

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



# **В І С Н И К**

**Східноукраїнського  
національного університету  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 5 (275)  
2022**

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

Київ 2022

# ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

**№ 5 (275) 2022**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВАНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет  
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

# VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST  
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

**№ 5 (275) 2022**

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National  
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

## Головна редакційна колегія:

*Поркуян О.В.*, докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови  
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови  
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Могила В.І., докт. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

## Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Лорія М.Г.

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 3 від 28 жовтня 2022 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2022

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2022

## З М І С Т

## Спеціальність 122

<b>Гоменюк С.І., Козуб В.Ю.</b> ПАРАЛЛЕЛЬНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ЗАДАЧІ ТЕРМОПРУЖНОСТІ.....	5
<b>Козуб Г.О., Козуб Ю.Г.</b> ДЕКЛАРАТИВНИЙ ПІДХІД ПРИ СТВОРЕННІ МУЛЬТИПЛАТФОРМНИХ ДОДАТКІВ.....	10
<b>Критська Я.О., Хмельницький Д.Б., Білобородова Т.О.</b> МЕТОДОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ШЛАМОНАКОПИЧУВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ НА ГЕОПРОСТОРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ.....	16
<b>Недзельський Д.О., Сафонова С.О., Барбарук Л.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІРТУАЛЬНОЇ БАГАТОПОТОЧНОСТІ (2, 3, 4 ПОТОКИ) ТИПУ HYPER THREADING ПРИ ВИКОНАННІ ПОТОКІВ В ОДНАКОВИХ ТА РІЗНИХ УМОВАХ .....	21

## Спеціальність 141

<b>Грицюк В.Ю., Невлюдов І.Ш., Цимбал О.М.</b> УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛА ЕКСТРУДЕРА МОБІЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ 3D-ДРУКУ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ СТРУКТУР .....	28
<b>Rudniev Y.S., Romanchenko J.A., Linevich A.</b> STUDY OF THE DYNAMICS OF THE MOVEMENT MECHANISM OF AN OVERHEAD CRANE AS A COMPLEX ELECTROMECHANICAL SYSTEM.....	35

## Спеціальність 151

<b>Карпюк Л. В., Давіденко Н. О., Ганжа С. А., Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед</b> МЕТОДИ ВИВЧЕННЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ДИСЦИПЛІН.....	40
<b>Карпюк Л. В., Давіденко Н. О. Лорія М. Г., Гурін О. М.</b> СКРИПТИ ПРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРОБКИ КРЕСЛЕНИКІВ В AUTOCAD.....	44
<b>Куліков Д.О., Купіна О.А., Лорія М.Г.Целіщев О.Б.</b> ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА АМІАКУ .....	49

## Спеціальність 273

<b>Mogyla V.I., Morneva M.O., Kovtanets M.V.</b> THE USE OF THE MULTIVARIATE ANTISKID SENSOR TO GAIN MAXIMUM TRAILED LOAD OF THE ROLLING STOCK .....	55
<b>Могила В.І., Ковтанець М.В., Морнева М.О., Ковтанець Т.М.</b> КОНЦЕПЦІЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСНОЇ РЕНОВАЦІЇ І РЕГЕНЕРАЦІЇ ГУМОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ, ОЛІЙ ТА КОМПОЗИТІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ З ОТРИМАННЯМ НОВИХ ЯКОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ.....	58
<b>Ковтанець М.В., Цигановський І.О., Сергієнко О.В., Ноженко В.С., Ковтанець Т.М.</b> ВИБІР МОДЕЛІ ЗЧЕПЛЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЛОКОМОТИВІВ .....	65

---



---

## CONTENTS

### Speciality 122

<b>Homeniuk S.I., Kozub V.Yu.</b> PARALLEL IMPLEMENTATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD FOR THE THERMOELASTICITY PROBLEM .....	5
<b>Kozub H.O., Kozub Yu.H.</b> DECLARATIVE METHOD FOR CREATING MULTIPLATFORM APPLICATIONS .....	10
<b>Krytska Y.O., Khmelnytskyi D.B., Biloborodova T.O.</b> MACHINE LEARNING-BASED SLUDGE IDENTIFICATION ON GEOSPATIAL IMAGES.....	16
<b>Nedzelskyi D.O., Safonova S.O., Barbaruk L.V.</b> RESEARCH EFFICIENCY VIRTUAL MULTITHREADING (2, 3, 4 THREADS) TYPE HYPER THREADING WHEN EXECUTION THREADS IN THE SAME AND DIFFERENT CONDITIONS.....	21

### Speciality 141

<b>Gritsyuk V.Yu., Nevliudov I.Sh., Tsybal O.M.</b> IMPROVING THE EXTRUDER UNIT DESIGN OF A MOBILE ROBOTIC PLATFORM FOR LARGE-SCALE STRUCTURES 3D PRINTING .....	28
<b>Rudniew Y.S., Romanchenko J.A., Linevich A.</b> STUDY OF THE DYNAMICS OF THE MOVEMENT MECHANISM OF AN OVERHEAD CRANE AS A COMPLEX ELECTROMECHANICAL SYSTEM .....	35

### Speciality 151

<b>Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Ganzha S. A., Gezevi Abdalhaleh Goma Ahmed</b> METHODS OF STUDYING HIGH-TECH DISCIPLINES .....	40
<b>Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Loria M. G., Gurin O. M.</b> SCRIPTS IN AUTOMATING THE DEVELOPMENT OF AUTOCAD DRAWINGS.....	44
<b>Kulikov D.O., Kupina O.A., Loria M.G., Tselishchev O.B.</b> USE OF A MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF AMMONIA PRODUCTION PROCESSES.....	49

### Speciality 273

<b>Mogyla V.I., Morneva M.O., Kovtanets M.V.</b> THE USE OF THE MULTIVARIATE ANTISKID SENSOR TO GAIN MAXIMUM TRAILED LOAD OF THE ROLLING STOCK.....	55
<b>Mogila V.I., Kovtanets M.V., Morneva M.O., Kovtanets T.M.</b> CONCEPT AND IMPLEMENTATION OF COMPLEX RENOVATION AND REGENERATION OF RUBBER ENGINEERING PRODUCTS, OILS AND COMPOSITES OF RAILWAY TRANSPORT WITH OBTAINING NEW QUALITY OF MATERIALS .....	58
<b>Kovtanets M.V., Tsyganovskiy I.O., Sergienko O.V. Nozhenko V.S., Kovtanets T.M.</b> CHOICE OF A COUPLING MODEL FOR SIMULATING THE DYNAMIC BEHAVIOR OF LOCOMOTIVES.....	65

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-9>

УДК 624.012.25: 539.386

## ПАРАЛЛЕЛЬНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ЗАДАЧІ ТЕРМОПРУЖНОСТІ

Гоменюк С.І., Козуб В.Ю.

### PARALLEL IMPLEMENTATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD FOR THE THERMOELASTICITY PROBLEM

Homeniuk S.I., Kozub V.Yu.

