ієрархії [11], а також проблема агрегації оцінок ефективності окремих об'єктів в єдину оцінку ефективності системи.

Вирішення проблеми агрегації оцінок ефективності для однорівневих економічних систем були запропоновані в роботах [12, 13]. Основна ідея запропонованого в роботі [13] способу агрегації оцінок ефективності полягає у використанні зваженого середнього оцінок ефективності окремих об'єктів, а вагові коефіцієнти об'єктів визначати, виходячи з часток кожного об'єкту в сукупному доході групи об'єктів (галузі), а також долею об'єктів у використанні ресурсів і у виробництві кожного виду продукції. В результаті враховується економічна значущість об'єкту при визначенні його вкладу в агреговану (інтегральну) оцінку ефективності усїєї групи об'єктів.

Таким чином, видається необхідною розробка формалізованої методики дослідження ефективності ієрархічних систем, яка заповнювала б відмічені недоліки вищеописаних методик. У основу цієї методики має бути покладений метод оцінки ефективності, що відноситься до середнього рівня спільності.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є розробка підходу до визначення показника ефективності реалізації операцій в транспортних системах, що є мірою відповідності реального результату операцій бажаному, а отже - мірою гарантії або ймовірності того, що термін служби транспортної послуги буде не менше необхідного.

**Виклад основного матеріалу.** Показник ефективності  $W(u)$  реалізації операції в транспортних системах є мірою відповідності реального результату операцій бажаному [14]. Значимо, що цей показник залежить від стратегії  $u$  і визначається на множині допустимих стратегій  $U$ :  $u \in U$ . У загальному вигляді залежність  $W(u)$  задається відображенням допустимих стратегій  $U$  у множині значень показника ефективності  $W$ :  $\Psi: U \rightarrow W$ . В той час як звичайне відображення  $T$  задається у формі певної математичної моделі операцій.

Основною вимогою при виборі показника ефективності є відповідність показника ефективності меті операцій  $A_0$ , які відображаються в необхідному (бажаному) результаті  $Y^{нб}$ . Крім того, показник ефективності повинен задовольняти наступним вимогам: змістовності (фізичної, економічної або іншої природи); інтерпретації або тлумачення отриманих математичних залежностей і результатів стосовно даних конкретних областей; вимірності; відповідності системі переваг особи (осіб), що приймає рішення (ОПР).

Розглянемо більш детально деякі з цих вимог. Показник ефективності може вимірюватися як в метричній, так і порядковій шкалах. Для опису відповідності реального результату операції  $Y$  необхідному результату  $Y^{нб}$  формально вводять числову функцію - функцію відповідності на множині результатів операції:

$$\rho = \rho[Y(u), Y^{нб}]. \quad (1)$$

Ця функція відповідності показує міру реалізації мети операції, а конкретний її вид залежить від мети операції, завдання дослідження, а також інших чинників. Внаслідок того, що  $Y(u)$  може бути випадковою змінною (числовою або нечисловою), функція відповідності також може бути випадковою числовою функцією випадкового аргументу. У деяких задачах  $Y^{nb}$  доводиться вводити як випадкову змінну. Якщо результат подається випадковою змінною, то запис  $Y(u)$  означає, що розподіл залежить від стратегії  $u \in U$ . В цьому випадку функція розподілу  $F_u(y)$  записується з індексом  $u$ , оскільки вид її залежить від  $u$ .

При цьому математичне очікування функції дозволяє розглядати як показник ефективності  $W(u)$ :

$$W(u) = M\{\rho[Y(u), Y^{nb}]\}, \quad (2)$$

де  $M$  – операція математичного очікування.

Якщо  $Y(u)$  і  $Y^{nb}$  – невідповідні змінні, то маємо:

$$W(u) = \rho[Y(u), Y^{nb}].$$

Визначено, що у детермінованому випадку функцію відповідності можливо використати в якості показника ефективності операції. Це означає, що показник ефективності повинен враховувати психологічні особливості ОПР. Тобто відображаються її відношення до різних ситуацій в умовах невизначеності: схильність, несхильність або байдужість до ризику. Формально психологічні особливості ОПР враховуються введенням спеціальної оцінної функції  $f^{\theta_c}(\rho)$ , що відображає відношення ОПР до ризику.

У випадках, коли функція  $f^{\theta_c}(\rho)$  є випадковою, то показник ефективності  $W$  є математичним очікуванням спеціальної оцінної функції:

$$W(u) = M\{f^{\theta_c}\{\rho[Y(u), Y^{mp}]\}\}. \quad (3)$$

Якщо результат  $Y$  операції може бути описаний єдиною величиною  $y$ , то вирази (2) і (3) визначають скалярні показники ефективності. В інших випадках вводять векторний показник ефективності:

$$W(u) = \|W_1(u), W_2(u), \dots, W_m(u)\|^T, \quad (4)$$

де  $W_i(u)$ ,  $i = \overline{1, m}$  визначається за виразом (2) з підстановкою замість  $Y(u)$ ,  $Y^{nb}$  величин  $y_i(u)$ ,  $y_i^{nb}$  часткових характеристик результату:

$$W_i(u) = M\{\rho[y_i(u), y_i^{nb}]\}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Векторний показник ефективності накладає додаткові вимоги: мінімальності числа часткових показників і повноти. Зазвичай векторний показник вводять у випадках, коли єдина мета операцій досягається рішенням декількох завдань, ефективність рішення кожного з яких оцінюється відповідним частковим показником  $W_i(u)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , але згорнути ці показники в один узагальнений показник не вдається.

Ці часткові завдання можуть вирішуватися окремими підсистемами, що входять в загальну систему  $S_0$ , і тоді  $W_i(u)$  є показник ефективності часткових операцій, що проводяться  $i$ -підсистемою. Крім того, ці завдання можуть вирішуватися однією підсистемою, але на різних етапах операцій, і тоді  $W_i(u)$  є показник ефективності рішення завдання на  $i$ -му етапі операцій.

Показник ефективності у вигляді виразу (3) є найбільш загальним. Залежно від виду оцінної функції  $f^{\theta_c}(\rho)$  і функції відповідності  $\rho[Y(u), Y^{нб}]$  можна отримати різні показники ефективності.

Розглянемо це на прикладі скалярних показників, які часто використовуються при дослідженнях ефективності транспортних систем. Щоб відокремити випадкову величину від її можливого значення, над відповідною літерою ставитимемо символ  $\wedge$ :  $\hat{\rho}$  - випадкова величина,  $\rho$  - її можливе значення.

При дослідженні ефективності операцій, коли мета операції виражається числовою змінною широко використовується показник середнього результату:

$$\overline{W(u)} = M[y(u)]. \quad (5)$$

Очевидно, що вираз (5) є часткою випадком показника (2), коли функція відповідності дорівнює реальному результату:

$$\rho[y(u), y^{нб}] = y(u).$$

Знаючи показник середнього результату і діапазон зміни результату, можна порівняти його значення з гранично великим значенням.

Слід зазначити, що важливою властивістю показника середнього результату є його адитивність:

$$M\left[\sum_i \hat{y}_i\right] = \sum_i M[\hat{y}_i]. \quad (6)$$

Якщо результат операції  $\hat{y}(u)$  представити у вигляді суми результатів дій підсистеми  $\hat{y} = \sum \hat{y}_i$ , то середній результат операції дорівнює сумі середніх часткових результатів, незважаючи на можливу їх стохастичну залежність.

Виявлено, що збільшення кількісного показника періодичності призводить до зниження якості транспортної системи за показником періодичності і властивість адитивності не справджується. Для дотримання адитивності необхідно, щоб збільшення чисельного значення результату операції відповідало поліпшенню якості транспортної системи, а не навпаки.

Нехай мета операції описується випадковою подією А, настання якої є бажаним результатом операції. Комплекс умов, а отже, і ймовірність  $P_u(a)$  настання цієї події залежать від стратегії  $u \in U$ . Функція відповідності  $\rho$  в цьому випадку розглядається як бернулівська змінна, яка може набути значення 0 або 1:

$$\rho[y(u), y^{нб}] = \begin{cases} 1, & \text{якщо подія } A \text{ настає;} \\ 0, & \text{в протилежному випадку.} \end{cases} \quad (7)$$

При цьому функції відповідності  $y^{нб}=1$ . Ймовірність події А є математичним очікуванням бернулівської змінної або функції відповідності (7):

$$M\{\rho[y_i(u), y_i^{нб}]\} = 1 \cdot P_u(A) + 0 \cdot P_u(\bar{A})$$

Отже показник ефективності є ймовірність настання події А:

$$W(u) = P_u(A).$$

Часто подія А подається співвідношенням між реальним результатом  $y(u)$  і необхідним  $y^{нб}$ :

$$A_1 = \{\hat{y}(u) \geq y^{нб}\} \text{ або } A_2 = \{y_1^{нб} \leq \hat{y}(u) \leq y_2^{нб}\}.$$

Функції відповідності для цих подій вводяться таким чином:

- для події  $A_1$

$$\rho[y(u), y^{нб}] = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \hat{y}(u) \geq y_1^{нб}; \\ 0, \text{ якщо } \hat{y}(u) < y_1^{нб}; \end{cases} \quad (8)$$

- для події  $A_2$

$$\rho[y(u), y^{нб}] = \begin{cases} 1, \text{ якщо } y_1^{нб} \leq \hat{y}(u) \leq y_2^{нб}; \\ 0, \text{ протилежному випадку.} \end{cases}$$

Зазначимо, що функцію відповідності використовують у випадках, коли необхідний результат завдання і його досягнення є неодмінною умовою виконання поставленого завдання. При цьому показник ефективності дорівнює:

$$W(u) = P\{\rho[y(u), y^{нб}]\} = P\{\hat{y}(u) \geq y^{нб}\} \quad (9)$$

Він трактується як імовірнісна міра гарантії виконання поставленого завдання.

Якщо мета операції полягала у забезпеченні підвищення терміну служби послуги до рівня, не нижче необхідного  $y^{нб}$ , то показник ефективності операції (9) є мірою гарантії або ймовірністю того, що термін служби послуги буде не менше необхідного. При відомій функції розподілу реального результату  $F(y)$  показник ефективності набуває вигляду:

$$W(u) = 1 - F_u(y^{нб}).$$

Графічна інтерпретація функції розподілу  $F(y)$  представлена на рис. 1. Зображена функція розподілу результату операції і показана схема оцінки імовірнісної гарантії:

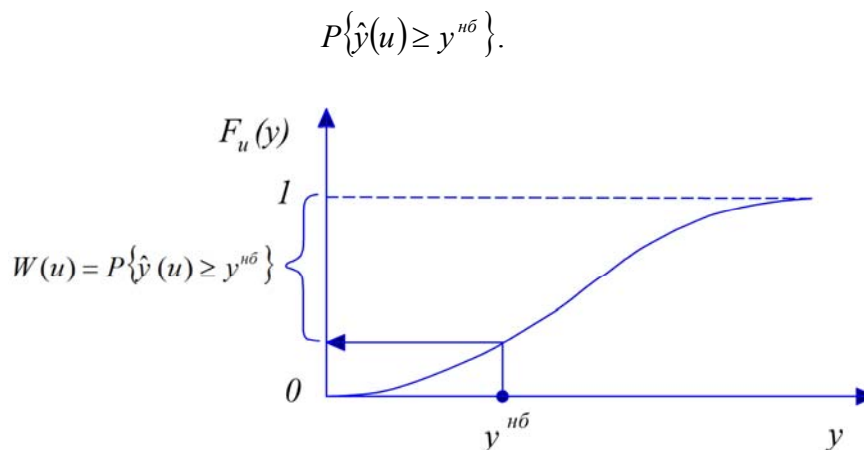
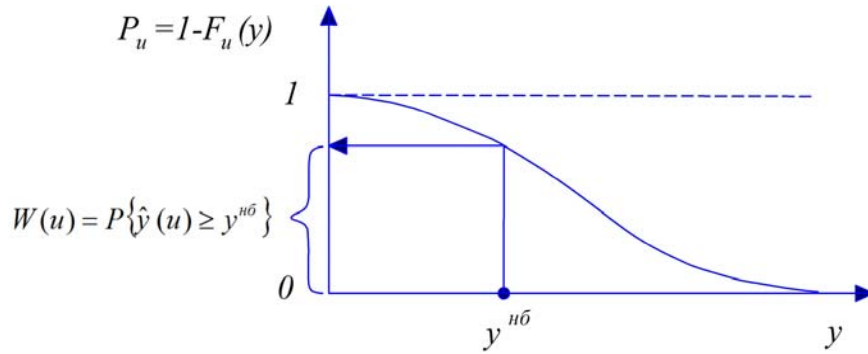


Рисунок 1 – Схематичне зображення функції розподілу  $F(y)$  результату операції  
Джерело: розроблено авторами

На рис. 2 дано графічну інтерпретацію функції протилежної функції розподілу  $F_u(y)$ . У цьому випадку отриману функцію можна трактувати як функцію надійності досягнення результату операції.



Рисунку 2 – Схематичне зображення функції надійності або результату операції  
Джерело: розроблено авторами

Можна бачити, що ймовірність  $P\{\hat{y}(u) \geq y^{nb}\}$  залишилася тією ж, але на графіку вона змістилася. В якості показника ефективності операції разом з виразом (9) може бути прийнято мінімальний результат, що отримується із заданою ймовірністю:

$$\gamma = P(\hat{y} \geq y_\gamma). \quad (10)$$

Оскільки  $F(\hat{y}) = P(\hat{y} \leq y^{nb})$  або  $P(y^{nb} \geq \hat{y}) = 1 - F(\hat{y})$ , то

$$\gamma = P(\hat{y} \geq y_\gamma) = 1 - F(y_\gamma), \quad (11)$$

де  $F(y)$  - функція розподілу реального результату операції (випадкової величини  $y(u)$ ).

Розв'язавши рівняння (12) відносно  $y_\gamma$ , отримаємо:

$$y_\gamma = F^{-1}(1 - \gamma). \quad (12)$$

Значимо, що  $y_\gamma$  є зворотною функцією до функції розподілу  $F(y)$  при значенні аргументу  $a=1-\gamma$ , тобто,  $y_\gamma$  - квантиль. Нагадаємо, що квантиль - це аргумент функції розподілу при заданій ймовірності.

Функція розподілу результату операції і сам гарантований результат (перехід від  $a=1-\gamma$  до  $y_\gamma$ ) показано на рис. 3.

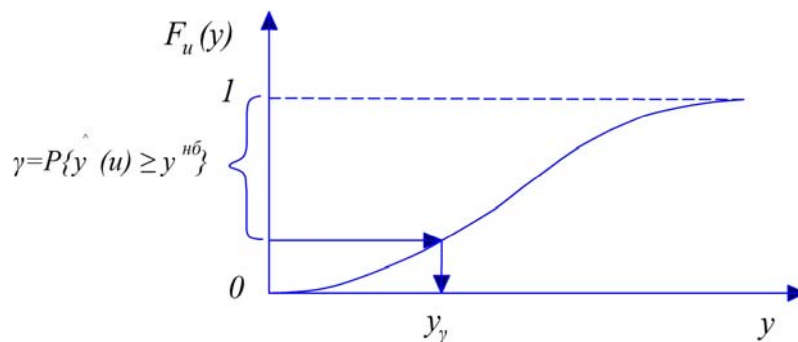


Рисунок 3 – Схематичне зображення функції розподілу результату операції та гарантованого результату

Джерело: розроблено авторами

При цьому функція відповідності має вигляд:

$$\rho = F^{-1}(1 - \gamma). \quad (13)$$

Вона є величиною не випадковою і її математичне очікування дорівнює  $\rho$ .

Враховуючи це, показник ефективності у формі (2) має вигляд:

$$W(u) = M[\rho] = y_\gamma. \quad (14)$$

Таким чином, необхідний результат побічно відображає заданий або необхідний рівень ймовірності, що є мірою гарантії. На практиці при оцінці ефективності операцій доводиться враховувати випадковий характер необхідного або потрібного результату.

В якості результату операції по підвищенню надійності транспортної системи можна вважати, щоб термін її безвідмовної роботи був не менше періоду часу активного функціонування цієї системи (рис. 4).

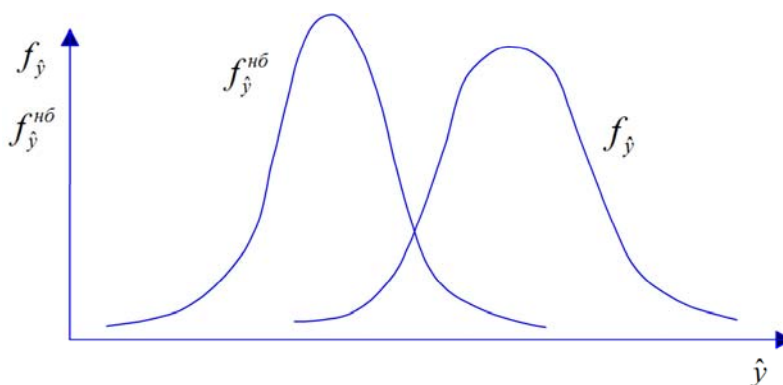


Рисунок 4 – Щільність розподілу випадкових величин

Джерело: розроблено авторами

Термін безвідмовної роботи транспортної системи і період часу її активних робіт можуть мати випадковий характер. Необхідний результат в цих умовах описується випадковою змінною  $\hat{y}^{nb}$ , яка є мінімально необхідним результатом. Якщо  $\hat{y}^{nb}$  - випадкова величина або числова випадкова змінна, то її розподіл описує функція розподілу  $F_u(y^{nb})$ .

У випадках, коли метою операції є досягнення результату  $y(u)$  не нижче необхідного рівня, то функцію відповідності можна ввести по аналогії з виразом (8):

$$\rho[\hat{y}(u), \hat{y}^{nb}] = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \hat{y}(u) \geq \hat{y}^{nb}; \\ 0, & \text{якщо } \hat{y}(u) < \hat{y}^{nb}; \end{cases} \quad (15)$$

При цьому показник ефективності дорівнює:

$$W(u) = M\{\rho[\hat{y}(u), \hat{y}^{nb}]\} = P[\hat{y}(u) \geq \hat{y}^{nb}]. \quad (16)$$

Вираз (16) свідчить, що показник ефективності є математичним очікуванням функції відповідності (15), а також є ймовірністю гарантією того, що реальний результат буде не менш необхідного при випадковому характері як реального, так і потрібного результатів.

Розглянемо, процедуру обчислення показника ефективності по функціях розподілу випадкових величин. Для цього введемо в розгляд спільну щільність розподілу  $f(y, y^{nb})$  випадкових величин  $y$  і  $y^{nb}$  та опустимо галочки в їх позначеннях.

Область допустимих значень  $y$  і  $y^{нб}$ , при яких дотримується умова  $y \geq y^{нб}$  відображена на рис. 5.

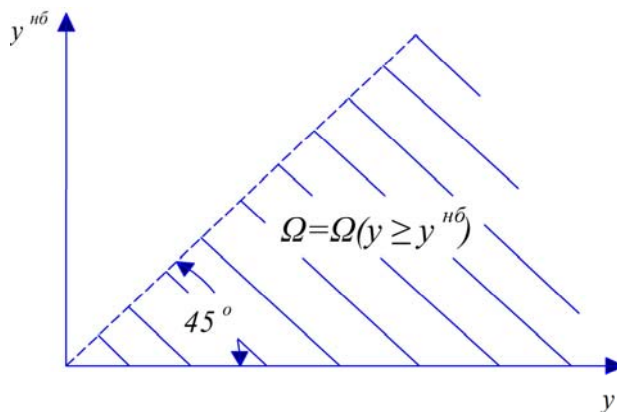


Рисунок 5 – Схематичне зображення області надійної роботи елемента транспортної системи  
Джерело: розроблено авторами

Якщо взяти інтеграл від функції щільності  $f(y, y^{нб})$  по області  $\Omega$ , то отримаємо ймовірність безвідмовної роботи елемента транспортної системи, тобто його надійність:

$$P(y \geq y^{нб}) = \int_{\Omega} f(y, y^{нб}) dy dy^{нб}, \quad (17)$$

Оскільки випадкові величини  $y$  і  $y^{нб}$  незалежні, то спільну щільність  $f(y, y^{нб})$  можна представити у вигляді:

$$f(y, y^{нб}) = f(y)f(y^{нб}), \quad (18)$$

де  $f(y)$  і  $f(y^{нб})$  – щільність розподілу випадкових величин  $y$  і  $y^{нб}$  відповідно.

Щоб при інтегруванні вираз (18) залишився в області  $\Omega$ , то необхідно змінювати параметр  $y$  змінювати від 0 до  $\infty$ , а  $y^{нб}$  – від 0 до значення  $y = y^{нб}$ . Враховуючи зазначене, маємо:

$$P(y \geq y^{нб}) = \int_{\Omega} f(y, y^{нб}) dy dy^{нб} = \int_0^{\infty} \int_0^{y^{нб}} f(y)f(y^{нб}) dy dy^{нб} = \int_0^{\infty} f(y) \left[ \int_0^{y^{нб}} f(y^{нб}) dy^{нб} \right]. \quad (19)$$

Якщо врахувати інтегральну функцію розподілу:

$$\left[ \int_0^{y^{нб}} f(y^{нб}) dy^{нб} \right] = F(y^{нб}), \quad (20)$$

то остаточно отримуємо:

$$P(y \geq y^{нб}) = \int_0^{\infty} f(y)F(y^{нб}) dy. \quad (21)$$

Остання залежність дає можливість обчислити значення показника ефективності по відомих функціях розподілу випадкових величин.

Розглянемо показник ефективності як усереднену міру перевищення випадкової величини отриманого результату над невизначеною величиною необхідного результату. Для цього припустимо, що має місце деяка невизначеність при встановленні необхідного результату операцій  $y^{нб}$ . Якщо ця невизначеність



нестохастичного характеру, то вводять функцію приналежності  $\mu_A(y)$  для нечіткої випадкової події  $A = \{\hat{y}(u) \geq \tilde{y}^{nb}\}$ .

У записі події  $A$  змінна  $\hat{y}(u)$  є випадковою величиною з функцією розподілу  $F_u(y)$ , але  $\tilde{y}^{nb}$  є невизначеною змінною нестохастичного характеру з функцією приналежності  $\mu_A(y)$ . Нечітку (лінгвістичну) змінну позначено символом  $\tilde{y}^{nb}$ .

При цьому нечітка випадкова подія  $A$  розглядається наступним чином. Як відомо з теорії ймовірності, випадкова подія  $A$  є підмножиною простору елементарних подій  $E$ , тобто  $A \subset E$ . Припустимо, що  $A$  є нечіткою підмножиною множини  $E$ , тобто  $A \subset E$ , яка задана функцією приналежності  $\mu_A$ . Для спрощення розглянемо випадок, коли  $E$  є не більше ніж розрахунковий. Кожній елементарній події  $e_i \in E$  ставиться у відповідність не лише ймовірність її настання  $P(e_i)$ , але і міра приналежності  $e_i$  підмножині  $A$ , тобто маємо  $\mu_A(e_i)$ ,  $0 \leq \mu_A(e_i) \leq 1$ . Щоб знайти ймовірність настання нечіткої випадкової події  $A$ , слід по усіх елементарних подіях  $e_i \in E$  підсумувати добутки  $\mu_A(e_i)P(e_i)$ :

$$P(A) = \sum_{i=1}^n \mu_A(e_i)P(e_i). \quad (22)$$

Останній запис являє собою математичне очікування дискретної випадкової величини  $\mu_A$ . Таким чином, ймовірність настання нечіткої випадкової події є математичним очікуванням функції приналежності нечіткої події:

$$P(A) = M[\mu_A]. \quad (23)$$

Якщо метою операції є досягнення результату  $y(u)$  не нижче необхідного рівня при нечіткому завданні останнього, то функцію відповідності вводиться по аналогії з виразом (15):

$$\rho[\hat{y}(u), \tilde{y}^{nb}] = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \hat{y}(u) \geq \tilde{y}^{nb}; \\ 0, & \text{якщо } \hat{y}(u) < \tilde{y}^{nb}; \end{cases} \quad (24)$$

Тоді маємо:

$$M\{\rho[\hat{y}(u), \tilde{y}^{nb}]\} = P[\hat{y}(u) \geq \tilde{y}^{nb}] = M[\mu(y^{nb})]. \quad (25)$$

В загальному випадку це можна записати у вигляді:

$$P[\hat{y}(u) \geq \tilde{y}^{nb}] = \int_E \mu_1(y) dF(y), \quad (26)$$

де  $E$  – область зміни випадкових чинників.

В той час можна зазначити, що в якості функції відповідності в таких умовах може бути використана і сама функція приналежності:

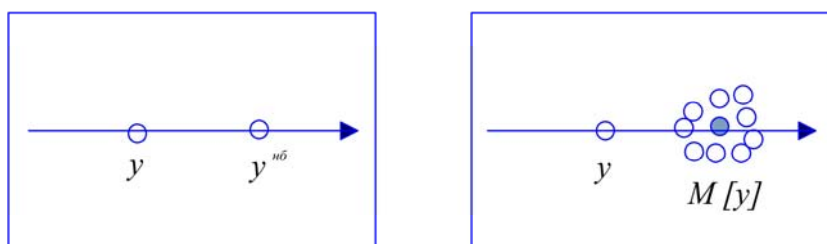
$$P[\hat{y}(u), \tilde{y}^{nb}] = \mu_A(y^{nb}). \quad (27)$$

Іноді в якості показника ефективності в умовах, коли результат описується випадковою величиною, використовують характеристику розсіювання реального результату відносно необхідного значення або відносно математичного очікування. Функції відповідності в цьому випадку мають вигляд:

$$\rho(y, y^{nb}) = [\hat{y}(u) - y^{nb}]^2; \quad (28)$$

$$\rho(y, y^{nb}) = \{\hat{y}(u) - M[y(\hat{u})]\}^2. \quad (29)$$

Графічна ілюстрація цих функцій відповідності щодо показників розсіювання результату приведена на рис. 6.



а

б

Рисунок 6 – Графічна ілюстрація для функції відповідності щодо показників розсіювання результатів:  
а – початковий момент; б – момент розсіювання

Джерело: розроблено авторами

У першому випадку (рис. 6 а) показник ефективності є математичним очікуванням квадрату відхилення реального результату від необхідного:

$$W(u) = M[\rho(y, y^{нб})] = M[\hat{y}(u) - y^{нб}]^2, \quad (30)$$

а в другому випадку (рис. 6 б) - дисперсія реального результату:

$$W(u) = M\{\hat{y}(u) - M[\hat{y}(u) - y^{нб}]\}^2 = D^2[\hat{y}(u)]. \quad (31)$$

На практиці досліджень ефективності транспортних систем показники (30) і (31) використовують як допоміжні.

В якості показника ефективності операцій в транспортних системах, пов'язаних з розпізнаванням певних ситуацій методи теорії статистичних рішень рекомендують вибирати середні втрати, наприклад середній ризик, які з'являються при неправильному помилковому розпізнаванні або їх детермінуванні.

У цих випадках в якості функції відповідності приймається функція втрати  $\Pi_{ij}$ , пов'язана з тим, що транспортна система, що функціонує в ситуаціях, що описуються множиною  $H_i$ , була помилково (при  $i \neq j$ ) віднесена до множини  $H_j$ . При цьому функція відповідності має вигляд:

$$\rho[y(u), y^{нб}] = \Pi_{ij}. \quad (32)$$

Нехай  $P(H_i)$  – ймовірність того, що функціонування транспортної системи характеризується множиною  $H_i$ ;  $P_u(H_j|H_i)$  - умовна ймовірність її віднесення з множини  $H_i$  до множини  $H_j$ . Це так звана ймовірність помилки при  $i \neq j$ .

Показник ефективності операції по розпізнаванню або детермінації транспортних систем записується у вигляді середніх втрат (байєсівський середній ризик) :

$$W(u) = M[\rho] = \sum_i \sum_j \Pi_{ij} P(H_i) P_u(H_j|H_i). \quad (33)$$

В цьому випадку також показник ефективності є математичним очікуванням функції відповідності  $\rho = \Pi_{ij}$ . Індекс  $i$  в записі умовної ймовірності  $P_u(H_j|H_i)$  показує, що вона залежить від стратегії розпізнавання або детермінації  $u \in U$ .

Різні форми функції відповідності і показника ефективності зібрані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Форми показників ефективності і функцій відповідності

Назва показника ефективності	Показник ефективності $W(u) = M\{\rho(y(u), y^{nb})\}$	Функція відповідності $\rho(y(u), y^{nb})$	Необхідний результат $y^{nb}$	Примітка
Ймовірність випадкової події	$P_u(A)$	$\rho = \begin{cases} 1, \text{ якщо} \\ \text{настало } A; \\ 0, \text{ якщо не} \\ \text{настало } A \end{cases}$	Випадкова подія А	-
Ступінь ймовірності гарантії досягнення результатів не нижче необхідного рівня	$P(\hat{y}(u) \geq y^{nb}) = 1 - F(y^{nb})$	$\rho = \begin{cases} 1, \text{ якщо} \\ y(u) \geq y^{nb}; \\ 0, \text{ якщо} \\ \hat{y}(u) < y^{nb} \end{cases}$	Задано параметром $y^{nb}$	-
	$P(\hat{y}(u) \geq \tilde{y}^{nb}) = M[\mu(y^{nb})]$		$y^{nb}$ нечітка змінна з функцією приналежності $\mu$	
	$P(\hat{y}(u) \geq \hat{y}_H) = \int F_H(y) df(y)$		$y^{nb}$ випадкова змінна $\hat{y}_H$ з функцією розподілу $F_H(y)$	
Середній результат	$M[y(u)]$	$\rho = y(u)$	Не визначено або $y^{nb} = \max(\min)y(u)$	Якщо $y(u)$ не випадкова змінна, то $W(u) = y(u)$
Середній квадрат відхилення результату від необхідного	$M[(y(u) - y^{nb})^2]$	$\rho = (y(u) - y^{nb})$	Задано параметром $y^{nb}$	-
Дисперсія результату	$D[\hat{y}(u)]$	$\rho = (\hat{y}(u) - M[y(u)])^2$	Не визначено	Результат $y(u)$ є випадковою величиною
Ймовірнісно-гарантований результат	$y_\alpha$	$\rho = F^{-1}(1 - \alpha) = y_\alpha$	Задана ступінь гарантії $\alpha$	-
Середній (байесовський) ризик (середні втрати)	$\sum_i \sum_j \Pi_{ij} P(H_i) P\left(\frac{H_j}{H_i}\right)$	$\rho = \Pi_{ij}$	Не визначено	$\Pi_{ij}$ є функцією втрат

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо один із способів введення показника ефективності для випадку ситуацій за наявності невизначеності в поведінці транспортної системи.

Нехай має місце ситуація, коли на результат операції впливає не лише вибір стратегії  $u \in U$  ОПР, але і вибір стратегії  $v$  опонентом з відомої множини припустимих стратегій  $V$ .

У цьому випадку результат операції  $y(u, v)$  залежить від множини стратегій  $u \in U$  і  $v \in V$ . Функція відповідності, відобразить міру відповідності реального результату операції необхідному:

$$\rho = \rho[y(u, v), y^{нб}]. \quad (34)$$

За наявності випадкових чинників математичне очікування функції відповідності (умовний показник ефективності) матиме вигляд:

$$W(u, v) = M\{\rho[y(u, v), y^{нб}]\}. \quad (35)$$

Сформулюємо гіпотезу поведінки опонента: він вибирає стратегії  $v \in V$  так, щоб при будь-якій стратегії ОПР  $u \in U$  мінімізувати міру відповідності реального результату операції бажаному для ОПР. Як бачимо, інтереси опонента протилежні до інтересів ОПР. В даних умовах в якості показника ефективності для ОПР можна вибрати мінімальне значення  $W(u, v)$  для кожної стратегії  $u \in U$ :

$$W(u, v) = \min_{v \in V} M\{\rho[y(u, v), y^{нб}]\}. \quad (36)$$

Значимо, що функція відповідності  $\rho[y(u, v), y^{нб}]$  у виразі (36) може набирати будь-якого вигляду з тих, які були вже розглянуті. При цьому функція відповідності може виражати: - ймовірність випадкової події; середній результат; імовірнісну гарантію отримання необхідного результату; імовірнісно-гарантований результат; імовірнісну гарантію того, що реальний результат буде не менше необхідного при випадковому характері як реального, так і необхідного результатів; середню міру перевищення випадкової величини отриманого результату над невизначеною величиною необхідного результату; розсіювання результатів; усереднений ризик та ін.

Показник ефективності для даних ситуацій включає часткові показники. При будь-якій стратегії опонента і фіксованій стратегії ОПР  $W(u) < W(u, v)$ , тобто  $W(u)$  є нижньою межею середнього значення функції відповідності реального результату операції необхідного для ОПР.

#### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

1. Розроблено підхід до визначення показника ефективності реалізації операції в транспортних системах, що є мірою відповідності фактичного результату операцій бажаному та наведено алгоритм його визначення.
2. Дано графічну інтерпретацію функції розподілу результату операції, показано схеми оцінки імовірнісної гарантії, розглянуто перелік вимог, яким повинен задовольняти показник ефективності та форми його виміру.
3. Сформульовано принципи використання характеристики розсіяння реального результату відносно необхідного значення або математичного очікування в якості показника ефективності за умов опису результату досліджень випадковою величиною та дано їх графічне відображення.
4. З'ясовано, що термін безвідмовної роботи транспортної системи і період часу активного її функціонування можуть мати випадковий характер. Необхідний результат в цих умовах описується випадковою змінною, яка дає можливість сформувати мінімально необхідний результат та навести відповідні форми показників ефективності і функцій відповідності.
5. Виявлено, що інтегральний показник ефективності реалізації операцій для конкретних ситуацій включає часткові показники. При будь-якій стратегії опонента і фіксованій стратегії особи, що приймає рішення значення інтегрального показника буде меншим за математичне очікування функції відповідності. При цьому математичне

очікування функції відповідності є нижньою межею її середнього значення реального результату операції.

## Список літератури

1. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавництво ТОВ "КОД", 2017. 370 с.
2. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С. Підвищення ефективності транспортного процесу формування інформаційних потоків в системі перевезень вантажів. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: зб. тез II Міжнар. наук.-техн. інтернет-конф., 25-27 березня 2020 року. Рівне : НУВГП, 2020. С. 41-43.
3. Основы теории систем и системного анализа: учеб. пособ. / Бурименко Ю.И., Галан Л.В., Лебедева И.Ю., Щуровская А.Ю. Основы. Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2015. 136 с.
4. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С. Вплив умов застосування і способів використання активних засобів управління на ефективність функціонування транспортних систем. *Автомобільний транспорт та інфраструктура*: зб. тез IV Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 21-23 квітня 2021 року. Київ : НУБіП, 2021. С. 37-40.
5. Аулін В.В., Голуб Д.В. Реалізація фізико-інформаційного підходу дослідження проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування транспортних систем. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Харків: ХНАДУ. 2018. Вип. 81. С. 3-10.
6. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. №1(11). С.5-10.
7. Кононюк А. Е. Системология. Общая теория систем. В 4-х кн. Кн 1. К.: Освіта України, 2014. 564 с.
8. Флейшман Б.С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем. Изд. 2-е перераб. Смоленск: Изд-во «Ойкумена», 2008. 228 с.
9. Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего. 3-е изд. М. : Едиториал УРСС, 2003. 288 с.
10. Wanghong Lia, Wade D. Cooka, Zhepeng Lia and Joe Zhu Efficiency measurement for hierarchical situations. *Journal of the operational research society*. 2019. Vol. 72 (3). P. 654 - 662.
11. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Великодний Д.О. Методологія підходів до дослідження шляхів і сукупності факторів забезпечення належного рівня ефективності і надійності транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. №2. С. 4-14.
12. Kazemi Matin R., Najafi S. Aggregation of farrell efficiency indices: input oriented with cost function. *Journal of operational research and its applications (journal of applied mathematics)*. 2014. 11(1 (40)). P. 105-117.
13. Simar L., Zelenyuk V. Statistical inference for aggregates of Farrell-type efficiencies: Discussion. Institut de Statistique, Universite Catholique de Louvain (Belgium). Louvain, 2003. 27 p.
14. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В. Критерії реалізації процесів забезпечення та підвищення надійності і ефективності функціонування транспортних систем. *Наукові нотатки: міжвуз. зб.* Луцьк: Луцький НТУ. 2018. №62. С.12-16.