*У статті досліджуються проектні розрахунки конструкцій, що потребують всебічного аналізу процесів деформування під дією експлуатаційних навантажень. В реальних умовах експлуатації більшість елементів конструкцій знаходяться під дією механічних і теплових навантажень. Для аналізу процесів деформування необхідно вирішувати задачу термопружності. Для розв'язання таких задач зазвичай використовується метод скінченних елементів, точність якого залежить від кількості розрахункових вузлів. Одним з етапів розв'язування задач термопружності є формування матриць жорсткості та теплопровідності скінченних елементів. Для елементів одного типу використовуються обчислення за однаковою процедурою і кількість таких обчислень зумовлює час розв'язування задачі. У традиційному підході ці обчислення виконуються послідовно. У випадку великих розмірів сіток кількість та час розрахунків збільшуються, що потребує оптимізації обчислень з використанням алгоритмів паралельних обчислень. Паралелізація методу скінченних елементів потребує управління роботою достатньо великої кількості процесів, а також упорядкування обміну даними між процесами. Час виконання паралельних обчислень визначається найповільнішою підзадачею. При формуванні матриць жорсткості та теплопровідності виникає необхідність проводити інтегрування по області скінченного елемента. Використання моментної схеми скінченних елементів переміщення і деформації апроксимуються однаковими поліномами, що спрощує обчислення інтегралів. Ця процедура закінчується формуванням блоку матриці жорсткості, причому для сусідніх скінченних елементів цей блок є частково спільним. У системі із загальною пам'яттю обмін інформацією між процесорами відбувається за допомогою змінних, що зберігаються в загальній пам'яті. Розроблено алгоритми паралельного програмування для побудови матриць жорсткості скінченних елементів та розрахунку напружено-деформованого стану для пакету програм «МІРЕЛА+». Отримано розв'язки для розрахункових сіток різних розмірів. Досліджено вплив паралелізації на час розрахунку.*  
**Ключові слова:** метод скінченних елементів, матриця жорсткості, паралельні обчислення, OpenMP, напружено-деформований стан.

**Вступ.** При проектуванні конструкцій, що працюють в умовах теплового і механічного навантаження, виникає необхідність прогнозування фізико-механічних характеристик і показників якості у тривимірному аспекті.

Одним з найбільш ефективних чисельних методів проектних розрахунків є метод скінченних елементів. Характерною особливістю методу є безпосередній перехід від континуального об'єкту до дискретного шляхом апроксимації геометрії досліджуваного об'єкту і шуканих полів переміщень (напружень). У цьому випадку для складених або шаруватих конструкцій кожен елемент конструкції (або шар) з різними фізико-механічними характеристиками піддається дискретизації на просторові елементи. Отримана дискретна модель твердого тіла дозволяє ефективно проаналізувати поведінку твердого тіла в експлуатаційних умовах. На основі використання методу скінченних елементів отримано чисельні розв'язки задач термопружності для в'язкопружних тіл [1-3]. Тривимірну задачу термопружності неоднорідних в окружному напрямку тіл обертання на основі моментної схеми скінченних елементів [4, 5] розв'язано в роботах [5, 6].

Для підвищення точності рішення частіше за все використовують розрахункові сітки великого розміру, що негативно впливає на час розв'язування задачі. Особливо це стосується розв'язків нелінійних задач з використанням ітераційних процедур. Одним з підходів до оптимізації розрахунків є застосування паралельних обчислень, що дозволяє значною мірою підвищити продуктивність проектних досліджень.

Для методу скінченних елементів можна виділити три етапи розв'язування задачі: формування вхідних даних з нанесенням розрахункової сітки; формування матриць системи рівнянь і розв'язування системи рівнянь; процедура виведення результатів. При чому формування матриці жор-

ткості та розв'язування системи алгебраїчних рівнянь складає основні затрати часу. Прискорення виконання цих етапів дозволить зменшити затрати машинного часу. Одним з підходів до прискорення обчислень є використання паралельних алгоритмів [7].

Серед методів підвищення продуктивності паралелізації обчислень можна виділити методи, що базуються на використанні блочних алгоритмів прямих методів розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь з розрідженими симетричними матрицями [8, 9]; методи, спрямовані на дослідження ефективності декомпозиції розрахункової області [10]. За методами декомпозиції задача розділяється на декілька підзадач меншої розмірності, розв'язання яких можна виконати паралельно. Більшість публікацій присвячено різним підходам до розв'язування систем рівнянь, що формуються в методі скінченних елементів [11-15]. Проте дуже мало робіт присвячено паралелізації обчислень при формуванні матриць систем рівнянь методу скінченних елементів. Час, що витрачається на формування матриці жорсткості складає суттєву частину всього часу рішення. При розв'язуванні зв'язаних задач термодинаміки доводиться проводити однотипні операції для формування матриць жорсткості та теплопровідності. При рішенні нелінійних задач за модифікованим методом Ньютона-Канторовича на певних ітераціях доводиться також перераховувати матриці жорсткості з урахуванням геометрії деформованого тіла [5].

**Метою роботи** є розробка методики паралельних обчислень розрахункових матриць скінченних елементів для задач термодинаміки.

**Виклад основного матеріалу.** Формулювання задачі термодинаміки у варіаційній формі має вигляд

$$\iiint_V \delta F dv - \iiint_V \mathbf{P} \delta \mathbf{u} - \iint_S \mathbf{Q} \delta \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

де  $F$  – вільна енергія;  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{Q}$  – вектори об'ємних і поверхневих навантажень;  $\mathbf{u}$  – вектор переміщень. Для розв'язання задачі пружності необхідно знайти розв'язок задачі теплопровідності

$$\begin{aligned} & \iiint_V c_\varepsilon (T - T_0) \delta T dv + \iiint_V \beta^{ij} (T - T_0) \delta \varepsilon_{ij} dv = \\ & = \iiint_V \lambda^{ij} T_{,i} \delta T_{,j} dv + \iiint_V w_0 \delta T dv + \iint_S [q + h(T - \theta)] \delta T ds, \quad (2) \end{aligned}$$

де  $c_\varepsilon$  – теплоємність при постійній деформації;  $\beta^{ij}$  – компоненти тензору ізотермічних пружних постійних, які визначають взаємний вплив температурного поля і поля деформацій;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненти тензору деформацій;  $\lambda^{ij}$  – компоненти тензору теплопровідності;  $w_0$  – густина внутрішніх джерел теплоутворення;  $q$  – тепловий потік;  $h$  – коефіцієнт теплообміну;  $\theta$  – температура навколишнього середовища.

Рівняння (1), (2) фактично є зв'язаною задачею термодинаміки за наявності впливу температури тіла на фізико-механічні параметри, що притаманно більшості полімерних та композиційних матеріалів.

Розглянемо побудову матриць жорсткості та теплопровідності скінченного елемента з апроксимацією переміщень на основі моментної схеми скінченних елементів.

Введемо до розгляду глобальну декартову систему координат  $z_i$ . Для описання властивостей скінченного елемента розглянемо місцеву систему координат  $x_i$ , в якій координати точок скінченного елемента лежать межах від -1 до +1. Переміщення та температуру тіла довільних точок скінченного елемента апроксимуємо у вигляді розкладання по степеневим функціям [5]:

$$\begin{aligned} u_k &= \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \sum_{r=1}^L \omega_k^{(pqr)} \psi^{(pqr)}, \\ T &= \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \sum_{r=1}^L \gamma^{(pqr)} \psi^{(pqr)}, \quad (3) \end{aligned}$$

де  $\omega_k$ ,  $\gamma$  – коефіцієнти розкладання,  $\psi^{(pqr)}$  – набір степеневих функцій виду:

$$\psi^{(pqr)} = \left( x_1^p x_2^q x_3^r \right) / (p! q! r!),$$

де  $(p=0,1,2,3; q=0,1,2,3; r=0,1,2,3)$  – степені апроксимації за відповідними напрямками координат.

Для обраного типу скінченного елемента встановлюється відповідний зв'язок між вузловими значеннями функції та коефіцієнтами розкладання (3). Використання базових степеневих функцій дозволяє апроксимувати переміщення та деформації у вигляді розкладання аналогічно (3) [5].

$$\varepsilon_{ij} = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \sum_{r=1}^L e_{ij}^{(pqr)} \psi^{(pqr)}. \quad (4)$$

Серед коефіцієнтів розкладання компонентів тензору деформацій в ряд Маклорена утримуються лише ті, що відповідають апроксимації переміщень.

Використання співвідношень моментної схеми скінченних елементів дозволяє уникнути ефектів «хибного зсуву».