## References

1. Aulin, V.V., Golub, D.V., Grinkiv, A.V. & Lisenko, S.V. (2017). Metodologichni i teoretichni osnovi zabezpechennya ta pidvishennya nadijnosti funkcionuvannya avtomobilnih transportnih sistem [Methodological and theoretical bases of maintenance and increase of reliability of functioning of automobile transport systems] . V.V. Aulin (Ed.). Kropivnickij: Vidavnicтво TOV "KOD" [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Holub, D.V. & Zamurenko, A.S. (2020). Pidvyschennia efektyvnosti transportnoho protsesu formuvanniam informatsijnykh potokiv v systemi perevezen' vantazhiv [Improving the efficiency of the transport process of forming information flows in the system of cargo transportation] . Zbirnyk tez II Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii «Innovatsijni tekhnolohii rozvytku mashynobuduvannia ta efektyvnogo funktsionuvannia transportnykh system», 25-27 bereznia 2020 roku. Rivne : NUVHP. P. 41-43. [in Ukrainian].
3. Burimenko, Ju.I., Galan, L.V., Lebedeva, I.Ju. & Shhurovskaja, A.Ju. (2015). *Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza [Fundamentals of systems theory and systems analysis]* . Odessa: ONAS im. A.S. Popova [in Russian].

4. Aulin, V.V., Holub, D.V. & Zamurenko, A.S. (2021). Vplyv umov zastosuvannya i sposobiv vykorystannya aktyvnykh zasobiv upravlinnia na efektyvnist' funktsionuvannya transportnykh system / Zbirnyk tez IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii «Avtomobil'nyj transport ta infrastruktura», 21-23 kvitnia 2021 roku. - Kyiv : NUBiP, – S. 37-40. [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V. & Holub, D.V. (2018). Realizatsiia fizyko-informatsijnoho pidkhodu doslidzhennia problemy pidvyschennia nadijnosti ta efektyvnosti funktsionuvannya transportnykh system [Implementation of a physical-information approach to the study of the problem of improving the reliability and efficiency of transport systems] . *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu – Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University. Vol. 81.* 3-10. [in Ukrainian].
6. Aulin, V.V., Holub, D.V., Bilichenko, V.V. & Zamurenko, A.S. (2020). Formuvannya pokaznykiv otsinky efektyvnosti transportnoho protsesu perevezen [Formation of indicators for assessing the efficiency of the transport process]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu – Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. 1(11).* 5-10. [in Ukrainian].
7. Kononiuk, A. E. (2014). *Systemolohyia. Obschaia teoriya system [Systemology. General systems theory]. (Vols 1-4; Vol. 1).* Kyiv: Osvita Ukrainy. [in Russian].
8. Flejshman, B.S. (2008). *Jelementy teorii potencial'noj jeffektivnosti slozhnykh sistem. Izdanie vtoroje pererabotannoe [Elements of the theory of potential efficiency of complex systems].* Smolensk: Izd-vo «Ojkumena» [in Russian].
9. Kapica, S.P., Kurdjumov, S.P. & Malineckij, G.G. (2003). *Sinergetika i prognozy budushhego [Synergetics and future forecasts]. (3-d ed.).* Moskow : Editorial URSS [in Russian].
10. Wanghong Lia, Wade D. Cooka, Zhepeng Liaand Joe Zhu. (2019). Efficiency measurement for hierarchical situations. *Journal of the operational research society, Vol. 72 (3).* P. 654 - 662.
11. Aulin, V.V., Holub, D.V., Bilichenko, V.V. & Velykodnyj, D.O. (2017). Metodolohiia pidkhodiv do doslidzhennia shliakhiv i sukupnosti faktoriv zabezpechennia nalezhnogo rivnia efektyvnosti i nadijnosti transportnykh system [Methodology of coming to the end of the road and success factors in securing the proper level of efficiency and reliability of transport systems]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu – Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. №2.* 4-14. [in Ukrainian].
12. Kazemi Matin R. & Najafi S. (2014). Aggregation of farrell efficiency indices: input oriented with cost function. *Journal of operational research and its applications (journal of applied mathematics). 11(1 (40)).* P. 105-117.
13. Simar, L. & Zelenyuk, V. (2003). *Statistical inference for aggregates of Farrell-type efficiencies: Discussion.* Institut de Statistique, Universite Catholique de Louvain (Belgium). Louvain
14. Aulin, V.V., Holub, D.V. & Hryn'kiv, A.V. (2018). Kryterii realizatsii protsesiv zabezpechennia ta pidvyschennia nadijnosti i efektyvnosti funktsionuvannya transportnykh system [Criteria for the implementation of processes to ensure and improve the reliability and efficiency of transport systems]. *Mizhvuzivs'kyj zbirnyk "Naukovi notatky" – Scientific notes: interuniversity. zb. №62.* 12-16. [in Ukrainian].

**Vktor Aulin**, Prof., DSc., **Dmytro Holub**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Artem Zamurenko**, post-graduate, **Andriy Grinkiv**, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Sergiy Lisenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktoria Dyachenko**, post-graduate

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Theoretical System-oriented Approach to Determining the Integrated Indicator of the Efficiency of Operations in Transport Systems**

An approach to determining the efficiency of the operation in transport systems, which is a measure of compliance with the actual result of operations desired, and therefore is a measure of guarantee or probability that the service life of the transport service will be no less than necessary. The algorithm of its definition is given and the functions of distribution of result of operation are graphically represented, schemes of estimation of probabilistic guarantee are shown. The list of requirements which the indicator of efficiency and forms of its measurement should satisfy is considered.

It was found that in the study of the effectiveness of operations is a common indicator of the average result, which is used in cases where the purpose of the operation is expressed by a numerical variable.

It was found that an important property of the indicator of the average result is its additivity, and the increase in the quantitative indicator of periodicity leads to a decrease in the quality of the transport system and failure to fulfill the property of additivity. It is proposed as a result of the operation to increase the reliability of the transport system to assume that the period of its trouble-free operation was not less than the period of time of active operation of this system.

The principles of using the scattering characteristic of a real result relative to the required value or mathematical expectation as an indicator of efficiency under the conditions of describing the result by a random

variable are given. A graphical illustration of the matching functions with respect to the scattering indices of the result is given.

It is found that the period of trouble-free operation of the transport system and the period of time of active work can be random, ie the desired result in these conditions is described by a random variable, which is usually the minimum required result. Forms of efficiency indicators and compliance functions are given.

It was found that the performance indicator for these situations includes partial indicators. With any strategy of the opponent and the fixed strategy of the decision-maker, the efficiency of the operation will be less than the mathematical expectation of the correspondence function. Thus, the mathematical expectation of the correspondence function is the lower limit of the average value of the correspondence function of the actual result of the operation required for the decision maker.

**transport system, subsystem, indicator, efficiency, operation, probability, guarantee measure**

*Одержано (Received) 22.03.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**УДК 656.025.6**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).247-253](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).247-253)

**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук

*Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: AulinVV@gmail.com*

**М.Є. Кристопчук**, доц., канд. техн. наук

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,  
Україна  
e-mail: m.ie.krystopchuk@nuwm.edu.ua*

**О.П. Цьонь**, доц., канд. техн. наук, **М.Я. Сташків**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Бабій**,  
канд. техн. наук

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль,  
Україна*

*e-mail: tson\_oleg\_@ukr.net*

**Ю.Д. Бодоряк**

*Науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, м. Тернопіль,  
Україна*

## Глобальна криза від пандемії Covid-19 та її вплив на мобільність населення

Досліджено вплив пандемії спричиненої вірусом SARS-CoV-2 на транспорту галузь України та світу в цілому. Встановлено, що на початку пандемії Covid-19 в країна Європейського Союзу було зафіксовано відміну близько 90% від усіх авіарейсів, також спостерігалось зниження об'єму пасажирських перевезень індивідуальним транспортом на 60-90% та транспортом загального користування – на 50%. Проаналізовано статистичні дані Адміністрації Державної прикордонної служби України за 2019-2020 р. щодо фактів перетинання державного кордону України з Республікою Польща та встановлено значне зниження пасажиропотоку у 2020 році. Запропоновано, для підвищення безпеки та зниження ризику інфікування пасажирів Covid-19 при використанні пасажирського транспорту, що прямує у міжнародному сполученні, використовувати додаткове обладнання, яке виконане у формі захисних бар'єрів для забезпечення фізичного дистанціювання між пасажирами.

**пасажирський транспорт, пандемія Covid-19, інфікування пасажирів**

**Постановка проблеми.** Забезпечення високих показників безпеки пасажирських перевезень є одним з пріоритетних напрямків транспортної галузі в цілому, оскільки право на життя та здоров'я людини лежить в основі державних гарантій їх захисту [1]. В результаті пандемії COVID-19 транспортна система України та світу виявилася однією із найбільш постраждалих галузей економіки через закриття міждержавних кордонів, введенням різного роду обмежень на пересування населення, товарів тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На початку пандемії спричиненої SARS-CoV-2 в країнах Європейського Союзу було зафіксовано відміну близько 90% від усіх авіарейсів, також спостерігалось зниження об'єму пасажирських перевезень індивідуальним транспортом на 60-90% та транспортом загального користування – на 50% [2]. Економічна складова впливу пандемії COVID-19 на пасажирські перевезення автомобільним транспортом полягає у зменшенні прибутку автотранспортного підприємства (АТП) від продажів пасажирських квитків, підвищенням витрат на заходи пов'язані із дезінфекцією транспортних засобів та забезпеченням соціальної дистанції на об'єктах транспортної інфраструктури.

Сьогодні Україна та інші країни світу перебувають на так званому перехідному етапі, що проявляється у адаптації автоперевізних підприємств до оновлених умов діяльності та поступовому відновленні пасажиропотоків після жорсткого локдауну.

**Постановка завдання.** Важливим та актуальним питанням сьогодення являється не лише повернення до показників та об'ємів пасажирських перевезень 2018 - 2019 року, але й прогнозування діяльності світової транспортної сфери після закінчення пандемії спричиненої вірусом SARS-CoV-2, а також пошук шляхів для зниження ризиків інфікування пасажирів у громадському транспорті [3].

**Виклад основного матеріалу.** Відповідно до статистичних даних у січні–вересні 2020р. пасажирообіг підприємств транспорту у внутрішньому та міжнародному сполученні становив 37,1 млрд.пас.км, або 45,6% від обсягу січня–вересня 2019р. Послугами пасажирського транспорту скористалося 1899,1 млн пасажирів, або 60,0% від обсягу січня–вересня 2019р. (рис.1) [4].

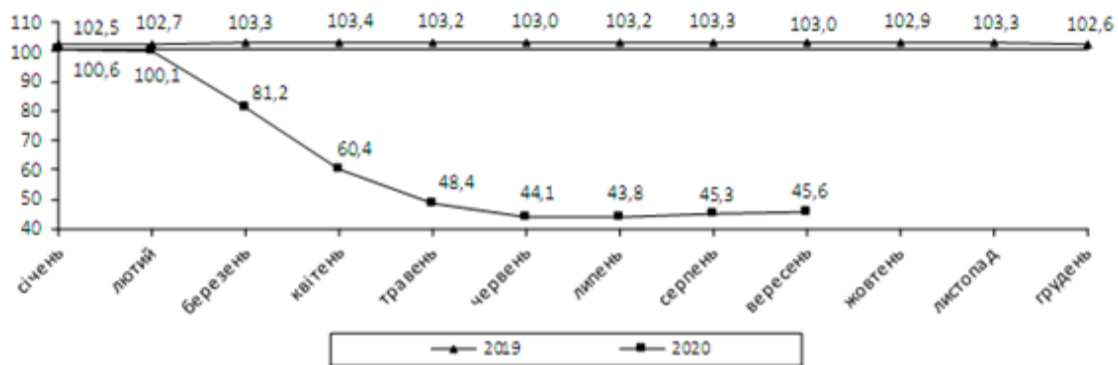


Рисунок 1 – Пасажирообіг підприємств транспорту (у % до відповідного періоду попереднього року, нарастаючим підсумком)

Джерело: [4]

Згідно інформації станом на 01.01.2020р. про кількість діючих ліцензій за видами діяльності на право провадження господарської діяльності з міжнародні перевезення пасажирів автомобільним транспортом видано 2502 ліцензії на право виконання міжнародних автобусних рейсів. Детальна інформація про кількість автобусних пасажирських маршрутів, які проходять через автомобільні пропускні пункти України та сусідніх країн та кількість автомобільних пропускних пунктів, через які дозволено проїзд автобусам подана на рис. 2, 3 [5, 6].



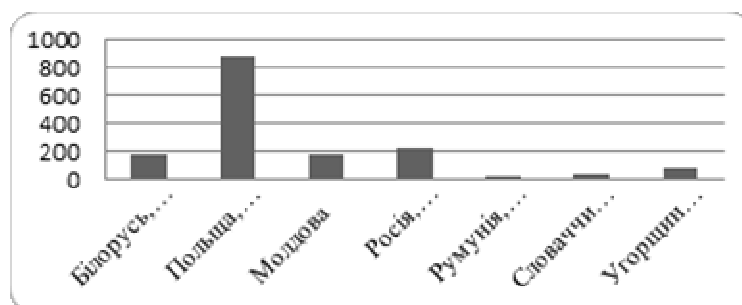


Рисунок 2 – Кількість автобусних пасажирських маршрутів, які проходять через автомобільні пропускні пункти України та сусідніх країн (станом на 25.08.2020)

Джерело: [5]

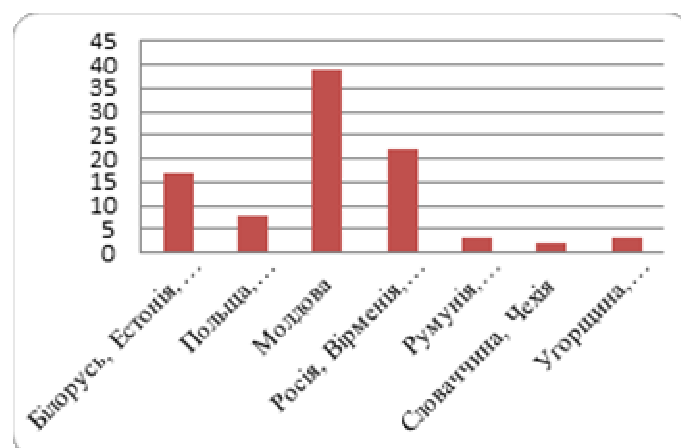
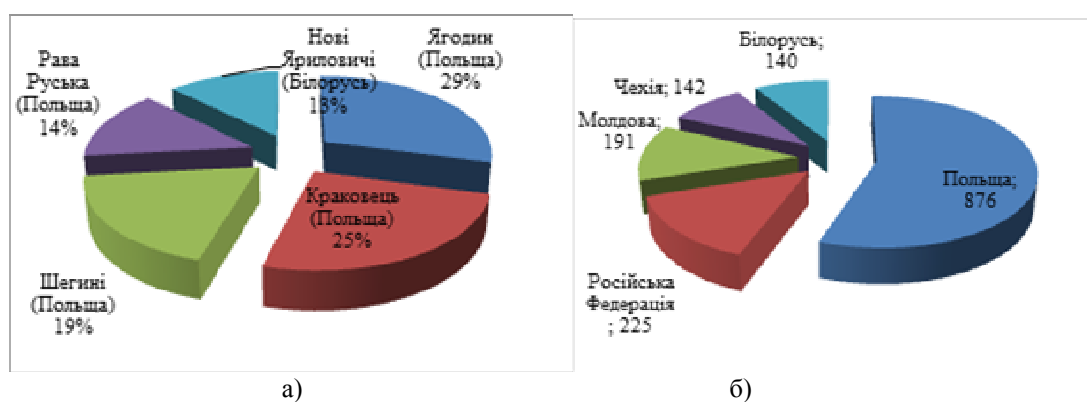


Рисунок 3 – Кількість автомобільних пропускних пунктів, через які дозволено проїзд автобусам

Джерело: [6]

Географічне розташування України в центральній частині Східної Європи на перетинанні транспортних шляхів з Європою в Азію та зі Скандинавських країн у країни Середземноморського регіону зумовлює постійний приріст пасажиропотоку із країнами – сусідами, такими як Республіка Польща, Словацька Республіка, Угорщина, Румунія, Республіка Молдова.

Найбільший кількість пасажирських перевезень та перетинань державного кордону України здійснюється через Україно-Польський кордон. Детальна інформація подана на рис.4.



а) найбільш завантажені АПП на кордоні України; б) країни із найбільшою кількістю автобусних маршрутів з Україною

Рисунок 4 – Статистичні дані Державної прикордонної служби України

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 20.05.2020 р № 392 «Про встановлення карантину з метою запобігання поширенню на території України гострої респіраторної хвороби COVID-19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV-2, та етапів послаблення протиепідемічних заходів» дозволено здійснювати, зокрема, міжнародні перевезення пасажирів автомобільним транспортом. Для виконання міжнародного перевезень пасажирів необхідно, серед іншого, дотримуватися вимог чинних двосторонніх Угод між Україною та країною, до якої або через яку проходить відповідний міжнародний маршрут, а тому необхідно враховувати карантинні обмеження, які введені країнами-сусідами внаслідок кризи, що викликана вірусною хворобою COVID-19 [7].

В свою Чергу Республіка Польща відповідно до рішення Міністрів Республіки Польща № 964 дозволяється перетин державного кордону пасажирським автомобільним транспортом регулярного сполучення в межах 50% від загальної кількості місць для сидіння, передбаченої технічною характеристикою транспортного засобу з дотримання всіх вимог щодо індивідуального захисту.

Згідно даних Адміністрації Державної прикордонної служби України, у 2019 році на кордоні із Республікою Польща в пунктах пропуску для автомобільного та пішохідного сполучення зафіксовано 21,117 млн. фактів перетинання державного кордону особами (на в'їзд – 10,577 млн., на виїзд – 10,54 млн, громадянами України – 18,876 млн, іноземцями та особами без громадянства – 2,241 млн). Детальна інформація подана на рис.5 [8, 9].

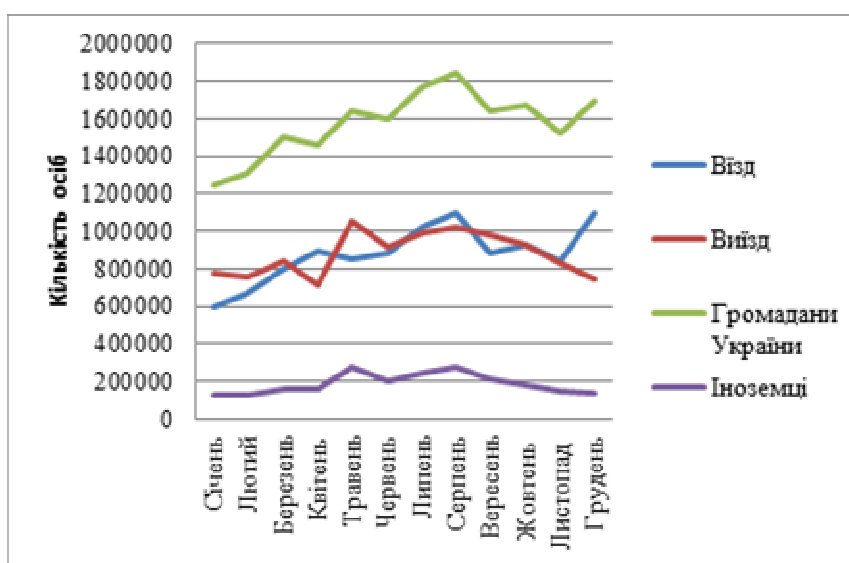


Рисунок 5 – Кількість фактів перетинання державного кордону Україна – Польща за 2019р.  
Джерело: [8, 9]

У січні – вересні 2020 року відповідно до даних Адміністрації Державної прикордонної служби України було зареєстровано 6,327 млн. фактів перетинання державного кордону з Республікою Польща (на в'їзд – 3,061 млн, на виїзд – 3,266 млн, громадянами України – 5,814 млн, іноземцями – 513 тис). Детальна інформація по місяцям 2020 року подана на рис. 6.

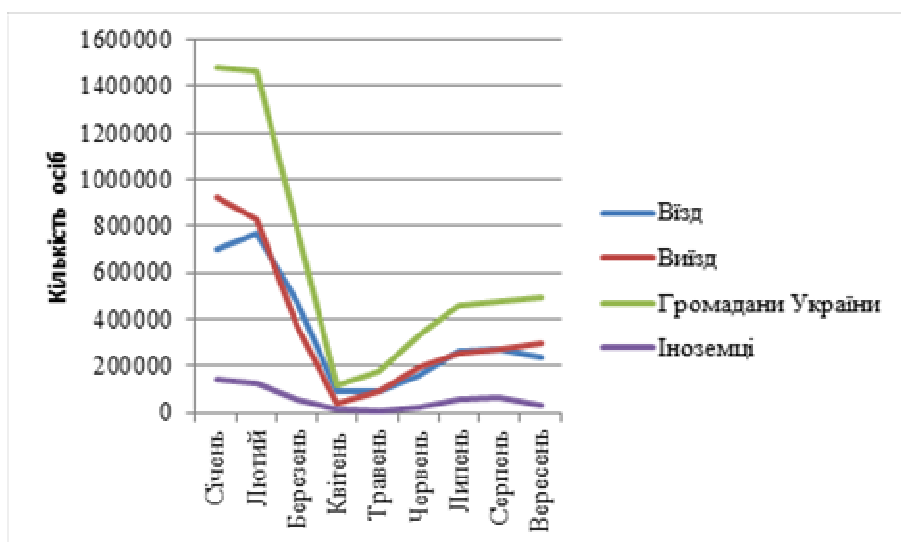


Рисунок 6 – Кількість фактів перетинання державного кордону Україна – Польща за 2020р.  
Джерело: [4]

Проведений аналіз статистичних даних Державної прикордонної служби України за останні роки дозволив спрогнозувати можливий обсяг перетинання державного кордону України з Республікою Польща на 2021 рік (рис. 7).

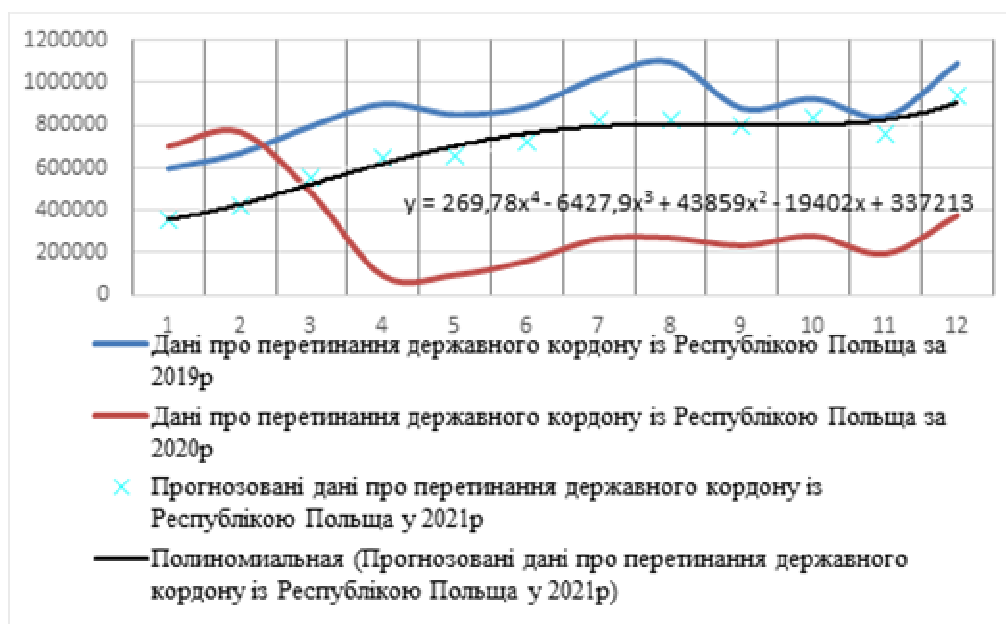


Рисунок 7 – Прогнозовані дані про перетинання державного кордону з республікою Польща на 2021 рік

Джерело: розроблено авторами

Результати, представлені у матеріалах Union Internationale des Transports Publics свідчать про те, що від 20% до 30% з усіх хворих COVID-19 заражаються вірусом у громадському транспорті, оскільки велика кількість пасажирів знаходиться в замкнутому приміщенні на протязі тривалого часу (при міжнародних пасажирських перевезеннях) та не має можливостей для виявлення потенційних носіїв інфекції серед пасажирів.

Для підвищення безпеки та зниження ризику інфікування пасажирів Covid-19 при використанні ними пасажирського транспорту, що прямує за міжнародним сполученням, важливим є забезпечення фізичного дистанціонування між ними. Це можливо досягнути шляхом використання додаткового захисного обладнання у формі захисних бар'єрів, що встановлюється між суміжними сидіннями. Прозорі захисні бар'єри з акрилу є ефективним засобом протидії зараженню вірусними захворюваннями, в т.ч. коронавірусною інфекцією Covid-19.

#### **Висновки:**

1. Міжнародні перевезення пасажирів суттєво скоротилися під час пандемії коронавірусу SARS-CoV-2. Це зумовлено рядом обмежувальних заходів, що були запроваджені урядами країн.

2. Після подолання пандемії існує велика ймовірність того, що населення різних країн буде уникати використання громадського автомобільного транспорту з метою зменшення соціальних контактів. Тому підвищення безпеки пасажирів при міжнародних перевезеннях набуде вагомого значення на шляху отримання прибутків автотранспортними підприємствами.

3. Досягнути підвищений рівень безпеки від інфікування вірусними захворюваннями на автотранспорті можливо досягнути лише шляхом забезпечення фізичного дистанціонування між пасажирами з використанням захисних бар'єрів між суміжними сидіннями. Прозорі захисні бар'єри з акрилу є ефективним засобом протидії зараженню вірусними захворюваннями, в т.ч. коронавірусною інфекцією Covid-19.

#### **Список літератури**

1. В. Муж, О. Цьонь. Правові механізми забезпечення безпеки пасажирських перевезень. *Матеріали XXI наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*, Тернопіль, 2019. С. 42-43.
2. European Commission (2020). The European Green Deal, COM(2019) 640.
3. Ляшук О.Л., Бодоряк Ю.Д., Шминдюк Ю.А., Цьонь О.П. Стан аварійності на автошляхах України. *Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (в авторській редакції), (м. Кривий Ріг, 13 листопада 2020 року)*. Кривий Ріг, 2020. С. 299.
4. Державна служба статистики України. URL: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/tr.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/tr.htm). (дата звернення: 08.01.2021)
5. Аулін В.В., Гриньків А.В., Головатий А.О. Інтелектуальні транспортні системи як результат впровадження інноваційних ефективних технологій. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 15-17 квітня 2020 р.* Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С.207.
6. Yevhen Tkhoruk, Olena Kucher, Mykola Holotiuk, Mykhailo Krystopchuk, Oleg Tson. Modeling of assessment of reliability transport systems. *Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, 2019.* Ternopil. : TNTU, Scientific Publishing House "SciView", 2019. P. 204–210.
7. Міністерство інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/news/31932.html?PrintVersion> (дата звернення: 10.01.2021)
8. Юрій Ярославович Вовк, Олег Петрович Цьонь, Ірина Петрівна Вовк, Роман Андрійович Бігун, Ігор Михайлович Зима. Безпека транспорту в контексті глобальних цілей сталого розвитку 2030: Україна. *Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти: матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції (в авторській редакції), (м. Кривий Ріг, 12 листопада 2019 року)*. Кривий Ріг, 2019. С. 346.
9. Аулін В.В., Великодний Д.О., Дьяченко В.О. Оптимізація і управління ресурсами в транспортно-логістичній системі АПК. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. Луцьк: Луцький НТУ, 2018. №62. С.8-11.

## References

1. Muzh, V. & Tson, O. (2019). Pravovi mekhanizmy zabezpechennia bezpeky pasazhyrskykh perevezen. *Materialy XXI naukovoï konferentsii Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Ivana Puliuia, Ternopil*. P. 42-43 [in Ukrainian].
2. European Commission (2020). The European Green Deal, COM(2019) 640. [in English].
3. Liashuk, O.L., Bodoriak, Yu.D., Shmyndiuk, Yu.A. & Tson, O.P. (2020). Stan avariinosti na avtoshliakhakh Ukrainy. *Transportna bezpeka: pravovi ta orhanizatsiini aspekty: materialy KhV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (v avtorskii redaktsii), (m. Kryvyi Rih, 13 lystopada 2020 roku)*. Kryvyi Rih. P. 299 [in Ukrainian].
4. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]. *www.ukrstat.gov.ua*. Retrieved from [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/tr.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/tr.htm). [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. & Holovati, A.O. (2020). Intel'ektualni transportni systemy yak rezultat vprovadzhennia innovatsiinykh efektyvnykh tekhnolohii [Intelligent transport systems as a result of the introduction of innovative efficient technologies]. Increase of Machine and Equipment Reliability: *materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - materials of the International scientific-practical conference, (15-17 kvitnia 2020 r.)*. Kropyvnytskyi: TsNTU, P.207 [in Ukrainian].
6. Yevhen Tkhoruk, Olena Kucher, Mykola Holotiuk, Mykhailo Krystopchuk & Oleg Tson. (2019). Modeling of assessment of reliability transport systems. *Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, — Ternopil*. : TNTU, Scientific Publishing House "SciView". P. 204–210. [in English].
7. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy [Ministry of Infrastructure of Ukraine]. *mtu.gov.ua*. <https://mtu.gov.ua/news/31932.html?PrintVersion>. [in Ukrainian].
8. Yurii Yaroslavovych Vovk, Oleh Petrovych Tson, Iryna Petrivna Vovk, Roman Andriiovych Bihun & Ihor Mykhailovych Zyma. (2019). Bezpeka transportu v konteksti hlobalnykh tsilei staloho rozvytku 2030: *Ukraina. Transportna bezpeka: pravovi ta orhanizatsiini aspekty: materialy KhIV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (v avtorskii redaktsii), (m. Kryvyi Rih, 12 lystopada 2019 roku)*. Kryvyi Rih. S. 346 [in Ukrainian].
9. Aulin, V.V. Velykodnyi, D.O. & Diachenko, V.O. (2018). Optymizatsiia i upravlinnia resursamy v transportno-lohistychnii systemi APK [Optimization and management of resources in the transport and logistics system of agro-industrial complex]. *Mizhvuzivskyi zbirnyk "Naukovi notatky" - Interuniversity collection "Scientific Notes"*. Lutsk: Lutskiy NTU. 62. 8-11 [in Ukrainian].

**Viktor Aulin**, Prof., DSc.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

**Mykhailo Krystopchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine*

**Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Stashkiv**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mariia Babii**, PhD tech. sci.

*Ternopil Ivan Puluji National Technical University, Ternopil, Ukraine*

**Yurii Bodoriak**

*Research Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Ternopil, Ukraine*

### **The Global Crisis of Covid-19 and Its Impact on Population Mobility**

An important and relevant issue today is not only the return to the indicators and volumes of passenger traffic in 2018-2019, but also forecasting the activities of the world transport sector after the SARS-CoV-2 virus pandemic, as well as finding ways to reduce the risk of passenger infection in public transport.

The impact of the pandemic caused by the SARS-CoV-2 virus on the transport industry of Ukraine and the world as a whole has been studied. It was found that at the beginning of the Covid-19 pandemic, about 90% of all flights to the European Union were recorded in the European Union, as well as a decrease in passenger traffic by individual and 60-90% and public transport - by 50%. The statistical data of the Administration of the State Border Guard Service of Ukraine for 2019-2020 on the facts of crossing the state border of Ukraine with the Republic of Poland are analyzed and a significant decrease in passenger traffic in 2020 is established.

It is proposed to use additional equipment, which is made in the form of protective barriers to ensure physical distance between passengers, to increase safety and reduce the risk of infection of Covid-19 passengers when using internationally transported passenger vehicles.

**passenger transport, Covid-19 pandemic, infection of passengers.**

*Одержано (Received) 01.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 21.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**А.П. Солтус**, проф., д-р техн. наук, **М.П. Рудь**, доц., канд. техн. наук  
*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна*  
*e-mail: m.rud@chdtu.edu.ua*

## Перспективи застосування глобального високошвидкісного ширококутового супутникового інтернету з низькою затримкою у галузі автомобільного транспорту

У статті розглядаються проблеми, навігації та зв'язку з використанням супутникових технологій на автомобільному транспорті в умовах зростання глобалізаційних процесів в світовій економіці та трансформацій технологій вантажних перевезень викликаних масштабним переходом на транспорт з нульовим рівнем викидів та розвитком безпілотних автомобілів. Також в роботі проведений аналіз поточного стану та перспектив впровадження глобального високошвидкісного ширококутового супутникового інтернету в світі та Україні та його використання транспортними компаніями.

**глобальна супутникова навігація, супутниковий зв'язок, супутниковий інтернет, супутникове сузір'я, низька навколоремна орбіта, малий супутник, зв'язок на транспорті, безпілотний автомобіль**

**Постановка проблеми.** На транспорті на сьогодні знайшли широке застосування системи глобальної супутникової навігації. Практично не можливо уявити жодне сучасне транспортне підприємство не залежно від виду транспорту, яке б в своїй роботі не використовувало технології супутникової навігації [1,2,3]. Якщо лише десять років тому користувачі супутникової навігації могли покладатись лише на американську систему GPS, то сьогодні вже працюють в повному складі з глобальним покриттям ще три таких системи: російська ГЛОНАСС, китайська BeiDou і європейська Galileo. При цьому точність визначення координат з використанням цих систем за останні роки постійно зростала завдяки введенню в експлуатацію супутників нових поколінь. Також завдяки масовому застосуванню в приватному секторі постійно знижується вартість терміналів супутникової навігації, що робить доступним відслідковування координат не лише окремими транспортними засобами, а й окремими вантажними місцями при мультимодальних перевезеннях. Однак системи глобальної супутникової навігації працюють лише в одному напрямку. Тобто абонент може в будь-який момент з високою точністю визначити свої координати (а також багато інших параметрів свого руху, таких як точний час, напрямок та швидкість руху, точність координат, тощо). Значно складнішим є двосторонній зв'язок наприклад з операторами диспетчерської служби для того щоб надати інформацію про стан транспортного засобу та вантажу для оперативного контролю та керування перевезеннями, або зв'язок з місцевими службами пов'язаними з транспортом та передача інформації між окремими транспортними засобами. На сьогодні забезпечення подібного зв'язку здійснюється переважно з допомогою сервісів місцевих операторів стільникового зв'язку. Проблемою такого підходу є відсутність глобального покриття мобільним зв'язком, особливо у малонаселених регіонах або країнах «третього світу» із слабким розвитком мобільної інфраструктури не кажучи вже про незаселені регіони

або воднi простори, а також складнощi з забезпеченням роумiнгу при мiжнародних перевезеннях. До останнього часу єдиним вирiшенням даної проблеми було використання сервiсiв систем супутникового зв'язку, таких як Inmarsat, Iridium, Глобалстар, Thuraya. Недолiками такого рiшення є висока вартiсть термiналiв (вiд 1000 \$), висока вартiсть зв'язку (залежно вiд пакету може складати кiлька сотень доларiв США на мiсяць), переважна орієнтація на голосовий зв'язок, низька швидкiсть супутникового iнтернету (352 Кбiт/с в системi Iridium, пiнг близько 400 мiлісекунд).

**Аналіз останнiх досліджень i публікацiй.** Транспортнi технологiї на сьогодні в багатьох аспектах знаходяться в станi революцiйних змiн, якi суттєво впливають як на саму галузь транспорту так i на свiтове господарство. Багато авторитетних органiзацiй зараз називають головнi тренди змiн в транспортних технологiях. Так в Американському товариствi iнженерiв-механiкiв, яке є одним з найбільших у свiтi видавцiв технiчних стандартiв у всiх iнженерних дисциплiнах, були названi 7 найважливіших тенденцiй в транспортних технологiях [4]. Унiверситет Огайо опублікував 5 найбільших досягнень в транспортних технологiях [5]. Розробник програмного забезпечення Stfalcon LLC вiдзначив 8 головних трендiв в транспортній галузi [6]. Автори цих публікацiй одноставнi, що одним з головних трендiв є автономнi безпiлотнi транспортнi засоби (як наземнi так i повітрянi), а також можна видiлити групу технологiй, якi пов'язанi з iнформацiйними технологiями, серед них iнтернет речей, поїздки «на вимогу», адресна доставка «останньої милi». Важливим аспектом, який дасть значний поштовх у розвитку цих напрямiв є впровадження глобального високошвидкiсного ширококутового супутникового iнтернету з низькою затримкою [7].

**Постановка завдання.** В даній роботi розглянемо перспективи застосування низькоорбiтальних систем глобального супутникового iнтернету в галузi автомобiльного транспорту.