Для формування матриці жорсткості скінченного елемента використовуються співвідношення варіації енергії пружної деформації у вигляді:

$$\delta W = \int_V \sigma^{ij} \delta \varepsilon_{ij} dv. \quad (4)$$

Компоненти тензора пружних напружень приймаємо у вигляді закону Гука:

$$\sigma^{ij} = 2\mu g^{ik} g^{jl} \varepsilon_{kl} + \lambda \theta g^{ij}, \quad (5)$$

де  $\mu, \lambda$  - коефіцієнти Ляме;  $g^{ij}$  - компоненти метричного тензора;  $\theta$  - функція зміни об'єму.

Функцію змінення об'єму також можна представити у вигляді розкладання по степеневим функціям

$$\theta = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N \sum_{r=1}^L \xi^{(pqr)} \psi^{(pqr)}.$$

Тоді варіація енергії пружної деформації має вигляд

$$\delta W = \{\delta u\}^T [G + G_\theta] \{u\}, \tag{6}$$

$$\text{де } G = \iiint_V [A] \{\psi\} 2\mu g^{ik} g^{jl} \{\psi\}^T [A]^T dv, \tag{7}$$

$$G_\theta = \iiint_V [B] \{\psi\} \lambda g^{ij} \{\psi\}^T [B]^T dv. \tag{8}$$

Матриці  $A$  і  $B$  обчислюються для вузлів інтегрування. За аналогічною схемою будується матриця теплопровідності. Варіаційне рівняння для стаціонарної теплопровідності має вигляд

$$\delta W_T = \int_V \left( w_o \delta T + \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_i} \frac{\partial \delta T}{\partial x_j} \right) dv + \int_{S_1} q \delta T ds + \int_{S_2} h(T - \theta) \delta T ds = 0, \tag{9}$$

Враховуючи апроксимацію температури по об'єму скінченного елемента рівняння (9) має вигляд

$$\delta W_T = \{\delta T\}^T [H] \{T\} + \{\delta T\}^T [R^{(s_2)}] \{T\} + \{\delta T\}^T \{P\} + \{\delta T\}^T \{S\} = 0, \tag{10}$$

$$\text{де } H = \iiint_V [C] \{\psi_i T\} \lambda_{ij} \{\psi_j\}^T [C]^T \sqrt{g} dv. \tag{11}$$

Обчислення інтегралів що входять в рівняння (7), (8), (11) можна виконати за однаковою схемою.

**Результати досліджень.** Для паралельного обчислення використано бібліотеку OpenMP оскільки при побудові матриць спільно використовуються масиви даних.

OpenMP — це модель програмування спільної пам'яті, яка підтримує мультиплатформене багатопроцесорне програмування спільної пам'яті на мовах програмування C, C++ і Fortran, доступна для широкого спектру архітектур процесорів і операційних систем. Бібліотека OpenMP складається з набору директив компілятора, підпрограм бібліотеки та змінних середовища, які впливають на поведінку під час виконання.

Програмування в OpenMP полягає у використанні так званих паралельних конструкцій (директив компілятора), які вставляються у вихідний код, інструкуючи компілятор генерувати певний код. OpenMP визначає різні конструкції, що дозволяють розпаралелювати послідовний код і синхронізувати окремі потоки.

Щоб зменшити деталізацію проблеми та зменшити накладні витрати, пов'язані зі створенням і завершенням потоку, зазвичай розпаралелюють крайні цикли в алгоритмі, що в нашому конкретному випадку відповідає розпаралелюванню циклу над елементами в операції збирання. На рис. 1 представлено блок-схему паралельного алгоритму OpenMP.

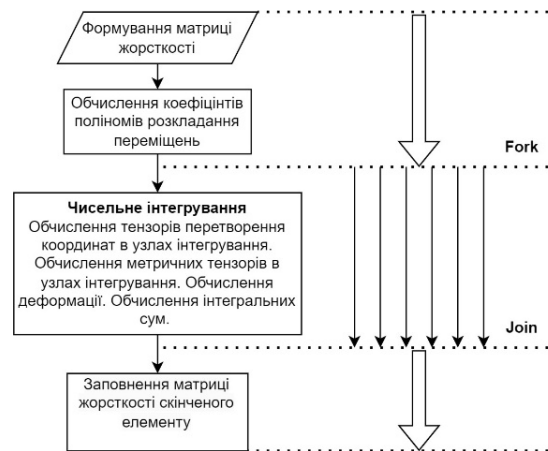


Рис. 1. Блок-схема паралельного алгоритму чисельного Інтегрування

На основі розробленого підходу проведено розрахунок шини під внутрішнім тиском 600кПа. Радіальне навантаження 80кПа. Швидкість кочення складає 50км/год. Обраховані поля переміщень, напружень та температури дисипативного розігріву [7]. На рис.2 представлено порівняння часу обрахунку з використанням запропонованого підходу до обчислення матриць жорсткості і теплопровідності та з використанням традиційного підходу.

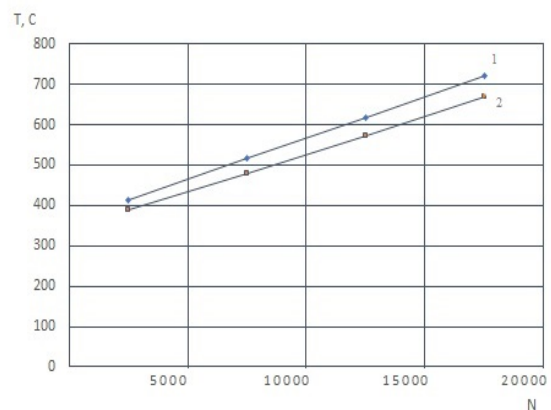


Рис. 2. Час розв'язку для різної кількості вузлів:  
1 – традиційна схема;  
2 – схема з паралельними обчисленнями.

Для розрахунку використано обчислювальний комплекс «MIRELA+» із застосуванням паралельних обчислень матриць скінченного елементу. Тестування виконувалось на пристрої з Intel i7-9750H (6 ядер та 12 потоків) та 16 ГБ RAM.

**Висновки.** Розроблена методика формування матриць жорсткості та теплопровідності на основі використання паралельних обчислень інтегральних квадратурних складників дозволяє прискорити процес розв'язування задач механіки конструкцій. Скорочення часу розв'язання складає 7%. Використання бібліотеки OpenMP в пакеті прикладних програм «MIRELA+» підвищує ефективність розрахунків.