**Виклад основного матерiалу.** Супутниковий зв'язок, який з'явився зовсiм нещодавно (з початком космiчної ери) i вже встиг стати традицiйним вiдрiзняє необхіднiсть використовувати направлену параболiчну антену, яка може бути встановлена нерухомо у випадку використання геостационарних супутникiв (Geostationary Earth Orbit - GEO), або повинна мати систему електроприводiв яка б направляла її на потрібну точку в небi у випадку застосування супутникiв на середній навколосемній орбiтi (Medium Earth Orbit - MEO) чи тим бiльше низькій орбiтi (Low Earth Orbit - LEO) до того ж зв'язок регулярно потрібно обривати при переналаштуванні антени з супутника який зникає за горизонтом на iнший супутник (рис.1).

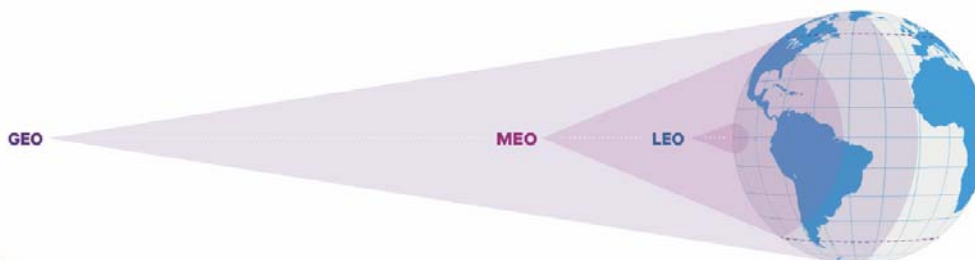


Рисунок 1 – Покриття поверхнi Землi залежно вiд висоти орбiти супутника

Джерело: [8]

2020-й рiк став роком початку публічного тестування першої низькоорбiтальної системи глобального супутникового iнтернету Starlink вiд компанiї SpaceX [9]. В цьому ж році ще одна компанiя (OneWeb, центральний офiс знаходиться у Великобританiї), почала запуски супутникiв для побудови власної мережi супутникового iнтернету.

Початок обох ідей лежить в 2014-му році. Співробітник компанії Google Марк Креб подав перший патент який описував низькоорбітальне супутникове сузір'я, яке могло б забезпечити покриття практично всієї поверхні земної кулі швидкісним зв'язком (рис. 2) [10]. Для реалізації проекту була залучена на той час маловідома але амбітна приватна космічна компанія SpaceX. Один з керівників проекту від Google Грег Уайлер покинув компанію і став засновником нової компанії з надання послуг супутникового інтернету OneWeb [11]. Згодом проект покинув і Марк Креб, який приєднався до ще одного конкурента, який оголосив про плани створення супутникової мережі - Kuiper Systems від компанії Amazon [12].

Після того як стала очевидно не лише перспективна вигода від подібних супутникових сузір'їв, а й наявність всіх основних технологій необхідних для їх створення в перегони по отриманню частки цього великого ринку почали включатись все більше компаній. Зокрема після того як 24 березня 2020 року федеральною комісією по зв'язку США (FCC, Federal Communication Commission) було оголошено про конкурс на створення супутникових угруповань на негеостаціонарних орбітах з використанням зв'язку в Ku та Ka частотних діапазонах, в ньому прийняли участь 13 компаній. З них найамбітніші плани у OneWeb (заявка на 48000 супутників), SpaceX (30000 супутників), Kuiper Systems (3236 супутників) та несподівано оператор супутникового телебачення TeleSat (1671 супутник) [13].

Звичайно про плани по створенню низькоорбітальних супутникових сузір'їв оголосили не лише в США, а й інших країнах. Найбільш близькими до реальності є китайський супутниковий стартап GalaxySpace, який планує запуснути до 1000 супутників на орбіти від 500 до 1000 км [14].

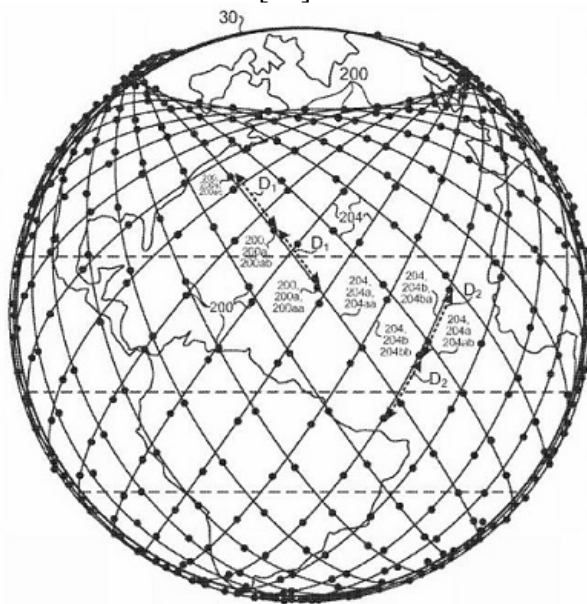


Рисунок 2 – Супутникове угруповання для широкопasmового доступу в інтернет з мережею наземних шлюзових станцій і міжсупутниковими лініями зв'язку

Джерело: [10]

Для того щоб оцінити перспективи для транспортних компаній застосування супутникового зв'язку нового покоління розглянемо ключові технології які закладені в основу цього зв'язку та головні проблеми і виклики, які стоять перед тими хто створюють цей зв'язок.

Хоча на сьогодні жоден з проектів ще не дійшов до стадії повноцінного виходу на ринок телекомунікаційних послуг, найближче до цього етапу знаходиться проект



Starlink від SpaceX. Окрім того про даний проєкт у відкритому доступі значно більший об'єм інформації і вже можна порівняти деякі попередні заяви і реальні результати цього проєкту. Саме тому основна інформація буде стосуватись цього проєкту.

27 жовтня 2020 р SpaceX почали програму публічного бета-тестування під гаслом «Better Than Nothing» (Краще ніж нічого). Вартість стартового набору US\$499 і щомісячний платіж US\$99. У травні 2021 в режимі бета-тестування послуга доступна в наступних країнах: США, Канада, Великобританія, Німеччина, Польща, Франція, Австрія, Нова Зеландія, Австралія.

### **Радіочастотний ресурс**

Як Starlink так і більшість його конкурентів заявили про використання у своїх проєктах супутникових радіодіапазонів Ku (12,0—18,0 ГГц) та Ka (26,5—40,0 ГГц).

Останнім часом коли йде мова про зв'язок нового покоління значна увага приділяється стандарту 5G. Можна відмітити, що 5G має багато спільного з швидкісним супутниковим інтернетом нового покоління. Зокрема в 5G використовуються діапазони FR1 (600-6000 МГц) и FR2 (24-100 ГГц), які частково перекриваються з супутниковими. Більше того китайський супутниковий стартап GalaxySpace планує безпосередньо для свого супутникового угруповання використовувати технології 5G.

Головною відмінністю обох технологій від своїх попередників є застосування цифрових антенних решіток (ЦАР). В умовно виділених попередніх стандартах мобільного радіозв'язку для вирішення проблеми множинного доступу до радіоканалу багатьом користувачам в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу використовували: у аналогових 0G та 1G частотне FDMA (Frequency Division Multiple Access), у цифрових 2G було додано часове TDMS (Time), у 3G кодове CDMA (Code) а у 4G OFDMA (Orthogonal frequency) розділення каналів користувачів. Завдяки ж застосуванню ЦАР стало можливим створювати рухомий направлений промінь для зв'язку користувача з базовою станцією (якою виступає в нашому випадку низькоорбітальний супутник). Що в свою чергу дозволяє застосувати одразу декілька технологій: формування променя (beamforming), системи з множиною рознесених передавальних і приймальних антен (Massive MIMO, Multiple Input Multiple Output), метод неортогонального множинного доступу (NOMA, Non-Orthogonal Multiple Access). Сумарно ці технології за рахунок розділення каналів користувачів за напрямом та збільшення пропускної здатності і завадостійкості каналу суттєво збільшують швидкість передачі даних та дозволяють забезпечити стійкий зв'язок з об'єктами які рухаються на великій швидкості (включно з літаками).

Супутники першого покоління Starlink, які зараз в процесі запуску знаходяться на орбіті в 550 км і перебувають в зоні видимості наземного абонента не більше 5 хв. Відповідно до заявки SpaceX у FCC супутник може покрити своїм сигналом пляму на Землі радіусом 950 км (тобто діаметром приблизно 1900 км) за умови, що кут місця для абонентського терміналу не буде менше 25° (рис. 3).

Один супутник таким чином може теоретично мати до 300 таких променів (beam) в зоні свого обслуговування. Однак пропускна здатність існуючого каналу зв'язку супутника першого покоління не дозволяє використати більше 16 променів (8 на прийом і 8 на передачу).

### **Проблеми електромагнітної сумісності з іншими супутниками**

Слід також відмітити, що для рухливих об'єктів (в тому числі автомобілів) у SpaceX розробляється новий тип терміналу, який буде автоматично контролювати рівні свого випромінювання і в разі їх перевищення автоматично відключатися протягом 100

мс. Це пов'язано з регуляційними особливостями розподілу радіочастот, які у США забезпечує Федеральна комісія зі зв'язку, а у світі Міжнародний союз електрозв'язку (ITU, International Telecommunication Union). Однією з найбільш серйозних перепон у розвитку супутникових сузір'їв швидкісного інтернету є забезпечення норм EPFD або Equivalent Power Flux Density (еквівалентна щільність потоку потужності), оскільки сигнал низькоорбітальних супутників не повинен створювати неприйнятні завади для сигналів геостационарних супутників. В своїй заявці поданій до FCC SpaceX приділили найбільшу увагу цьому питанню показуючи, що імовірність перевищення норм EPFD не виходить за встановлену межу (рис. 5, червона лінія). Однак представники компаній, які надають послуги через геостационарні супутники подали скаргу 23 квітня 2021 року до FCC в якій доводять, що супутники Starlink не відповідають нормам EPFD [16].

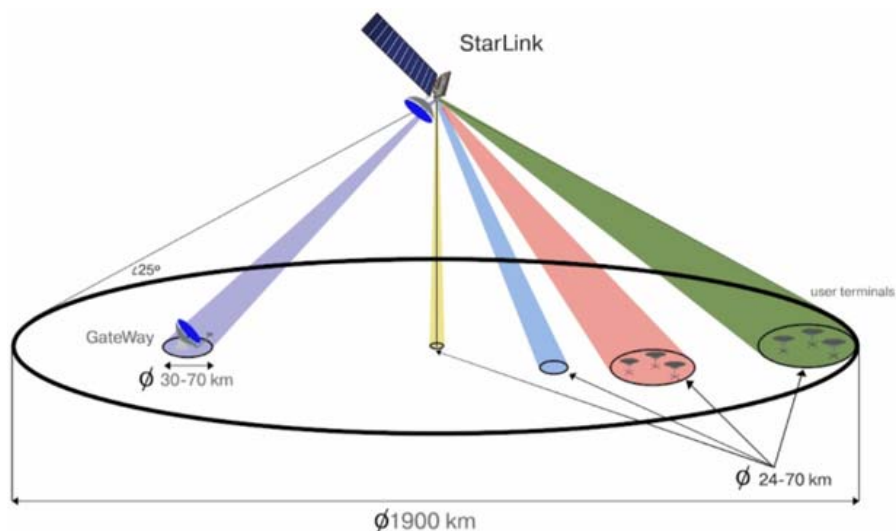


Рисунок 3 - Схема обслуговування абонентів супутником Starlink

Джерело: [15]



Рисунок 4 – Зовнішній вигляд наземного шлюзу та абонентського терміналу Starlink

Джерело: [4]

Якщо врахувати, що практично всі заявники вказували в заявках повну смугу частот Ku- і Ka-діапазонів в обох ортогональних поляризаціях, стає зрозумілим, що існувати одночасно всі ці системи не можуть.

Ще однією проблемою може стати забезпечення електромагнітної сумісності з іншими сузір'ями негеостационарних супутників. Але оскільки згідно регламенту не існує вимог, які б зобов'язували компанію забезпечувати відсутність завад для інших негеостационарних систем, то відсутність взаємних завад можливо здійснити лише

шляхом координації учасників ринку між собою. Така ситуація робить поки що невизначеним час початку бета-тестування, а тим більше офіційних продажів послуг супутникового інтернету для рухомих об'єктів.

### Міжсупутникові канали зв'язку (Inter-satellite link, ISL).

3 вересня 2020 року SpaceX повідомила про перші тести міжсупутникових каналів зв'язку. А в січні 2021 року здійснено пуск місії Transporter-1 в якій було виведено на полярну орбіту 10 супутників обладнаних міжсупутниковим лазерним зв'язком. Вони представляють собою лазерні модулі прийому передачі, які мають бути розташовані з 4 сторін кожного супутника. Такі модулі дозволяють передавати дані послідовно між абонентом та шлюзом не через один супутник, а через будь-яку їх кількість, що практично робить супутниковий інтернет дійсно глобальним, з можливістю доступу в будь-якій точці земної кулі в якій буде доступ до відкритого неба. Відповідно наявність таких каналів в угрупованні Starlink передбачалась з самого початку проекту. Але у зв'язку з поспіхом через необхідність першими заявити права на обмежений орбітальний та частотний ресурси було вирішено в супутниках першого покоління відмовитись від міжсупутникових каналів.

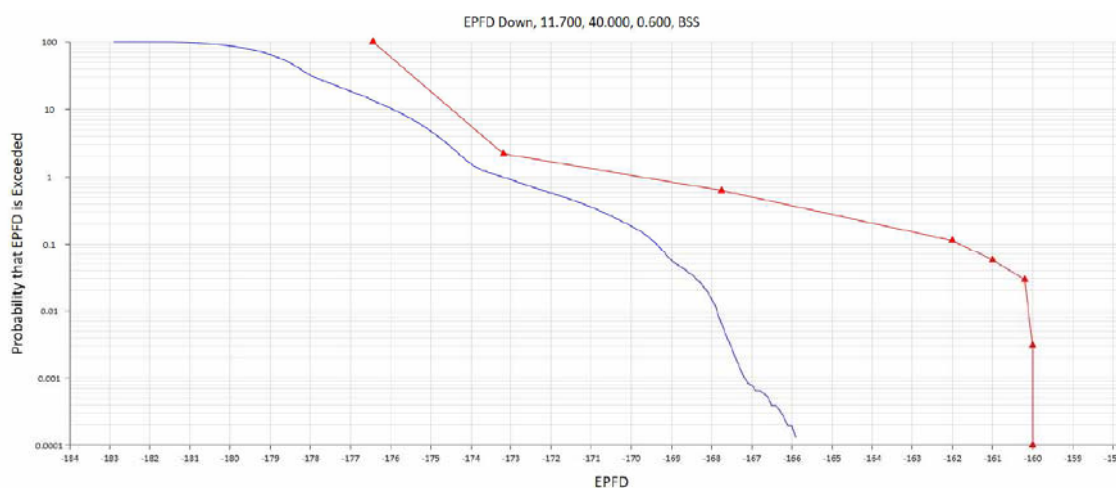


Рисунок 5 - Результати для тих випадків, коли межі EPFD перевищені для прийомної антени діаметром 0,6 м

Джерело: [4]

Ще одною перевагою ISL на яку покладаються значні сподівання інвесторів проекту є те, що швидкість поширення сигналу в космосі дорівнює швидкості світла у вакуумі, а ось в оптичному кабелі вона складає 0,69 від цієї швидкості що призводить до затримки 5 мікросекунд на кілометр, і теоретично затримка при використанні супутників Starlink з ISL буде менше, ніж при використанні трансатлантичних підводних кабелів, що зв'язують США з Європою, Азією та Австралією.

Щео один аспект міжсупутникових ліній зв'язку який з одного боку надає можливості абоненту, а з іншого ускладнює впровадження сервісу в деяких країнах, це можливість завдяки ISL абоненту мережі Starlink виходити в інтернет з території іншої країни або передавати інформацію з одного терміналу на інший, минаючи будь-які наземні вузли зв'язку. Оскільки майже всі країни мають в законодавстві норми, які зобов'язують усіх операторів зв'язку забезпечити можливість доступу спецслужб до переданому в їх мережах трафіку. Якщо серед країн які є учасниками НАТО, або союзниками США проблем з передачею інформації не має виникнути, то для країн в яких обмежується свобода слова та демократія сервіс може залишитись офіційно не

доступним.

### **Подальші перспективи та порівняння з конкурентами.**

На сьогодні (травень 2021 року) лише дві компанії з тих що претендують на створення супутникового сузір'я низькоорбітальних супутників зв'язку почали розгортання своїх угруповань на орбіті. Це звичайно Starlink від SpaceX та OneWeb.

У березні 2020 компанія заявила про банкрутство, посилаючись на кризу, спричинену пандемією коронавірусної хвороби 2019 [11], однак після інвестування значної суми урядом Великобританії та приватною індійською компанією банкрутство було припинено.

OneWeb почала запуски повнофункціональних супутників у лютому 2020 року з допомогою одноразового ракетноносія Союз-2.1б виробництва ракетно-космічного центру «Прогрес», який може доставити на орбіту до 36 супутників за один запуск. Станом на травень 2021 року на орбіті функціонує 176 супутників. Відкрите бета тестування системи заплановано на осінь 2021 року. Планується, що супутники також будуть запускатись ракетноносіями Ariane 6 Європейського космічного агентства (до 78 супутників за запуск, але не раніше 2023 року) та New Glenn від компанії Blue Origin (невідомо кількість супутників за запуск не раніше 2023-го року).

Ракетноносій Falcon 9 у версії Full Thrust Block 5 експлуатується з травня 2018 року і є основним носієм компанії SpaceX. Головною особливістю, яка відрізняє Falcon 9 від інших ракетноносіїв є його часткова багаторазовість. Перша ступінь та створки обтічника, які складають більше 80% вартості ракетноносія можуть використовуватись повторно. Друга ступінь ракети є одноразовою, хоча спочатку планувались заходи по її багаторазовості, але згодом вони були визначні економічно недоцільними. Перша ступінь розрахована на 10 повторних запусків і 9 травня 2021 року вперше відбувся 10 запуск з наступною вдалою посадкою одного з екземплярів першої ступені Falcon 9 (після цього з'явилось повідомлення про плани продовжити її експлуатацію [ ]). Також можна відмітити, що час на підготовку до повторного запуску постійно зменшується у квітні 2021 року досяг 27 днів між запусками одного прискорювача. Це дозволило з початку 2021 року здійснювати в середньому 3 запуски місії Starlink на місяць. В кожному запуску можуть бути виведені на орбіту до 60 супутників (рис. 6). Виведення повнофункціональних супутників почалось в листопаді 2019 року. На сьогодні було успішно запущено 1677 супутників з яких на травень 2021 року в робочому стані знаходиться 1578 (інші з різних причин зведені з орбіти). В подальших планах компанії SpaceX окрім збільшення частоти запусків Falcon 9 є розробка нової системи космічного запуску багаторазового використання Starship, яка повинна повністю замінити існуючі космічні апарати компанії. Планується що система Starship зможе доставляти на орбіту до 400 супутників за один запуск (рис. 6). Завдяки цьому для сузір'я Starlink стає реальним досягнення запланованих 30000 супутників на орбіті одночасно. Враховуючи середній термін експлуатації одного супутника 5 років, для підтримки сузір'я необхідно запускати в середньому 500 супутників щомісяця, що не стане проблемою для Starship.

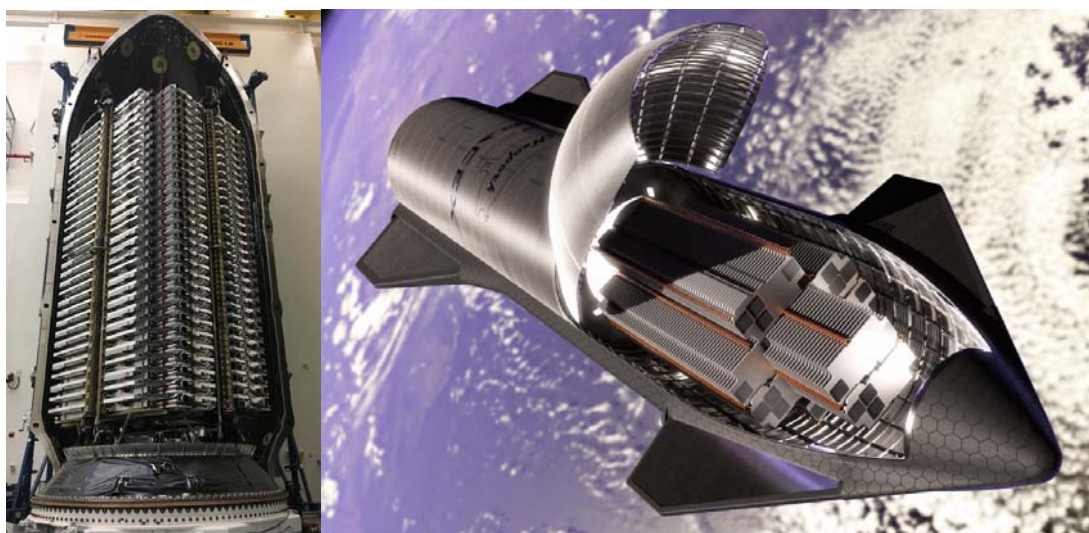


Рисунок 6 – Укладка супутників. Зліва 60 супутників під обтічником Falcon 9, справа проєкт розміщення 400 супутників у вантажному відсіку Starship

Джерело: [9]

Враховуючи все вище зазначене на сьогодні найбільш реальною пропозицією супутникового зв'язку для транспортних компаній є Starlink.

### **Транспорт**

Основною перепорою для застосування швидкісного супутникового зв'язку на транспорті є відсутність офіційної підтримки рухомих терміналів Starlink. На сьогодні навіть при переїзді між зонами обслуговування зв'язку різними шлюзами користувачу необхідно в ручному режимі подавати заявку у відділ обслуговування абонентів

16 квітня 2021 SpaceX відправила в FCC велику кількість заявок на різні варіанти розміщення терміналу на рухомих об'єктах COTM (Communication On The Move).

У документі вказано, що SpaceX запитує комплексну ліцензію на роботу терміналів Starlink на так званих «рухомих наземних станціях», до яких відносяться автомобілі та інший автотранспорт, поїзди, морські та річкові судна, літаки і вертольоти.

Основний і найбільш просунутий ринок - це, безумовно, суднохідний з двома головними окремими ринками круїзні лайнери і вантажні/торгові судна.

Другий за значенням ринок - це авіаринок або IFC (InFlightConnectivity).

Так само необхідно відзначити, що якщо установка терміналу Starlink на плавзасіб практично повністю в руках і волі господаря плавзасобу (в будь-якому випадку, термінал Starlink не замінить обов'язкові радіозасоби, необхідні згідно реєстру і вимогам місцевого Водного нагляду), то обладнання літака або іншого літального апарату для перевезення пасажирів вимагає сертифікації його виробника.

### **Проблеми впровадження Starlink на автомобільному транспорті:**

- послуга поки що не працює з рухомими об'єктами, хоча ніяких принципових технічних перепон не існує і вже оголошено, що найближчим часом (терміни не вказуються) така підтримка буде реалізована [16];

- необхідність мати відкрите небо для антени з широким оглядом (може бути покращено за рахунок запуску все більшої кількості супутників, одночасно на небі буде доступно кілька супутників і система зможе швидко перемикатись на супутники у видимій частині неба);

- порівняно велике енергоспоживання (на сьогодні близько 100-150 Вт), що за

місяць може спожити до 100 кВт·год електроенергії при неперервній роботі, враховуючи витрати пального на її виробництво може суттєво підвищити вартість експлуатації, але при застосуванні в електромобілі цей фактор менш важливий. Однак ці цифри актуальні для обладнання першого покоління для стаціонарного застосування. В мобільних системах скоріше за все буде використовуватись спеціалізована система зі зменшеним енергоспоживанням.

### Висновки:

1. Аналіз результатів дослідження показує, що потенційні можливості застосування глобального супутникового інтернету в галузі транспорту загалом і в галузі автомобільного транспорту зокрема здатні докорінно змінити підходи до управління транспортними потоками, забезпечення логістичних процесів в мультимодальних перевезеннях, впровадження інтелектуальних транспортних систем у вантажні перевезення на всіх рівнях (від місцевої доставки до міжконтинентальних перевезень).

2. На початковому етапі впровадження швидкісного супутникового дозволить здійснювати постійний дистанційний моніторинг транспортних засобів під час поїздок, проводити вчасну діагностику всіх систем, завдяки малій затримці сигналу дасть змогу диспетчеру дистанційно взяти керування на себе транспортним засобом (реалізація такої можливості щоправда потребує дозволу регуляторів безпеки дорожнього руху).

3. Впровадження надійного супутникового зв'язку дозволить значно пришвидшити процес переходу до автономних безпілотних транспортних засобів. У зв'язку з цим найбільш успішно можливості нової технології зв'язку зможуть реалізувати транспортні компанії, які одночасно будуть проводити оновлення парку транспортних засобів в напрямку нульового рівня викидів та з безпілотними технологіями.

### Список літератури

1. Скорик Є., Кондратюк В. Застосування супутникових технологій навігації та зв'язку в автотранспортній галузі. *Наука та інновації*. 2007. Т 3. № 1. С. 67–83.
2. Рудзінська О.В. Беззуб Я.В., Шумляківський В.П. Процеси розвитку автотранспортних технологій в інтелектуальних транспортних системах. *Серія: Технічні науки. ВІСНИК ЖДТУ*. 2016. № 2 (77). С. 230-237.
3. Разработка навигационных программно-аппаратных GPS/GPRS комплексов на движущихся объектах / М. П. Мусиенко, В. И. Томенко, О. Л. Савчук, М. П. Рудь. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2007. № 1. С. 119-122.
4. Crawford M. 7 Top Trends in Transportation Technology / Mark Crawford. *The American Society of Mechanical Engineers*. URL: <https://www.asme.org/topics-resources/content/7-top-trends-in-transportation-technology>. (Last accessed: 11.02.2021)
5. Advancements in Transportation Technology. URL: <https://onlinemasters.ohio.edu/blog/5-advancements-in-transportation-technology/>. (Last accessed: 11.02.2021)
6. Top 8 Transportation Industry Trends in 2021. URL: <https://stfalcon.com/en/blog/post/transportation-industry-trends>. (Last accessed: 11.02.2021)
7. Feasibility reasoning of creating ultra-low orbit communication systems based on small satellites and method of their orbits designing // Information and Telecommunication Sciences/ O. Lysenko, M. Sparavalo, O. Tachinina et al. DOI:10.20535/2411-2976.12020.59-70.
8. GEO, MEO, and LEO How orbital altitude impacts network performance in satellite data services. URL: <https://www.satellitetoday.com/content-collection/ses-hub-geo-meo-and-leo/>. (Last accessed: 13.02.2021)
9. Starlink. 2021. URL: <https://www.starlink.com>. (Last accessed: 20.02.2021)
10. Krebs M. Patent No.: US 9,647,749 B2 SATELLITE CONSTELLATION / Mark Krebs. 2017. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/be/a2/5a/a4fb3c123a1ea7/US9647749.pdf>. (Last accessed: 11.02.2021)
11. Oneweb. 2021. URL: <https://www.oneweb.world/>. (Last accessed: 22.02.2021)

12. Project Kuiper . 2021. URL: <https://www.amazon.jobs/en/teams/projectkuiper>. (Last accessed: 24.02.2021)
13. Telesat Lightspeed LEO Network . 2021. URL: <https://www.telesat.com/leo-satellites/>. (Last accessed: 24.02.2021)
14. GalaxySpace. 2021. URL: <http://www.yinhe.ht/indexEn.html>. (Last accessed: 24.02.2021)
15. Всє о проекте «Спутниковый интернет Starlink». URL: <https://habr.com/ru/post/526154/>. (Last accessed: 24.02.2021)
16. SpaceX хоче підключити до Starlink літаки і весь вантажний транспорт. URL: <https://mind.ua/news/20223134-spacex-hoche-pidklyuchiti-do-starlink-litaki-i-ves-vantazhnij-transport>. (Last accessed: 24.02.2021)

## References

1. Skoryk, Ye. & Kondratiuk, V. (2007). Zastosuvannia suputnykovykh tekhnolohii navihatsii ta zviazku v avtotransportnii haluzi [Application of satellite navigation and communication technologies in the road transport industry]. *Nauka ta innovatsii - Science and innovation. Vol 3, 1.* 67–83 [in Ukrainian].
2. Rudzinska, O.V., Bezzub, Ya.V. & Shumliakivskiyi, V.P. (2016). Protsesy rozvytku avtotransportnykh tekhnolohii v intelektualnykh transportnykh systemakh [Processes of development of motor transport technologies in intelligent transport systems]. *Seriia: Tekhnichni nauky - Series: Technical Sciences. № 2 (77).* 230-237 [in Ukrainian].
3. Musyenko, M. P., Tomenko, V. Y., Savchuk, O. L. & Rud, M. P. (2007). Razrabotka navigacionnykh programmno-apparatnykh GPS/GPRS kompleksov na dvizhushchihysya ob"ektah [Development of navigation software and hardware GPS/GPRS complexes on moving objects] . *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu - Visnik of the Cherkasy State Technological University. № 1.* 19-122 [in Russian]
4. Crawford, M. (2020). 7 Top Trends in Transportation Technology. The American Society of Mechanical Engineers. [www.asme.org](http://www.asme.org). Retrieved from <https://www.asme.org/topics-resources/content/7-top-trends-in-transportation-technology> [in English].
5. Advancements in Transportation Technology. [onlinemasters.ohio.edu](http://onlinemasters.ohio.edu). Retrieved from <https://onlinemasters.ohio.edu/blog/5-advancements-in-transportation-technology/> [in English].
6. Top 8 Transportation Industry Trends in 2021. [stfalcon.com](http://stfalcon.com). Retrieved from <https://stfalcon.com/en/blog/post/transportation-industry-trends> [in English].
7. Lysenko, O., Sparavalo, M., Tachinina, O., Yavisya, V. & Ponomarenko, S. (2020). Feasibility reasoning of creating ultra-low orbit communication systems based on small satellites and method of their orbits designing. *Information and Telecommunication Sciences*. Retrieved from: DOI:10.20535/2411-2976.12020.59-70. [in English]
8. GEO, MEO, and LEO How orbital altitude impacts network performance in satellite data services. [www.satellitetoday.com](http://www.satellitetoday.com). Retrieved from <https://www.satellitetoday.com/content-collection/ses-hub-geo-meo-and-leo/> [in English].
9. Starlink. [www.starlink.com](http://www.starlink.com). Retrieved from <https://www.starlink.com> [in English].
10. Krebs, M. (2017). Patent No.: US 9,647,749 B2 SATELLITE CONSTELLATION. Retrieved from <https://patentimages.storage.googleapis.com/be/a2/5a/a4fb3c123a1ea7/US9647749.pdf>. [in English]
11. Oneweb. [www.oneweb.world](http://www.oneweb.world). Retrieved from <https://www.oneweb.world/> [in English].
12. Project Kuiper. [www.amazon.jobs](http://www.amazon.jobs). Retrieved from <https://www.amazon.jobs/en/teams/projectkuiper> [in English].
13. Telesat Lightspeed LEO Network. [www.telesat.com](http://www.telesat.com). Retrieved from <https://www.telesat.com/leo-satellites/> [in English].
14. GalaxySpace. [www.yinhe.ht](http://www.yinhe.ht). Retrieved from <http://www.yinhe.ht/indexEn.html>.
15. Vsyо о proekte «Sputnikovyj internet Starlink». [Everything about the Starlink Satellite Internet project.]. [habr.com](http://habr.com). Retrieved from <https://habr.com/ru/post/526154/> [in Russian].
16. SpaceX khoche pidkliuchyty do Starlink litaky i ves vantazhnyi transport. [SpaceX wants to connect Starlink planes and all trucks]. [mind.ua](http://mind.ua). Retrieved from <https://mind.ua/news/20223134-spacex-hoche-pidklyuchiti-do-starlink-litaki-i-ves-vantazhnij-transport>. [in Ukrainian]

Anatoliy Soltus, Prof., Dr. tech. sci., Maksym Rud, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Prospects for the Application of the Global High-speed, Low Latency Broadband Satellite Internet in the Field of Road Transport**

The article examines the problems of navigation and communication with the use of satellite technologies in road transport in the context of the growth of globalization processes in the world economy and the transformations of freight transport technologies caused by a large-scale transition to transport with zero emissions and the development of unmanned vehicles.

The paper discusses the principles of building a global high-speed broadband satellite Internet with low latency. Potential capabilities of technologies such as digital antenna arrays and laser communication channels used in such systems are analyzed. Also considered are the existing and potential problems, both technical with electromagnetic compatibility with existing satellite communication systems and between systems under construction or planning, and legal caused by changes in the principles of information transfer at the interstate level. The main players in the emerging market of high-speed satellite communications are considered and the parameters of the systems declared by them are described. The comparison of the current state of building satellite constellations of individual projects is carried out and the ability to implement the announced plans by individual companies is analyzed. The disadvantages that create obstacles for the introduction of high-speed satellite communications in road transport at the moment and the directions of their overcoming are highlighted.

Considering the potential of satellite Internet systems, the current state of construction, as well as existing technical and legal restrictions, the introduction of reliable satellite communications will significantly speed up the transition to autonomous unmanned vehicles. In this regard, the most successful opportunities for the new communication technology will be able to realize the transport companies, which will simultaneously update the fleet of vehicles towards zero emissions and with unmanned technologies.

**global navigation satellite system, satellite communication, satellite internet, satellite constellation, low Earth orbit, small satellite, transport communication system, Self-driving car**

*Одержано (Received) 21.03.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*

**УДК 65.018:656.13**

**DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).264-272](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).264-272)**

**О.С. Хачатурян**, канд. екон. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: lenarice1982@gmail.com*

**С.Л. Хачатурян**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: serg130354@gmail.com*

## Оцінювання якості надання автотранспортних послуг

Все більшого поширення та розвитку останнім часом набуває сфера надання автотранспортних послуг. Постійно збільшується число підприємств і одноосібних перевізників на ринку автотранспортних послуг. Разом з цим зростає й рівень конкуренції між надавачами автотранспортних послуг, що викликає необхідність підвищення якості надання автотранспортних послуг. Адже високий рівень якості дозволяє займати провідне положення у даному секторі економіки. Нагальною є необхідність проведення оцінювання якості надання автотранспортних послуг, причому актуальним є оцінювання якості їх з позицій споживачів цих послуг. У ході дослідження встановлено як групові, так і одиничні показники оцінювання якості. Аналіз існуючих показників виявив оцінювання якості послуг з урахуванням, у першу чергу, інтересів суспільства в цілому. Визначено основні базові положення, спираючись на котрі, може бути вдосконалена сукупність методичних підходів до оцінювання якості автотранспортних послуг. Встановлено рівні оцінювання автотранспортних послуг і їх зміст.

**автотранспортна послуга, якість, автотранспортний сервіс, оцінка якості, ознаки якості**

© О.С. Хачатурян, С.Л. Хачатурян, 2021



**Постановка проблеми.** Одним з важливих елементів розуміння поняття якості на підприємствах автотранспорту є оцінювання підсумкової їх продукції – автотранспортного сервісу й сервісу для споживачів. Кінцеве положення пов'язано з тим, що автотранспортне обслуговування створюється під час певної діяльності, таким чином її доброякісність чимало залежить від характерних рис даної діяльності. Ціль такої оцінки – виявлення ступеня добротності автотранспортного обслуговування за поміттю параметрів здійснення належних процесів. При цьому здійснювати оцінку якості слід з позицій споживачів, встановлюючи ступінь їхнього задоволення у належних запитах, дезидератах і бажаннях. У зв'язку з цим необхідне удосконалювання множини консеквентних підходів до оцінки якості автотранспортного обслуговування при формулюванні його ознак.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** У новітній літературі з менеджменту якості [1-4] доволі конкретно відзначається необхідність оцінки якості з точки зору споживачів, [3, с. 51]. Подібним підходом часто користуються в ході виконання оцінок якості готельного сервісу та послуг у сфері освіти [2]. Базисом тут є формулювання сподівань і перцепція якості сервісу чи обслуговування за чіткими мірками, цебто оцінювання якості розвертається в ході підтвердження чи не підтвердження сподівань, а сприймання сервісу споживачами формується з оцінювання діяльності обслуговуючого персоналу та предметної царини, в якій послуга споживається.