### Література

- Карнаухов В. Г., Киричок И. Ф., Козлов В. И. Термомеханика неупругих тонкостенных элементов конструкций с пьезоэлектрическими сенсорами и актуаторами при гармоническом нагружении. *Прикладная механика*. 2017. Т. 53, № 1. С. 9 – 74.
- Киричок И. Ф. Радиальные колебания и виброразогрев вязкоупругих оболочечных элементов и их демпфирование пьезоэлектрическими сенсором и актуатором. *Прикладная механика*. 2016. 52, №4. С. 30 – 36.
- Моделювання нелінійного деформування ортотропних циліндричних оболонок з отвором при врахуванні ексцентриситету його підкріплення / І. С. Чернишенко та ін. *Доповіді Національної академії наук України*. 2016. №1. С. 35 – 39.
- Bazhenov V.A., Kozub Yu.G., Solodei I.I. Thermoelasticity of elastomeric constructions with initial stresses. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2020. Issue 104. Pp. 299 – 308.
- Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «MIRELA+» / В. Киричевский та ін.; ред. В. Киричевский. Київ: Наук. думка, 2005. 402с.
- Kozub Y.G. The durability of construction elements manufactured from low-compressibility elastomers. *International Polymer Science and Technology*. 2014. Vol. 41, No. 7. Pp. T/21 – T/25.
- Жданов А.И., Богданова Е.Ю. Об одной вычислительной реализации блочного метода Гаусса-Зейделя. *Вестн. Сам. гос. тех. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. 2016. Т.20, №4. С. 730 – 738.
- Попов А.В. Параллельные алгоритмы решения линейных систем с разреженными симметричными матрицами. *Проблемы програмування*. 2008. № 2-3. С. 111 – 118.
- Jarzebski P., Wisniewski K., Taylor R. L. On parallelization of the loop over elements in FEAP. *Computational Mechanics*, 2015. 56. Pp.77–86.
- Ju S.H., Hsu H.H. An Out-of-Core Eigen-Solver with OpenMP Parallel Scheme for Large Sparse Damped System. *Int. J. Computational Methods*. 2019. Vol. 16. No. 7. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219876219500385>.
- Bošanský M., Patzák B. Parallelization of assembly operation in finite element method. *Acta Polytechnica*. 2020. 60(1). Pp.25–37.
- Wozniak M., Bukowska A. Comparison of multi-frontal and alternating direction parallel hybrid memory igrm direct solver for non-stationary simulations *Computer Science*. 2020. 21(4). Pp. 419-439
- Yamaguchi T., Kawase Y., Nagase A., Ishimura S. Performance Evaluation of 3-D Hybrid Parallel Finite Element Method by MPI/OpenMP *J. Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2019. Vol.27. No.1. Pp.85-90.
- Amorim L., Goveia T., Mesquita R., Baratta I. GPU Finite Element Method Computation Strategy Without Mesh Coloring *J. Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2020. Vol. 19. No.2. Pp. 252-264.
- Atallah A.M., Younes A.B. Parallel Evaluation of Chebyshev Approximations :Applications in Astrodynamics *J. Astro-nautical Science*. 2022. Vol. 69. Pp. 692–717.

### References

- Karnauchov V. H., Kyrychok Y. F., Kozlov V. Y. (2017) Termomekhanika neupruhykh tonkostennykh elementov kons-truktsyi s pezoelektrychskymy sensoramy y aktuatoramy pry harmonycheskom nahruzheny [Thermomechanics of inelastic thin-walled structural elements with piezoelectric sensors and actuators under harmonic loading] *Prykladnaia mekhanika*, 1, 9 – 74. [in Russian].
- Kyrychok Y. F. (2016) Radyalnye kolebaniya y vibrorazohrev viazkoupruhykh obolochechnykh elementov y ykh demp-fyrovanye pezoelektrychskymy sensorom y aktuatorom [Radial oscillations and vibro-heating of viscoelastic shell elements and their damping by piezoelectric sensor and actuator] *Prykladnaia mekhanika*, 4, 30 – 36. [in Russian].
- Chernyshenko I.S., Komarchuk S.M. Maksymiuk V.A. and Storozhuk E.A. (2016) Modeliuvannia neliniinoho deformuvannia orto-tropnykh tsylindrychnykh obolonok z otvorum pry vrakhuvanni ekstsentsrystetu yoho pidkriplennia [Modeling of nonlinear deformation of orthotropic cylindrical shells with a hole, taking into account the eccentricity of its reinforcement] *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, 1, 35 – 39. [in Ukrainian].
- Bazhenov V.A., Kozub Yu.G., Solodei I.I. (2020) Thermoelasticity of elastomeric constructions with initial stresses. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 104. 299-308.
- Kirichevskii V.V., Dokhniak B.M., Kozub Yu.H., Homeiniuk S.I., Kirichevskii R.V., Grebeniuk S.N. (2005) *Metod konechnykh elementov v vychyslytelnom komplekse «MIRELA+»* [Finite element method in the computer complex "MIRELA +"] Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
- Kozub Y.G. (2014) The durability of construction elements manufactured from low-compressibility elastomers. *International Polymer Science and Technology*, 7, 21 – 25. [in English].
- Zhdanov A.Y., Bohdanova E.Iu. (2016) Ob odnoi vychyslytelnoi realizatsyi blochnoho metoda Haussa-Zeidelia [On one computational implementation of the block Gauss-Seidel method] *Vestnik. Samarskogo. gos. tekhn. un-ta. Ser. Fyz.-mat. Nauky*, Vol.20, 4, 730-738.[in Russian].
- Popov A.V. (2008) Parallelnye alhorytmy resheniya lyneinykh sistem s razrezhennymi symmetrychnymi matry-tsamy [Parallel algorithms for solving linear systems with sparse symmetric matrices] *Problemy prohramuvannia*, 2-3, 111-118. [in Russian].
- P. Jarzebski, K. Wisniewski and R. L. Taylor. (2015) On parallelization of the loop over elements in FEAP. *Computational Mechanics*. 56, 77–86.

10. S. H. Ju and H. H. Hsu (2019) An Out-of-Core Eigen-Solver with OpenMP Parallel Scheme for Large Sparse Damped System. *Int. J. Computational Methods*, Vol. 16, 7. URL: <https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219876219500385>.
11. Michal Bozhanskii and Borek Patziak (2020) Parallelization of assembly operation in finite element method. *Acta Polytechnica*, 60(1), 25–37.
12. Maciej Wozniak, Anna Bukowska (2020) Comparison of multi-frontal and alternating direction parallel hybrid memory igmr direct solver for non-stationary simulations *Computer Science*, 21(4), 419–439.
13. Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Atsuyoshi Nagase and Shota Ishimura (2019) Performance Evaluation of 3-D Hybrid Parallel Finite Element Method by MPI/OpenMP *J. Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 1, 85–90.
14. Lucas Amorim, Thiago Goveia, Renato Mesquita and Igor Baratta (2020) GPU Finite Element Method Computation Strategy Without Mesh Coloring *J. Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 19, 2, 252–264.
15. Ahmed M. Atallah and Ahmad Bani Younes (2022) Parallel Evaluation of Chebyshev Approximations: Applications in Astrodynamics *J. Astro-nautical Science*, 69, 692–717.

**Homeniuk S.I., Kozub V.Yu. Parallel implementation of the finite element method for the thermoelasticity problem**

*The article examines design calculations of constructions that require a comprehensive analysis of deformation processes under the action of operational loads. In real operating conditions, most structural elements are under the influence of mechanical and thermal loads. To analyze deformation processes, it is necessary to solve the problem of thermoelasticity. To solve such problems, the finite element method is usually used, the accuracy of which depends on the number of calculation nodes. One of the stages of solving problems of thermal elasticity is the formation of matrices of stiffness and thermal conductivity of finite*

*elements. Moreover, for elements of the same type, calculations according to the same procedure are used, and the number of such calculations determines the time of solving the problem. In the traditional approach, these calculations are performed sequentially. In the case of large grid sizes, the number and time of calculations increase, which requires optimization of calculations using parallel calculation algorithms. The parallelization of the finite element method requires the management of the work of a sufficiently large number of processes, as well as the arrangement of data exchange between processes. The execution time of parallel calculations is determined by the slowest subtask. When forming the stiffness and thermal conductivity matrices, it is necessary to perform integration over the area of the finite element. Using the moment scheme of finite elements, displacement and deformation are approximated by the same polynomials, which simplifies the calculation of integrals. This procedure ends with the formation of a stiffness matrix block, and this block is partially shared by neighboring finite elements. In a shared memory system, information is exchanged between processors using variables stored in shared memory. Parallel programming algorithms have been developed for constructing stiffness matrices of finite elements and calculating the stress-strain state for the "MIRELA+" program package. Solutions for calculation grids of different sizes were obtained. The effect of parallelization on the calculation time was studied.*

**Keywords:** *finite element method, stiffness matrix, parallel computing, OpenMP, stress-strain state.*

**Гоменюк Сергій Іванович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету, (м. Запоріжжя), [mf@znu.edu.ua](mailto:mf@znu.edu.ua).

**Козуб Владислав Юрійович** – асистент кафедри фізико-технічних систем та інформатики Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, (м. Полтава), [v.y.kozub@gmail.com](mailto:v.y.kozub@gmail.com).