У сфері автомобільних перевезень теж виконані спроби оцінити якість транспортного сервісу з точки зору реальних набувачів послуг [4, с. 45-52]. У результаті визначені ознаки оцінки якості на підмурі трьох етапів (прийняття рішення щодо набуття послуги, власне набуття послуги та відгук на набуття послуги) надання послуг з точки зору набувачів транспортних послуг. У відповідності до цих трьох етапів оцінюється їх якість за відповідними показниками якості і на їх основі отримується узагальнюючий показник. Проте, таке оцінювання якості проводиться після отримання послуги, тому не враховує побажань споживачів стосовно якості обслуговування та не дає можливості порівняти, наскільки різняться між собою рівні наданих і очікуваних послуг.

Використання наявних методик оцінки якості надання послуг чи виробленої продукції, має низку недоліків:

1. Немає можливості порівняти й не існує взаємозв'язку між показниками, що використовуються при оцінюванні якості послуг, продукції й процесів, які продукують її ступінь. Тому з точки зору споживачів оцінювання якості отриманих послуг або товарів з поміттю роздільного ладу показників є незадовільною.

2. Не виокремлюється особливість створення ознак, які можуть бути використані для оцінювання якості споживачем ходу обслуговування. При отриманні послуги, розгорнутої в часі, як це має місце при отриманні автотранспортних послуг, остаточний рівень її якості формується з складових якості окремих її етапів.

Все дане й підтверджує закономірність створення новітньої більш досконалої методики оцінювання якості автотранспортних послуг, яка б відповідала сьогочасній теорії менеджменту якості.

**Постановка завдання.** Використовуючи теорію та практику роботи підприємств автомобільного транспорту та накопичений значний досвід у оцінюванні якості автотранспортних послуг, удосконалити сукупність методичних підходів до оцінки якості автотранспортних послуг при формуванні її показників.

**Виклад основного матеріалу.** На сьогоднішній день оцінку якості автомобільних перевезень оцінюють сукупними ознаками, тобто такими, що визначають певний клас атрибутів продукції чи сервісу. До них можна віднести збережуваність вантажів, вчасність здійснення перевезень, вигоду використання

порядку перевезень і їх вигідність. У свою чергу сукупні ознаки можна оцінити окремими, тобто такими, що визначають єдиний атрибут продукції чи сервісу.

Збережуваність вантажів визначається незмінністю його якості та кількості. Цей атрибут визначає спроможність вантажоперевізників забезпечувати як чисельну, так і якісну збережуваність вантажів при транспортуванні їх від пункту відправки до пункту призначення та визначається розбіжністю чисельності та якості вантажу у адресанта та адресата.

Вчасність здійснення перевезень суміщає ознаки вчасності відправлення вантажів і їхнього доставлення. Вчасність доставлення вантажів характеризує спроможність системи перевезень вбезпечити вчасне вивезення вантажу від адресанта й доставлення його адресатові. Від цього залежить тривалість обертання вантажу між його виготовленням і використанням, що складається з терміну зберігання вантажу у адресанта, часу доставлення його транспортом і терміну зберігання у отримувача до використання.

Зручність використання системи транспортування містить технічні та організаційні ознаки. Технічні ознаки обіймають у собі: зручність завантаження-розвантаження вантажу; зручність підготовки вантажу до транспортування; міру участі адресантів вантажу чи вантажоотримувачів у ході доставлення вантажу; зручність здійснення експедиторського супроводу вантажу.

Організаційними ознаками є: зручність подання замовлень на транспортування; зручність отримання повідомлення про хід доставлення вантажу.

Вигідність транспортування містить економічність виготовлення у адресантів і адресатів, що пов'язано безпосередньо з транспортуваннями, й економічність доставлення. Перша складова визначає затрати на тару й пакування, обігові накладки адресантів і адресатів, затрати адресантів і отримувачів на складування вантажів. Вигідність доставлення показує вигідність транспортування, завантаження й вивантаження та експедиторського супроводу.

Якість пасажирських перевезень визначається низкою ознак, які атестують ступінь задоволення вимог пасажирів у транспортних послугах: комфорт під час подорожі; час, який витрачають пасажирів на поїздки; безпеку пересування.

Заповнення автобусів визначається як відношення дійсно перевезених за цілком визначений проміжок часу пасажирів до імовірних, розрахованих за обмеженою на час карантину місткістю транспортних засобів. Для обчислення цієї ознаки розроблено та використовується низка нормативів у залежності від виду повідомлення та розміру транспортного засобу, формальної ємності. Коефіцієнт наповненості транспортних засобів, розрахований відповідно їхньої найбільшої ємності, котра встановлюється ТУ заводу-виробника, корегується відповідно до карантинних обмежень. Дотримання графіку руху транспортних засобів оцінюється порівнянням з нормативною величиною, але не нижчою від 98,0%.

Час, який витрачається пасажирами на подорож, містить час на прибуття до місця відправлення й від місця прибуття до місця призначення, чекання транспортного засобу та час у дорозі. Величина вказаних ознак залежать від забудови району кінцевої зупинки, загальної протяжності транспортних магістралей, по яким пролягають маршрути транспортних засобів, сумарної протяжності маршрутів, графіку руху на маршрутах і ін.

Безпечність руху визначається коефіцієнтом динамічної зміни ступеня ДТП в авто-транспортному підприємстві.

У роботі [5, с. 39] автором ознаки якості сервісу автотранспорту виділені у чотири групи:

1. Ознаки якості власне послуги – функціонального призначення, матеріального

збитку одягу і багажу пасажирів.

2. Ознаки якості обслуговування – естетичності, ергономічні, комфортності, етичні і санітарно-гігієнічні характеристики.

3. Показники витрат на доступність послуги – витрати часу й коштів.

4. Побічний ефект або збиток – моральні та фізичні показники безпечності.

Аналіз наведених ознак якості показує, що предметом оцінювання переважно є продукція автотранспортного підприємства, тобто перевезення, що виконуються. У той же час якість сервісу, як процесу, аналізується порізно й допускає оцінювання шлейфу атрибутів процесу перевезення й порядку перевезень, які зумовлюють відповідність їхнім нормативним канонам.

Як показано в роботі [6, с. 20], ознаки якості транспортного сервісу при перевозках вантажним автомобільним транспортом, розроблено з точки зору аналізування технологічних складових ходу доставлення вантажу. Мірилами оцінювання транспортного сервісу слугують величини ознак, які дозволяють досягнути максимального ефекту в сільськогосподарській і промисловій сферах, які обслуговуються, при наперед означених затратах на розвинення та експлуатацію автотранспорту, гадану користь за мінімальних затрат або максимальне відношення ефекту до затрат. У даному випадку немає оцінки часткових сторін ходу обслуговування отримувачів транспортного сервісу.

Як вважає М.Ф. Трихунков, якість транспортного сервісу у ході транспортування вантажів визначає «рівень (ступінь) задоволення за часом потреб у перевезеннях за загальним обсягом і клієнтурою вантажів, безперебійність (регулярність) і надійність (безпека)» [7, с. 13].

Крім перелічених вище ознак якості транспортного сервісу при перевезенні пасажирів слід оцінювати їх ще й доступністю, тобто кількістю в даній місцевості автотранспорту, наявністю інформації, поміркованістю вартості перевезень.

Отже, можна відзначити таке:

1. Оцінка якості транспортного сервісу теоретично й методологічно заснована й спрямована на загальногосподарський підхід з переважаючим задоволенням у першу чергу зацікавлень суспільства взагалі. В ознаках, які використовуються для оцінки, не зосереджується увага першочерговості її виконання з точки зору користувачів автотранспортними послугами, відповідності їхнім цілком певним потребам.

2. Належна увага не надається таким процесам взаємодіяння з отримувачем, як офертам сервісу, оформленню замовлень і розрахунків та інше.

У автотранспортній галузі виконані дослідження оцінювання якості транспортного сервісу та сформовано ознаки оцінювання сервісу з точки зору реальних отримувачів [4, с. 45-52], ґрунтуючись на етапах обслуговування. Аналізуються три етапи:

- затвердження рішення про використання сервісу;
- використання послуги;
- відголос використання сервісу.

Стосовно цих етапів оцінювання якості подається відповідно до трьох групових ознак якості запропонованих сервісів, якості використання послуг і задоволення сервісом, які складаються в суму впливів узагальнюючої ознаки. Проте такий підхід зорієнтований на виконання оцінювання по закінченню процесу надання послуги споживачам і не має на увазі формулювання та врахування їх побажань якості, послідує порівнювання реального сприймання якості з цими побажаннями.

Використання наявних консеквентних підходів до оцінювання якості автотранспортного сервісу має такі хиби:

1. Для оцінювання якості сервісу та ходу формування її ступеня використовуються ознаки, котрі не порівнювані та не пов'язані між собою. Так, взагалі оцінювання якості кожного процесу виконується за допомогою ознак результативності, ефективності та пристосованості. У даному випадку результативність процесу відображає якість сервісу стосовно тому, чи відповідає він запроектованому. Таким чином, з точки зору отримувача сервісу оцінювання якості ходу надання послуги та підсумкового наслідку шляхом використання розрізної системи ознак є незадовільною.

2. Не виокремлюється особливість формування ознак, які призначені для оцінювання якості ходу надання послуги її отримувачем. При цьому головною особливістю виокремлення ознак якості є недиференційовані атрибути товарів і не беруться до уваги імовірні моменти часу оцінювання реальним отримувачем послуги. Коли отримувач послуги оцінює продукцію, то ця вада не така істотна, тому що при покупці товару є шанс дати оцінку його окремих сторін. Коли ж купується сервіс, то він розгорнутий у часі, протягом якого можливі непорозуміння з надавачем послуги та недостатньою її якістю. Тому рівень якості складається поступово від моменту звернення за сервісом, чекання та отримання його, та насамкінець належними порівняннями, що й визначає потребу їх врахування та оцінювання якості у відповідності до цих стадій.

Наведене підводить до необхідності створення сучасної вдосконаленої методології оцінювання якості автотранспортного сервісу, котра відповідала б новітньому вченню менеджменту якості.

Маючи на меті вдосконалення множини методичних підходів до оцінювання якості автотранспортного сервісу при формуванні її ознак, доречно спиратися на такі тези:

1. При відборі та встановленні вимог і ознак зважати на:

а) пряму комунікацію виконавця та отримувача в ході надання сервісу;

б) різноманітність запитів, бажань отримувачів сервісу, що утруднюють стандартизацію побажань і методів сервісу;

в) одномоментність ходу сервісу та отримувача послуги;

г) різноманітність сервісу.

2. Оцінювання якості автотранспортного сервісу в залежності від його мети виконувати роздільно за ступенями деталізації:

а) типізованим;

б) укрупненим;

в) розгорнутим.

3. На типізованому ступені враховувати центральні ознаки якості, котрі відображують головні побажання сукупності отримувачів автотранспортного сервісу. Укрупнений ступінь оцінки передбачає врахування етапів обслуговування отримувачів послуг. На розгорнутому етапі спиратися на безпосередньому ході створення, якості автотранспортного сервісу, тобто ході обслуговування отримувача послуги. В цьому випадку оцінювання якості виконується за прозорими його ступенями, так званими «пунктами сутічок» – всіма випадками функціонування, коли отримувач послуги взаємодіє з працівниками автотранспортного підприємства в ході оферту та використання сервісу.

4. Ґрунтуватися на виявленні побажань, очікування якості до того, як сервіс буде придбаний отримувачем послуги й зіставлення з ними реального її сприймання потому.

Ступені оцінювання якості автотранспортного сервісу та їх сутність у загальному виді наведено на рис. 1.

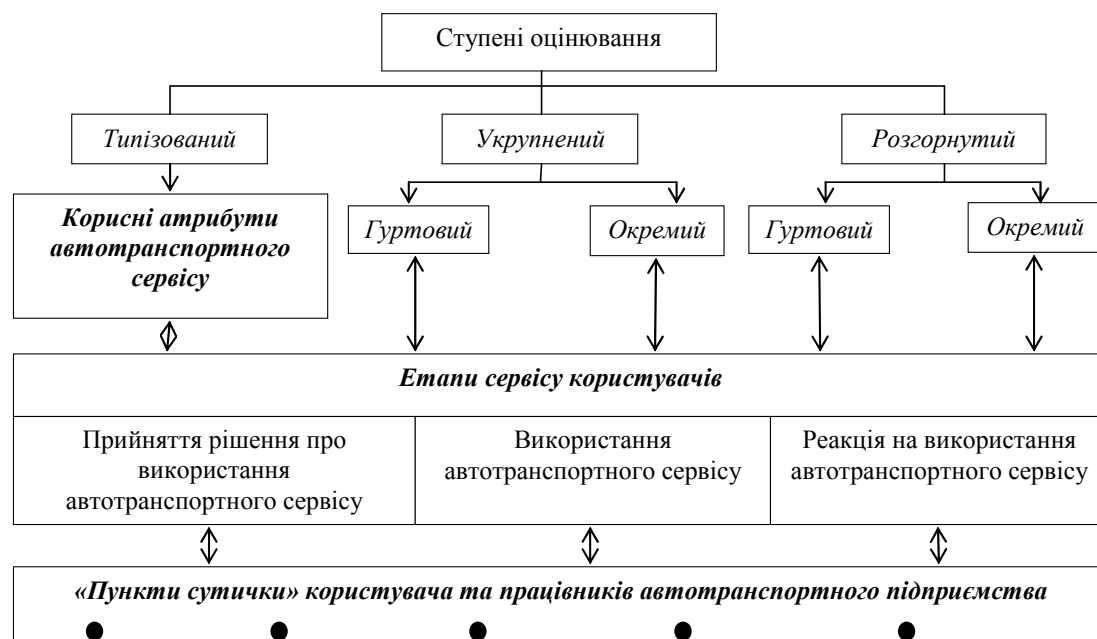


Рисунок 1 – Ступені оцінювання якості автотранспортного сервісу

Джерело: розроблено авторами

Типізований ступінь має на увазі оцінювання якості автотранспортного сервісу за класами користувачів на основі ознак, які відображують найважливіші для них вигідні позначки; укрупнений – за етапами надання послуг користувачам; розгорнутий – особі по користувачу даного сервісу та його взаєминам з автотранспортним підприємством. Водночас, на укрупненому та розгорнутому ступенях оцінювання може містити два підступеня: гуртовий і окремий.

На окремому ступені оцінювання якості автотранспортного сервісу здійснюється за єдиним епізодом його надання, на гуртовому – за їх множиною.

Простежимо прикмети утворення ознак оцінювання якості на кожному з цих ступенів.

На розгорнутому ступені є доречним, з огляду на етапи ходу надання послуг користувачам і «пунктів сутічок» з ними, виокремити ознаки «дієвої» та «інструментованої» якості.

Ознаки «дієвої» якості можуть виражатися на усіх «пунктах сутічок» із користувачем автотранспортного сервісу – від звернення користувача до автотранспортного підприємства до завершення їх співпраці, а «інструментованої» якості – тільки в «пунктах сутічок», у котрих безпосередньо складаються вигідні атрибути сервісу.

«Дієву якість» можна оцінити ознаками, котрі відображують чемність працівників, професіоналізм, знання, співчуття, предметну оснащеність.

До ознак «інструментованої» якості можна віднести всі її типи, за допомогою котрих оцінюються корисні позначки від надання автотранспортного сервісу:

- зручність у використанні системи сервісу;
- безпечність перевезення;
- збережуваність вантажу;
- вчасна відправка та прибуття вантажу;
- надійність перевезення, гарантовані строки доставлення, в тому числі доставлення вантажу цілковито в строк;
- регулярність доставлення вантажу;

- забезпечення доставлення вантажу «з точки в точку»;
- провід вантажу до заключної точки призначення;
- можливість розмитнення;
- найліпшу локацію точок відправлення та доставлення;
- наявність потрібної тари для транспортування;
- наявність потрібного обладнання для перевантажування;
- відсутність проміжних перевантажень і таке інше.

Прямі «пункти сутичок» і виклики до якості на кожному з них визначаються судячи з індивідуальності отримувача послуги. Себто набір «пунктів зіткнення» та викликів до якості в будь-якому певному випадку буде відрізнятися від інших (табл. 1).

Таблиця 1 – Ознаки якості автотранспортного сервісу розгорнутого ступеня

Явні «пункти сутичок» отримувачів послуг і працівників автотранспортного підприємства	Назва
Звернення потенційного отримувача послуги	<b>Ввічливість працівників</b>
	<b>Підготовленість працівників</b>
Візит отримувача послуги до автотранспортного підприємства	Матеріальна оснащеність
Вітання з отримувачем послуги	Ввічливість працівників
	Співчуття
Визначення потреб	Компетентність працівників
	Професійна підготовленість
Укладення договору	Компетентність працівників
	Професійна підготовленість
Надходження вантажу до отримувача	Матеріальна оснащеність
	Ввічливість працівників
	Точність
Розвантаження вантажу	Матеріальна оснащеність
	Дотримання терміну доставки вантажу
	Збережуваність вантажу
	Безпечність
...	...

*Джерело: розроблено авторами*

На укрупненому ступені ознаки оцінювання якості формуються в відповідності до етапів надання послуг користувачам (табл. 2).

Таблиця 2 – Показники якості автотранспортних послуг укрупненого рівня

Етапи надання послуг отримувачам	Назва
Прийняття рішення про використання автотранспортного сервісу	Запорука сервісу
	Зручність використання системи сервісу
Вживання автотранспортного сервісу	Збережуваність вантажу
	Дотримання терміну надання сервісу
Відгук на отриманий сервіс	Задоволення від якості запропонованого сервісу
	Задоволення вигідними властивостями сервісу

*Джерело: розроблено авторами*

При сім теж допустима гнучка система ознак, себто додавання чи скорочення їх переліку.

На розгорнутому ступені доречно використовувати ознаки, котрі відображують тільки головні вигідні прикмети автотранспортного сервісу для недиференційованих класів отримувачів послуг.

**Висновки.** 1. Визначено відмінні риси методичних основ проведення оцінювання якості на підприємствах автомобільного транспорту.

2. Оцінювання якості є результатом ходу сприймання якості, котра складається в процесі надання послуг користувачеві та супроводжується винесення конкретної оцінки кількісної міри відповідності ходу отримуваного сервісу його чеканням.

3. Визначено стадії оцінювання якості та консеквентне забезпечення їх здійснення.

4. Запропоновано підхід до оцінювання якості автотранспортного сервісу та здійснення ходу надання послуг користувачам, який ґрунтується на виявленні його значень за трьома ступенями: типізовано, укрупненому та розгорнутому.

5. Обґрунтовано ознаки якості ходу надання послуг користувачам на базі «пунктів сутичок» з ними за двома класами ознак: «дієвому» та «інструментованому».