Стаття подана 15.10.2022.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-10-15>

УДК 004.41:004.9

## ДЕКЛАРАТИВНИЙ ПІДХІД ПРИ СТВОРЕННІ МУЛЬТИПЛАТФОРМНИХ ДОДАТКІВ

Козуб Г.О., Козуб Ю.Г.

## DECLARATIVE METHOD FOR CREATING MULTIPLATFORM APPLICATIONS

Kozub H.O., Kozub Yu.H.

У роботі надано аналіз сучасних аналогів розробки крос-платформних та мультиплатформних додатків, досліджено інструменти розробки Kotlin Multiplatform та Jetpack Compose. Описано бізнес-логіку та методику створення інтерфейсу користувача під декілька платформ, що сприяє зменшенню вартості продукту та прискорення його розробки. Представлено методику розробки мультиплатформного додатку для операційних систем Android, Windows, Linux та macOS, який дозволяє створювати фонові хвилі у звуковому форматі. Досліджено принципи декларативного програмування та фреймворки для мультиплатформної розробки. Для програмної реалізації окремих нативних додатків, обрано нативні рішення. Такому рішенню сприяє використання фреймворків Kotlin Multiplatform, що дозволяє створювати універсальний код логіки додатку, у поєднанні з UI фреймворком Compose Multiplatform. Їх застосування дає можливість написання єдиного коду логіки та інтерфейсу додатку для декількох платформ одночасно, що допомагає економити час і уникати значної кількості помилок. Запропоновано методику розробки архітектури компонентів Android-додатку. Модульна структура архітектури проекту поділена на дві частини: на *common* модуль, який містить у собі основну логіку додатку, а також платформні реалізації компонентів, та платформні модулі, що виконують ініціалізацію та запуск додатку на певній платформі. Описано контракт бізнес-логіки компонентів, що реалізується у інтерфейсах *Store*. Показано формування формату мелодії додатку з трьох класів: *Song*, *Track* та *Chord*. Для відтворення звуків створено спеціальну утиліту. Вона виконує завантаження звуків з ресурсів додатку та відтворює з наданням необхідного музичного тону. Звуки зберігаються в ресурсах спільного модуля у вигляді MP3 файлів. Для налагодження доступу до репозиторіїв з компонентів бізнес-логіки додатку, використовується впровадження залежностей. Логіка впровадження залежностей описується у файлах-модулях *Coil*. Запропоновано методику, що узагальнює методологію розробки мультиплатформних додатків на мові програмування Kotlin та використання декларативного підходу для розробки інтерфейсів користувача під декілька платформ.

**Ключові слова:** MVIKotlin, Decompose, Android, Kotlin, Store, Common, Jetpack Compose, Kotlin Multiplatform.

**Вступ.** В світі щорічно з'являється мільйони стартапів, користувачі стають все вимогливішими і час виведення програмного продукту на ринок стає набагато важливіше вартості, тому розробники обирають нативні рішення. Однак програмна реалізація окремих мобільних додатків під декілька платформ сприяє збільшенню витрат на їх підтримку. Серед розробників мобільних додатків, спостерігається тенденція вміння швидко вносити зміни у додаток на потребу ринку. Внаслідок чого виникає необхідність визначення ефективних підходів до розробки конкурентних мобільних мультиплатформних додатків.

На швидкість розробки, впровадження нових функціональностей, якість та зручності використання програмного додатку впливає застосування крос-платформних інструментів. Найвідомішими крос-платформними інструментами є: Xamarin, React Native, Flutter.

Xamarin – платформа від Microsoft для створення додатків під Android, iOS, Windows, Linux, macOS, watchOS та tvOS. Xamarin включає єдину загальну кодову базу C# і надає можливість тестувати додатки на декількох пристроях з використанням Xamarin Cloud. Xamarin має два основних інструменти: Xamarin.Android, Xamarin.iOS і Xamarin.Forms. По частині кросплатформної розробки Xamarin пропонує використовувати єдиний API Xamarin.Essentials. Xamarin.Android і Xamarin.iOS наділяють додаток тими ж можливостями і інтерфейсом, які є у нативних рішень. У випадку Xamarin.iOS програма компілюється безпосередньо в машинний код (АОТ-компіляція), тоді як в Xamarin.Android спочатку відбувається компіляція в байт-код, який потім інтерпретується віртуальною машиною (JIT-компіляція). Для прискорення процесу написання коду, краще використовувати Xamarin.Forms, в якому майже всі елементи повністю сумісні з будь-якими платформами [1].

React Native розроблений компанією Facebook, дозволяє писати додатки для iOS, Android, Windows, Web, Windows Phone, VR, Android TV, macOS, tvOS на мові JavaScript. Середовище поставляється з ве-

ликим набором готових компонентів, однак вони не завжди адаптуються під різні платформи, що вимагає додаткових коригувань в коді. В гонитві за продуктивністю розробники віддають перевагу саме цьому фреймворку. Native дозволяє використовувати кастомні модулі на мовах для нативної розробки, але їх необхідно писати окремо для кожної платформи [2].

Безкоштовний кросплатформний фреймворк Flutter від Google з відкритим вихідним кодом для швидкої розробки додатків під Android, iOS, Windows, Linux, macOS, Web та Google Fuchsia, використовує об'єктно-орієнтовану мову програмування DartFlutter використовує один і той же код для всіх платформ, перевершує конкурентів і демонструє найвищу продуктивність завдяки власному движку рендерингу і сучасній мові Dart, яка була розроблена Google. Flutter включає сторонні SDK, API для 2D, анімації, власні віджети Material Design і надає можливість повторно використовувати існуючий код Java, Swift та Objective-C [3].

Перевагами кросплатформної розробки є висока швидкість та низька вартість розробки. До недоліків відносяться: відносно низька продуктивність, у порівнянні з нативними додатками; займає більше місця у пам'яті; складна підтримка низкорівневих платформних функцій; нові платформні можливості з'являються пізніше ніж у нативних додатках;

Щоб вирішити ці недоліки, використовується декларативний підхід програмування з використанням фреймворків Kotlin Multiplatform та Jetpack Compose.

**Мета роботи** – дослідження підходів декларативного програмування при створенні мультиплатформних додатків під декілька платформ, з використанням сучасних інструментів та методів.

**Викладення основних матеріалів.** Для створення мульти-платформних додатків використовується мова програмування Kotlin та середовища розробки IntelliJ IDEA або Android Studio, за технологією, яка дозволяє використовувати один раз написаний код на безлічі платформ одночасно є фреймворк Kotlin Multiplatform, де система збірки Gradle підтримує синтаксис groovy і kotlin script (kts).

У Kotlin Multiplatform є поняття targets – цільові платформи. На рис. 1 показано, як у даних блоках налаштовуються необхідні нам операційні системи, в нативний код, де і компілюється код на Kotlin [4].

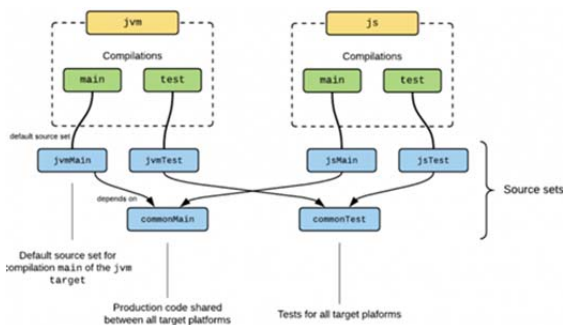


Рис. 1. Реалізація jvm та js таргетів [5]

Відповідна структура коду має вигляд:

```
kotlin{
    Jvm()
    Js()
    source Sets {
        val commonMain by getting {}
        val commonTest by getting {}
        val jsMain by getting {}
        val js Test by getting {}
    }
}
```

Аналогічним чином реалізується підтримка інших платформ.

Source sets – це вихідні коди для платформ. Є загальний набір вихідних кодів і платформні (їх стільки, скільки в проєкті таргетів, за цим стежить IDE). Для реалізації цієї особливості використовується механізм expect-actual (рис. 2).



Рис. 2. Механізм expect-actual [5]

Expect-actual дозволяє із загального модуля звертатися до платформозалежного коду. Можна оголосити expect декларацію в Common модулі і реалізувати її в платформних модулях. Структура мульти-платформних проєктів складається зі спільного модуля та модулів платформ (рис. 3).

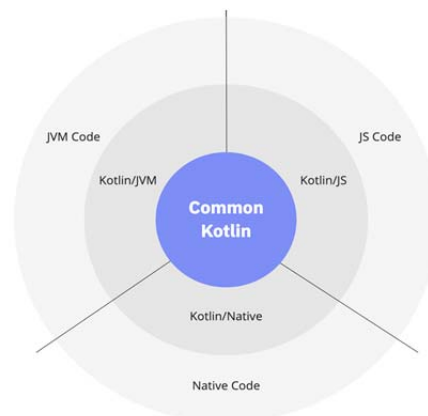


Рис. 3. Структура Kotlin Multiplatform

На цій схемі кожен шар (платформа) має позначення:

– Common Kotlin - спільний код для всіх платформ. Він включає в себе основну логіку додатку, спільні бібліотеки та інструменти. За допомогою мультиплатформних бібліотек Kotlin можна повторно використовувати мульти-платформну логіку в загальному і специфічному для платформи коді. Зага-

льний код може покладатися на набір бібліотек, які охоплюють повсякденні завдання, такі як HTTP-запити, серіалізація та управління співпрограмами;

- Kotlin/JVM, Kotlin/JS, Kotlin/Native – для взаємодії з платформами використовуються версії Kotlin. Вони мають розширення мови Kotlin, а також бібліотеки та інструменти для конкретних платформ (JVM, JS і Native).

За допомогою Kotlin Multiplatform витрачається менше часу на написання та підтримку одного й того ж коду для різних платформ і використовується механізм спільного коду [5].

Незважаючи на те, що фреймворк знаходиться на стадії розробки і не вистачає готових рішень, він має свої суттєві переваги:

- єдиний код, який можна в будь-який час дописувати і змінювати;
- час на додавання нового функціоналу для декількох платформ скоротився на 30-50%;
- поділ бізнес-логіки між платформами зі збереженням власного коду для кожного клієнтського інтерфейсу;
- помилки в разі виникнення з'являються відразу на всіх платформах, що полегшує їх знаходження;
- будь-які зміни та коригування відбуваються одночасно на всіх платформах.

Декларативний підхід передбачає надання специфічної для предметної області мови (domain-specific language, DSL) для вираження того, що хоче користувач, і захисту її від низькорівневих конструкцій (циклів, умовних позначень, призначень), які матеріалізують бажаний кінцевий стан. Декларативне програмування можна додатково розділити на програмування обмежень, логічне програмування та програмування логіки обмежень [6].

Одним з прикладів використання декларативного програмування та DSL є UI фреймворк Jetpack Compose. Це фреймворк для створення інтерфейсу користувача для Android-додатків, має адаптації під Desktop (Windows, Linux, macOS) та Web. Він спрощує і прискорює розробку UI, зменшує необхідну кількість коду для вирішення задач та має потужні інструменти і інтуїтивно зрозумілі API-інтерфейси Kotlin [7].

При написанні коду програмного забезпечення для якого потрібна постійна підтримка, необхідно мінімізувати зв'язаність і максимізувати його цілісність. Це добре відомий принцип розробки програмного забезпечення Separation of concerns, і полягає в тому, щоб згрупувати якомога більше зв'язаного коду разом, щоб код можна було легко підтримувати та масштабувати, коли додаток зростає. Jetpack Compose заснований на функціональному підході до програмування. Для опису інтерфейсу користувача використовуються Composable функції:

```
@Composable
fun App(appData: AppData) {
    val derivedData = compute(appData)
    Header()
}
```

```
if (appData.isOwner) {
    EditButton()
}
Body {
    for (item in derivedData.items) {
        Item(item)
    }
}
```

Це означає, що при виклику інших Composable функцій, вони відображають структуру UI. Для використання надаються всі примітиви Kotlin, включаючи оператори if і цикли for для управління структурою UI, щоб вирішувати більш складну логіку інтерфейсу користувача.

Однією з особливостей Jetpack Compose є інкапсуляція стану в Composable функціях. Стан в додатку – це будь-яке значення, яке може змінюватися з плином часу. Composable функція може мати інкапсульований в неї стан, який зберігається між її викликами. Це прагматичне рішення, яке спрощує його сигнатуру та дозволяє виконувати деякі оптимізації, що особливо зручно для анімацій та інших речей, які не потрібно змінювати або спостерігати зовні [7]. Переваги Jetpack Compose: незалежність від конкретних версій цільової платформи; вся робота з UI виконується за допомогою мови програмування Kotlin; використання композиції замість спадкування. UI-компонент описується у вигляді функції з анотацією Composable, яка відповідає тільки за обмежений функціонал, тобто без зайвої логіки; одна-направленість потоку даних; зменшення кількості коду для UI-логіки.

**Результати досліджень.** Для розробки додатків використано мову програмування Kotlin, це статично типізована мова програмування, що компілюється в JavaScript та працює поверх JVM [8]. Для опису логіки інтерфейсу користувача при використанні Jetpack Compose найкраще підходить патерн MVI [9]. У MVI взаємодія з інтерфейсом користувача обробляється бізнес-логікою, що вносить зміни в стан, який впливає на відображення інтерфейсу користувача. Це призводить до односпрямованого і циклічного потоку даних. Для реалізації реактивного отримання оновлених даних, використовуються засоби Kotlin, такі як Flow, StateFlow та Channel [10].

Спосіб написання спільного коду з використанням шаблону MVI для Kotlin Multiplatform надає фреймворк MVIKotlin. Він також включає в себе потужні інструменти налагодження, такі як логування та “time travel”.

MVIKotlin не приносить і не застосовує жодної конкретної архітектури. Його відповідальність описується наступним чином: надає єдине джерело істини для стану; забезпечує абстракцію для UI з ефективними оновленнями; забезпечує прив'язку до життєвого циклу між входами та виходами.

Основою MVIKotlin є Store, що представляє собою модель від MVI, яка містить бізнес-логіку (рис.4).

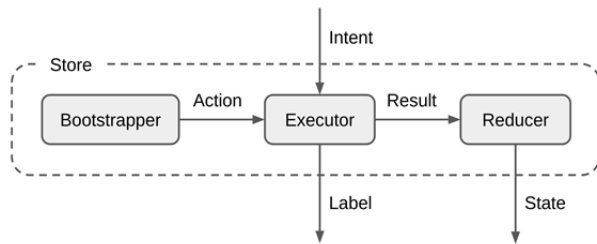


Рис. 4. Діаграма Store [11]

Store має такі компоненти: Intent – вхідна подія, яка приходить з UI; Label – одноразова вихідна подія, яка повертається до UI; State – стан, який відображається на UI; Bootstrapper – компонент, який виконує ініціалізацію Store, та при необхідності відправляє події до Executor; Action – події, які відправляє Bootstrapper до Executor; Executor – виконавець бізнес-логіки та усіх асинхронних операцій. Під час виконання або після завершення операцій, Executor може відправити Label до UI та Result до Reducer; Result – результат виконання операції, який передається до Reducer; Reducer – компонент, який приймає Result та змінює State [11].

Наступний код демонструє опис контракту бізнес-логіки компонентів реалізованого у інтерфейсах Store з розробленого програмного застосування “Composer” [12]:

```
interface TestStore : Store<Intent, State, Nothing> {
    //Опис подій
    sealed class Intent {
        data class TabChanged(val newTab: Tab) : Intent()
    }
    //Опис стану
    data class State(
        val selectedTab: Tab = Tab.AllMusic
    )
    //Допоміжні сутності стану
    enum class Tab {
        AllMusic, AllPlaylists, AllSamples
    }
}
```

Реалізація контрактів Store виконується у класах StoreProvider.