## Список літератури

7. Пономарева Т.А., Супрягина М.С. Процессный подход к оценке внутреннего качества в сервисной организации. *Менеджмент в России и за рубежом*. 2005. №4. С. 74-81.
8. Новаторов Э. Качобрус: Маркетинговый инструмент для измерения качества образовательных услуг. *Маркетинг*. 2001. №6 (61). С. 54-67.
9. Пономарева Т.А., Супрягина М.С. Как на практике оценить качество через количество. *Маркетинг в России и за рубежом*. 2004. №2(40). С. 51-63.
10. Шинкаренко В.Г., Криворучко О.Н. Управление результатами деятельности работников АТП. Харьков: Изд-во ХГАДТУ, 1999. 143 с.
11. Минин Б.А., Сюткин Г.Н., Терехов А.Г., Курицына В.В. ССК – уникальная система сертификации качества. *Стандарты и качество*. 1996. № 7. С. 36-41.
12. Повышение качества транспортного обслуживания народного хозяйства / А.В. Комаров, Б.С. Рязанцев, Н.С. Цурков. и др. / Под. ред. А.В. Комарова и В.С. Кравченко. М.: Транспорт, 1988. 205 с.
13. Трихунков М.Ф. Транспортное производство в условиях рынка: качество и эффективность. М.: Транспорт, 1993. 225 с.

## References

1. Ponomareva, T.A. & Supryagina, M.S. (2005). Protsessnyy podkhod k otsenke vnutrennego kachestva v servisnoy organizatsii [Process approach to assessing internal quality in a service organization]. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom – Management in Russia and abroad*. 4, 74-81 [in Russian].
2. Novatorov E. Kachobrus (2001). Marketingovyy instrument dlya izmereniya kachestva obrazovatel'nykh uslug [Marketing tool for measuring the quality of educational services]. *Marketing – Marketing*. 6(61), 54-67 [in Russian].
3. Ponomareva, T.A. & Supryagina, M.S.(2004). Kak na praktike otsenit' kachestvo cherez kolichestvo [How to evaluate quality in practice through quantity]. *Marketing v Rossii i za rubezhom – Marketing in Russia and abroad* 2(40), 51-63 [in Russian].
4. Shinkarenko, V.G. & Krivoruchko, O.N. (1999). *Upravleniye rezul'tatami deyatel'nosti rabotnikov ATP [Management of the results of the activity of the ATP employees]*. Kharkiv: Izdatel'stvo KHNADU [in Russian].
5. Minin, B.A., Syutkin, G.N., Terekhov, A.G. & Kuritsyna, V.V.(1996). SSK – unikal'naya sistema sertifikatsii kachestva [ССК – a unique quality certification system]. *Standarty i kachestvo – Standards and quality*. 7, 36-41 [in Russian].
6. Komarov, A.V., Ryazantsev, B.S., Tsurkov, N.S. et al. (1988). *Povysheniye kachestva transportnogo obsluzhivaniya narodnogo khozyaystva [Improving the quality of transport services for the national economy]*. Moscow: Transport [in Russian].

7. Trikhunkov, M.F. (1993). *Transportnoye proizvodstvo v usloviyakh rynka: kachestvo i effektivnost'* [*Transport production in market conditions: quality and efficiency*]. Moscow: Transport [in Russian].

**Olena Khachatryan**, senior lecturer, PhD in econ. sci., **Serhiy Khachatryan**, Assoc. Prof., PhD in tech. sci.  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Evaluation of the Quality of Motor Transport Services**

Recently, the sphere of providing motor transport services has become more and more widespread and developed. The number of enterprises and sole proprietors in the market of motor transport services is constantly increasing.

At the same time, the level of competition between motor transport service providers is growing, which makes it necessary to improve the quality of motor transport services. After all, a high level of quality allows us to occupy a leading position in this sector of the economy.

There is an urgent need to assess the quality of motor services, and it is important to assess their quality from the standpoint of consumers of these services. Distinctive features of methodical bases of carrying out quality assessment at the enterprises of motor transport are defined.

In the course of research both group, and individual indicators of quality assessment are established. Quality assessment is the result of the course of perception of quality, which is formed in the process of providing services to the user and is accompanied by a specific assessment of the quantitative degree of compliance of the received service with his expectations.

Analysis of existing indicators revealed assessment of service quality. The stages of quality assessment, consistent provision of their implementation and the main basic provisions are determined, based on which a set of methodological approaches to assessing the quality of road transport services can be improved.

The levels of evaluation of motor transport services and their content are established. An approach to assessing the quality of road transport service and the implementation of the course of providing services to users, which is based on its identified values in three stages: standardized, consolidated and expanded. The signs of the quality of the course of providing services to users on the basis of "points of conflict" with them are substantiated by two classes of signs: "effective" and "instrumental".

**motor transport service, quality, motor transport service, quality assessment, quality signs**

*Одержано (Received) 06.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 15.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*



**ЗМІСТ****Комп'ютерні науки***Р.М. Минайленко, Є.В. Мелешко*

Проблеми розподілених обчислень та шляхи їх вирішення ..... 3

**Комп'ютерна інженерія***В.В. Міхав, Є.В. Мелешко, С.В. Шимко*

Методи та структури даних для реалізації бази даних рекомендаційної системи соціальної мережі ..... 8

*Р.М. Минайленко, О.Г. Собінов, О.К. Коноплицька-Слободенюк, К.О. Буравченко*

Архітектурні особливості систем розподілених обчислень ..... 16

**Прикладна механіка***А.Г. Кравцов*

Дослідження структури сервовитної плівки на поверхні тертя з фулереновими композиціями ..... 24

*Serhiy Shargorodskiy, Volodymyr Rutkevych, Vadym Zakrevskiy*

Modeling of working processes of an adjustable APN type PVC 1.85 taking into account parametric oscillations ..... 33

**Матеріалознавство***Ю.В. Кулешков, М.В. Красота, Т.В. Руденко, Р.А. Осін, В. Д. Крошка*

Зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів мікродугового оксидуванням ..... 44

*Ю.В. Кулешков, М.В. Красота, Т.В. Руденко, Р. А. Осін, В.Г. Рева*

Відновлення поршневих пальців гарячим пластичним деформуванням ..... 54

*М.М. Студент, В.М. Гвоздецький, Г.Г. Веселівська, Х.Р. Задорожна, Р.С. Мардаревич, Я.Я. Сірак, С.І. Маркович*

Вплив складу електроліту для твердого анодування алюмінію на характеристики оксидного шару ..... 63

**Галузеве машинобудування***В.І. Пантелєєнко, А.Л. Червоноштан, В.А. Пушенко, С.О. Карпушин*

Дослідження напруженого стану багатоцільового змінного бульдозерно-захватного робочого обладнання ..... 67

*О.І. Алфьоров, О.С. Гринченко*

Прогнозування і управління надійністю в умовах застосування запобіжних пристроїв з детермінованим навантаженням спрацьовування ..... 78

**Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології***Borys Goncharenko, Larysa Vikhrova, Mariia Miroshnichenko*

Optimal Control of Nonlinear Stationary Systems at Infinite Control Time ..... 88

*О. П. Голик, В. М. Каліч, Р. В. Жесан, І. В. Волков*  
Технології організації дистанційного навчання в Україні ..... 94

*В.В. Щепін, Д.В. Трушаков, О.І. Сіріков*  
Пристрій для корекції психоемоційного стану людини ..... 100

### **Будівництво та цивільна інженерія**

*С.Л. Хачатурян, О.І. Іваненко, О.В. Щербак*  
Дослідження впливу навантаженості на конструктивні елементи шарнірних машин для дорожнього будівництва ..... 111

*В.В. Клименко, Н.В. Ковальчук, В.І. Гуцул, Р.В. Телюта*  
Проблема надійності водопровідних мереж на прикладі міста Кропивницький ..... 120

*Г. Д. Портнов, А.А. Тихий, В.В. Дарієнко, В.В. Пукалов*  
Вплив форми кованого однорогого гака на його ефективність ..... 127

### **Агроінженерія**

*А.С. Лімонт, В.О. Ломакін, З.А. Лімонт*  
Пропускна спроможність і вантажопідйомність кузовних машин для внесення твердих органічних добрив ..... 134

*Н.І. Кім*  
Визначення закономірностей оцінок показників якості технологічного процесу на безрозмірній шкалі ..... 142

### **Автомобільний транспорт**

*М.В. Красота, І.Ф. Василенко, С.О. Магопець, О.В. Бевз, Р.А. Осін, О.В. Крилов*  
Ідентифікація несправностей опор амортизаційних стійок легкових автомобілів ..... 153

*Л.А. Тарандушка, Н.Л. Костьян, І.П. Тарандушка*  
Розв'язання багатокритеріальної задачі оптимізації системи автосервісу на прикладі «АНТ-АВТО-СЕРВІС» ..... 162

*О.Ю. Лук'яненко, С.Ю. Федьорко, В.В. Халявка*  
Аналіз методів дослідження ідентифікаційних номерів транспортних засобів для проведення судової експертизи ..... 168

*В.В. Аулін, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко, О.М. Лівіцький, А.Є. Чернай, Д.В. Голуб, А.О. Головатий*  
Теоретичне обґрунтування управління функціонуванням технічними та транспортними системами на основі методів системної теорії інформації ..... 178

*О.М. Лівіцький*  
Вдосконалення технічного сервісу автотракторної техніки в умовах агропромислового виробництва ..... 189

*В.В. Клименко, М.В. Босий, В.В. Аулін, І.І. Філімоніхіна,  
С. В. Лисенко, А.В. Гриньків*  
Енергоефективність заправки автомобільного транспорту стиснутим природним газом при використанні газогідратного акумулятора ..... 198

### **Транспортні технології (за видами)**

*М.Є. Кристопчук*  
Аналіз індикаторів сталого розвитку міської пасажирської транспортної системи ..... 208

*О. В. Россолов, С. Е. Лифенко*  
Оцінка сценаріїв сталого розвитку транспортних систем міст з автомобіле-орієнтованою мобільністю ..... 221

*В.В. Аулін, Д.В. Голуб, А.С. Замуренко, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко,  
В.О. Дьяченко*  
Теоретичний системно-спрямований підхід до визначення інтегрального показника ефективності реалізації операцій в транспортних системах ..... 232

*В.В. Аулін, М.Є. Кристопчук, О.П. Цьонь, М.Я. Сташків, М.В. Бабій,  
Ю.Д. Бодоряк*  
Глобальна криза від пандемії Covid-19 та її вплив на мобільність населення..... 247

*А.П. Солтус, М.П. Рудь*  
Перспективи застосування глобального високошвидкісного широкосмугового супутникового інтернету з низькою затримкою у галузі автомобільного транспорту ..... 254

*О.С. Хачатурян, С.Л. Хачатурян*  
Оцінювання якості надання автотранспортних послуг ..... 264

## CONTENT

### Computer Science

- Roman Minailenko, Elisaveta Meleshko*  
Problems of Distributed Computing and Ways to Solve Them ..... 3

### Computer Engineering

- Volodymyr Mikhav, Yelyzaveta Meleshko, Serhii Shymko*  
Methods and Data Structures for Implementing a Database of Social Networks'  
Recommendation Systems ..... 8

- Roman Minailenko, Olexandr Sobinov, Oksana Konoplitska-Slobodenyuk,  
Kostiantyn Buravchenko*  
Architectural Features of Distributed Computing Systems..... 16

### Applied mechanics

- Andrii Kravtsov*  
Investigation of the Structure of a Servotic Film on the Surface of Friction  
with Fullerene Compositions ..... 24

- Serhiy Shargorodskiy, Volodymyr Rutkevych, Vadym Zakrevskiy*  
Modeling of working processes of an adjustable APN type  
PVC 1.85 taking into account parametric oscillations ..... 33

### Materials science

- Yuriy Kuleshkov, Mykhailo Krasota, Timofey Rudenko, Ruslan Osin, V. Kroshka*  
Strengthening of Aluminum Alloy Parts by Micro-Arc Oxidation..... 44

- Yuriy Kuleshkov, Timofey Rudenko, Mikhail Krasota, Ruslan Osin, Vasyl Reva*  
Restoration of Piston Pins by Hot Plastic Deformation ..... 54

- Mykhajlo Student, Volodymyr Hvozdetskii, Halyna Veselivska,  
Khrystyna Zadorozhna, Roman Mardarevych, Yaruna Sirak*  
Influence of Electrolyte Composition on the Characteristics of Synthesized  
During Solid Anodization of Aluminum Oxide Layer..... 63

### Industry engineering

- Volodymyr Panteleenko, Andrii Chervonoshtan, Vadim Pushenko, Serhii Karpushyn*  
Investigation of the Stress State of Multi-purpose Variable Bulldozer-gripping  
Work Equipment ..... 67

- Aleksey Alforyov, Oleksander Grynchenko*  
Predicting and Managing Reliability in the Application of Safety Devices  
with Deterministic Tripping Load..... 78

### Automation and computer-integrated technologies

- Borys Goncharenko, Larysa Vikhrova, Mariia Miroshnichenko*  
Optimal Control of Nonlinear Stationary Systems at Infinite Control Time ..... 88

<i>Olena Holyk, Viktor Kalich, Roman Zhesan, Ihor Volkov</i> Technologies for Distance Education in Ukraine .....	94
<i>Valerii Shchiepin, Dmytro Trushakov, Oleksandr Sirikov</i> Creating a Device for the Correction of Psycho-Emotional State of People .....	100
<b>Construction and civil engineering</b>	
<i>Serhiy Khachatryan, Oleh Ivanenko, Oleh Shcherbak</i> Research of the Effect of Loading on Structural Elements of Articulated Machines for Road Construction.....	111
<i>Vasyl Klymenko, Nataliia Kovalchuk, Vasyl Hutsul, Ruslan Teliuta</i> The Problem of Reliability of Water Supply Networks on the Example of the City of Kropyvnytskyi .....	120
<i>Gennadii Portnov, Andrii Tykhyi, Viktor Dariienko, Viktor Pukalov</i> Influence of the Shape of a Forged Unicorn Hook on its Efficiency.....	127
<b>Agricultural engineering</b>	
<i>Anatoliy Limont, Volodymyr Lomakin, Zlata Limont</i> The Carrying and Load-carrying Capacity of Body Machines for Applying Solid Organic Fertilizers .....	134
<i>Nataliia Kim</i> Determining of Regularities of Evaluations of Technological Process Quality Indicators on a Sizeless Scale.....	142
<b>Road transport</b>	
<i>Mykhailo Krasota, Ivan Vasylenko, Serhii Mahopets, Oleg Bevz, Ruslan Osin, Oleksandr Krylov</i> Identification of Car damper Strut Supports Defects .....	153
<i>Lyudmyla Tarandushka, Natalia Kostian, Ivan Tarandushka</i> Solution of the Multicriteria Problem of Optimization of the Car Service System on the Example of "ANT-AUTO-SERVICE", Cherkassy .....	162
<i>Olexandr Lukianchenko, Sergiy Fedorko, Viktor Halyavka</i> Analysis of Research Methods of Vehicle Identification Numbers for Forensic Examination.....	168
<i>Viktor Aulin, Andrey Grinkiv, Serhii Lysenko, Oleksandr Livitskyi, Andrii Chernai, Dmytro Holub, Artem Holovatyi</i> Theoretical Substantiation of Management of Functioning of Technical and Transport Systems on the Basis of Methods of the System Theory of Information .....	178
<i>Oleksandr Livitskyi</i> Improving the Technical Service of Motor Vehicles in Terms of Agro-industrial Production .....	189

<i>Vasyl Klymenko, Mykola Bosiy, Viktor Aulin, Irina Filimonikhina, Serhii Lysenko, Andrii Hrynkiv</i> The energy Efficiency of Refueling Automobile Transport With Compressed Natural Gas When Using a Gas Hydrate Accumulator .....	198
---	-----

### **Transport technologies (by types)**

<i>Mykhailo Krystopchuk</i> Analysis of Indicators of Sustainable Development Urban Passenger Transport System.....	208
---	-----

<i>Alexander Rossolov, Sergii Lyfenko</i> Assessing the Scenarios for Sustainable Development of Transport Systems in the Cities With Car-oriented Mobility .....	221
---	-----

<i>Vktor Aulin, Dmytro Holub, Artem Zamurenko, Andriy Grinkiv, Sergiy Lisenko, Viktoria Dyachenko</i> Theoretical System-oriented Approach to Determining the Integrated Indicator of the Efficiency of Operations in Transport Systems .....	232
---	-----

<i>Viktor Aulin, Mykhailo Krystopchuk, Oleg Tson, Mykola Stashkiv, Mariia Babii, Yurii Bodoriak</i> The Global Crisis of Covid-19 and Its Impact on Population Mobility .....	247
--	-----

<i>Anatoliy Soltus, Maksym Rud</i> Prospects for the Application of the Global High-speed, Low Latency Broadband Satellite Internet in the Field of Road Transport .....	254
--	-----

<i>Olena Khachatryan, Serhiy Khachatryan</i> Evaluation of the Quality of Motor Transport Services.....	264
--	-----

**Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії.** Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело  
Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

**Анотація** українською (російською) мовами – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

**Анотація** англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

**Структура анотацій:**

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

**Структура основного тексту статті:**

1. **Постановка проблеми.**
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**
3. **Постановка завдання (мета статті).**
4. **Виклад основного матеріалу.**
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

**Схема організації матеріалу статті:**

1. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
6. Ідентично з 2-5 російською (українською) мовою.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури. \*
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Unicheck (<https://corp.unicheck.com>)

Адреса для надсилання: stat\_kntu@ukr.net, aulinvv@gmail.com

**ДОВІДКА ПРО АВТОРА**  
**українською, російською та англійською мовами**

	Українською	Російською	Англійською
<b>Прізвище, ім'я, по-батькові:</b>			
<b>Місце роботи (повна назва, без аббревіатур), місто, країна:</b>			
<b>Посада (повна назва, без аббревіатур):</b>			
<b>Наукова ступінь:</b>			
<b>Вчене звання:</b>			
<b>Назва статті:</b>			
<b>*Спеціальність:</b>			
<b>Адреса для надсилання збірнику:</b>			
<b>Контактні телефони (бажано мобільний):</b>			
<b>E-mail:</b>			
<b>ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)</b>			

\* – 122 Комп'ютерні науки; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 208 Агроінженерія

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.  
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

**В и п у с к 4(35)**

Відповідальний за випуск І.М. Березюк, О.М. Кузик

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»  
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.  
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25  
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 19.10.2020р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 35  
Тираж 300 прим. Зам. № 0594