Для роботи з мульти-платформними модулями, проведено налаштування системи збору проєктів Gradle та виконано у файлах: build.gradle.kts модуля common; build.gradle.kts модуля android; build.gradle.kts модуля desktop.

Архітектура проєкту поділена на дві частини: Common модуль містить у собі основну логіку додатку, а також платформні реалізації компонентів; платформні модулі - виконують ініціалізацію та запуск додатку на певній платформі (рис. 5).

Модуль спільної логіки Common складається з 5 частин:

- core пакет - містить класи типів даних додатку;
- data пакет - реалізує роботу з базою даних та надає класи-репозиторії для доступу до даних з feature пакету;

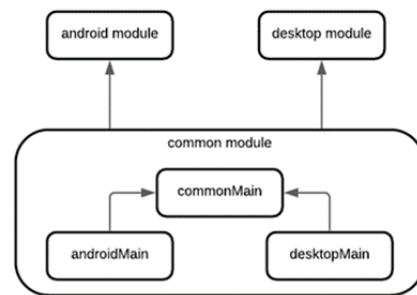


Рис. 5. Модульна структура додатку

- feature пакет - містить компоненти-екрани додатку з бізнес-логікою та UI частиною, а також описує навігацію між компонентами;

- di пакет - виконує налаштування dependency injection у додатку;

- база даних SQL Delight.

Платформні модулі виконують ініціалізацію головного компонента додатку зі спільного модуля, вмикають DI та запускають додаток.

Ініціалізація додатку виглядає наступним чином:

- Вмикається dependency injection у класі App:

- Створюється головний компонент та використовується при створенні головного вікна додатку.

Формат мелодії додатку складається з трьох класів: Song, Track та Chord.

Клас Song містить у собі ідентифікатор, назву, ім'я композитора, назву альбому, ім'я переписувача, довжину мелодії у мілісекундах, час створення та редагування та список треків.

Клас Track описує сутність треку. Він має ідентифікатор, інструмент, тон мелодії, BPM, гучність та список акордів.

Клас Chord описує сутність акорду та містить час на звуковій доріжці у мілісекундах та список ідентифікаторів нот.

Для відтворення звуків створено спеціальну утиліту. Вона виконує завантаження звуків з ресурсів додатку та відтворює з наданням необхідного музичного тону. Звуки зберігаються в ресурсах спільного модуля у вигляді MP3 файлів.

Контракт утиліти описано у інтерфейсі SoundMachine:

```
interface SoundMachine {
    suspend fun loadSounds(soundsPaths: List<String>):
    List<Sound>
    suspend fun playSound(sound: Sound, pitch: Double = 1.0)
}
```

Для налагодження доступу до репозиторіїв з компонентів бізнес-логіки додатку, використовується впровадження залежностей Dependency Injection. Логіка впровадження залежностей описується у файлах-модулях Koin. DatabaseModule містить модулі розробленого об'єкту бази даних для кожної платформи окремо: Common модулі;

PreferencesModule; RepositoryModule; SoundMashineModule. Всі модулі впровадження залежностей ініціюються у функції `initKoin`.

**Висновки.** В роботі розглянуто принципи декларативного підходу для розробки інтерфейсів користувача під декілька платформ. Проведено дослідження та впровадження сучасних інструментів та методик розробки мультиплатформних додатків: Compose Multiplatform, Jetpack Compose, MVIKotlin, Dependency Injection. За запропонованою методикою, що узагальнює методологію розробки мультиплатформних додатків на мові програмування Kotlin, спроектовано структуру додатку та створено архітектурний патерн MVI, який найкраще підходить під декларативний стиль мультиплатформного фреймворку Compose Multiplatform. Розроблено проєкт “Compose”, що дозволяє створювати музичні мелодії у новому форматі, а також проводити з ними різні маніпуляції.

### Л і т е р а т у р а

1. Xamarin documentation. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/xamarin/> (дата звернення: 25.12.2022).
2. React Native. URL: <https://reactnative.dev/> (дата звернення: 25.12.2022).
3. Flutter. URL: <https://flutter.dev/> (дата звернення: 25.12.2021).
4. Как Kotlin Multiplatform помогает сократить время разработки приложений. URL: <https://habr.com/ua/post/525888/> (дата звернення: 25.12.2022).
5. Почему мы выбрали Kotlin одним из целевых языков компании. Часть 2: Kotlin Multiplatform. URL: <https://habr.com/ru/company/domclick/blog/499820/> (дата звернення: 25.12.2022).
6. Declarative Programming: Is It A Real Thing?. URL: <https://www.toptal.com/software/declarative-programming> (дата звернення: 25.12.2022).
7. Understanding Jetpack Compose – part 1 of 2. URL: <https://medium.com/androiddevelopers/understanding-jetpack-compose-part-1-of-2-ca316fe39050> (дата звернення: 25.12.2022).
8. Kotlin Programming Language. URL: <https://kotlinlang.org> (дата звернення: 25.12.2022).
9. Козуб, Г., Козуб Ю., Могильний Г., Жуков А. «Розробка мобільного Android-додатку з застосуванням принципів Clean Architecture». *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, вип. 5 (269), Вересень 2021, с. 5–10, doi:10.33216/1998-7927-2021-269-5-5-10.
10. Android MVI-Reactive Architecture Pattern. URL: <https://abhiappmobiledeveloper.medium.com/android-mvi-reactive-architecture-pattern-74e5f1300a87> (дата звернення: 25.12.2022).
11. MVIKotlin Overview. URL: <https://arkivanov.github.io/MVIKotlin/> (дата звернення: 25.12.2022).
12. Жуков А. В., Козуб Г.О. Застосування фреймворку Jetpack Compose у багатомодульному Android-додатку. *Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку*: Зб. наук. праць. Переяслав, 2021. Вип. 67. С.109–111.

### References

1. Xamarin documentation. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/xamarin/> (data zvernennja: 25.12.2022).
2. React Native. URL: <https://reactnative.dev/> (data zvernennja: 25.12.2022).
3. Flutter. URL: <https://flutter.dev/> (data zvernennja: 25.12.2021).
4. Kak Kotlin Multiplatform pomogaet sokratit' vremja razrabotki prilozhenij. URL: <https://habr.com/ua/post/525888/> (data zvernennja: 25.12.2022).
5. Pochemu my vybrali Kotlin odnim iz celevyh jazykov kompanii. Chast' 2: Kotlin Multiplatform. URL: <https://habr.com/ru/company/domclick/blog/499820/> (data zvernennja: 25.12.2022).
6. Declarative Programming: Is It A Real Thing?. URL: <https://www.toptal.com/software/declarative-programming> (data zvernennja: 25.12.2022).
7. Understanding Jetpack Compose – part 1 of 2. URL: <https://medium.com/androiddevelopers/understanding-jetpack-compose-part-1-of-2-ca316fe39050> (data zvernennja: 25.12.2022).
8. Kotlin Programming Language. URL: <https://kotlinlang.org> (data zvernennja: 25.12.2022).
9. Kozub, G., Kozub Ju., Mogil'nij G., Zhukov A. 2021. Rozrobka mobil'nogo Android-dodatku z zastosuvannjam principiv Slean Architecture. *Visnik Shidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja*, 5(269), 5–10, doi:10.33216/1998-7927-2021-269-5-5-10.
10. Android MVI-Reactive Architecture Pattern. URL: <https://abhiappmobiledeveloper.medium.com/android-mvi-reactive-architecture-pattern-74e5f1300a87> (data zvernennja: 25.12.2022).
11. MVIKotlin Overview. URL: <https://arkivanov.github.io/MVIKotlin/> (data zvernennja: 25.12.2022).
12. Zhukov A. V., Kozub G.O. 2021. Zastosuvannja frejmvorku Jetpack Compose u bagatomodul'nomu Android-dodatku. *Vitchiznjana nauka na zlami epoch: problemi ta perspektivi rozvitku* : Zb. nauk. prac'. Perejaslav, 2021, 67, 109–111.

### Kozub H. O., Kozub Yu. H. Declarative method for creating multiplatform applications

*The work provides an analysis of modern analogues of cross-platform and multi-platform application development, the Kotlin Multiplatform and Jetpack Compose development tools are investigated. The business logic and methodology of creating a user interface for several platforms are described, which contributes to reducing the cost of the product and accelerating its development. The method of developing a multi-platform application for Android, Windows, Linux and macOS operating systems is presented, which allows you to create background waves in sound format. The principles of declarative programming and frameworks for multi-platform development are studied. For the software implementation of individual native applications, native solutions have been chosen. This solution is facilitated by the use of Kotlin Multiplatform frameworks, which allows you to create universal application logic code, in combination with the Compose Multiplatform UI framework. Their use makes it possible to write a single logic code and application interface for several platforms at the same time, which helps to save time and avoid a significant number of errors. A methodology for developing the architecture of Android application components is proposed. The modular structure of the project architecture is divided into two parts: a common module, which contains the main logic of the application, as well as*

---

*platform implementations of components, and platform modules that perform initialization and launch of the application on a certain platform. The business logic contract of components implemented in Store interfaces is described. The formation of the melody format of the application from three classes is shown: Song, Track and Chord.. A special utility has been created to reproduce sounds. It downloads sounds from the application's resources and plays them with the necessary musical tone. Sounds are stored in the shared module resources as MP3 files. Dependency implementation is used to establish access to repositories from application business logic components. The logic of implementing dependencies is described in Koin module files. A methodology is proposed that summarizes the methodology of developing multi-platform applications in the Kotlin*

*programming language and the use of a declarative approach for the development of user interfaces for several platforms.*

**Keywords:** *MVIKotlin, Decompose, Android, Kotlin, Store, Common, Jetpack Compose, Kotlin Multiplatform.*

**Козуб Галина Олександрівна** – к. т. н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем Луганського національного університету імені Тараса Шевченка (м. Полтава), [galina14kz@gmail.com](mailto:galina14kz@gmail.com)

**Козуб Юрій Гордійович** – д. т. н., доцент, завідувач кафедри фізико-технічних систем та інформатики Луганського національного університету імені Тараса Шевченка (м. Полтава), [kosub.yg@gmail.com](mailto:kosub.yg@gmail.com)

Стаття подана 09.10.2022.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-16-20>

УДК: 004.89:504.06

## МЕТОДОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ШЛАМОНАКОПИЧУВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ НА ГЕОПРОСТОРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

Критська Я.О., Хмельницький Д.Б., Білобородова Т.О.

## MACHINE LEARNING-BASED SLUDGE IDENTIFICATION ON GEOSPATIAL IMAGES

Krytska Y.O., Khmelnytskyi D.B., Biloborodova T.O.

*В останні роки спостерігається зростання випадків деформації промислових шламонакопичувачів, результатом якої у багатьох випадках є руйнівний вплив на навколишнє середовище та екосистему. Моніторинг шламонакопичувачів має вирішальне значення для запобігання руйнівним наслідкам деформації. Традиційні методи моніторингу вимагають великих ресурсів та також малоефективні для раннього виявлення потенційної деформації. Віддалений моніторинг на основі геопросторових зображень є перспективним напрямком для моніторингу шламонакопичувачів з метою раннього виявлення потенційної деформації. В роботі представлено формалізацію етапів та визначення методології моніторингу шламонакопичувачів на основі геопросторових зображень з використанням методів машинного навчання: визначено засоби моніторингу, формалізовано етапи, розроблено технічну блок-схему процесу. Визначена методологія включає наступні етапи: (1) формування вибірки та передобробка зображень, (2) класифікація з використанням алгоритмів машинного навчання, (3) валідація результатів класифікації та визначення моделі з найвищою точністю. Методологія заснована на використанні Google Earth Engine (GEE). Засоби платформи включають інтерактивний сервер додатків, що працює з відкритим каталогом даних, обчислювальне інтегроване середовище розробки, геопросторовий API (клієнтські бібліотеки надають оболонки Python і JavaScript для веб-API в архітектурі REST. Практичну реалізацію та оцінку якості запропонованої методології проведено на основі даних зображень шламонакопичувача содового виробництва ВАТ «Лисичанська сода». Проведено попередню обробку зображень: 1) відбір зображень без хмар, для покращення результатів подальшого аналізу, 2) об'єднання шарів зображень ДДЗ, 3) анотація об'єктів, 4) розділення даних на тестовий та тренувальний набори даних пікселів. Класифікацію реалізовано з використанням алгоритмів CART, RF та SVM Ефективність моделей визначено на основі точності ідентифікації. Найвища точність на тестових даних досягнута з використанням SVM, що становила 98,05%.*

**Ключові слова:** класифікація зображень дистанційного зондування, машинне навчання, шламонакопичувач

**Вступ.** Шламонакопичувачі є великими спорудами, у яких зберігаються відходи, що утворюються внаслідок промислової діяльності підприємства [1]. Останнім часом зросла кількість випадків деформації шламонакопичувачів. Результатом деформації шламонакопичувача у багатьох випадках є руйнівний вплив на навколишнє середовище та екосистему. Моніторинг шламонакопичувачів має вирішальне значення для запобігання руйнівним наслідкам деформації. Традиційні методи моніторингу часто вимагають великих витрат часу та ретельного візуального огляду. Також, незважаючи на їхню надійність і точність, ранні сигнали потенційної деформації можуть бути не виявлені, оскільки контроль обмежений локальним моніторингом. Тому в ряді випадків традиційні методи моніторингу є недостатньо ефективними [2,3].

Геопросторові зображення, отримані за допомогою засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), наразі ефективно використовуються в різноманітних областях, таких як моніторинг поверхневих вод [4], у геології, картографії, екології, лісовому та сільському господарстві, океанології, метеорології та інших галузях [5,6], що показує великий потенціал їх застосування для віддаленого моніторингу шламонакопичувачів з метою ідентифікації потенційної деформації.

Супутник Landsat збирає та фіксує дані про нашу планету понад 40 років, що дозволяє проаналізувати зміни рельєфу тощо. Зі зростанням кількості зображень, можливості отримання інформації про зміщення поверхні постійно покращуються [7]. Також, розвиток хмарних рішень для обробки геопросторових зображень, таких як платформа Google Earth Engine (GEE) [8], надає додаткові потужності та ресурси для вирішення задачі моніторингу шламонакопичувачів. Класифікація даних геопросторо-

вих зображень з метою ідентифікації зони шламонакопичувача та визначення його площі дозволить відстежувати деформацію шламонакопичувача на великих площах, і є основою використання геопросторових зображень ДЗЗ як додаткового інструменту до традиційних засобів локального моніторингу стану шламонакопичувачів.

Для класифікації супутникових зображень й вилучення інформації використовуються два підходи: на основі об'єктів та на основі пікселів [9]. Обидва методи можуть бути інтегровані з машинним навчанням для ідентифікації шламонакопичувачів. Методи машинного навчання вважаються ефективним методом для ідентифікації об'єктів дистанційного зондування у класифікації зображень та розпізнанні об'єктів [10].

У роботі [11] проаналізовано продуктивність різних методів машинного навчання, таких як Random Forest (RF), K-найближчих сусідів, SVM на основі методу Демпстера-Шефера. У роботі [9] представлений аналіз методів машинного навчання, таких як RF [12], SVM [13] при застосуванні на оптичних чи багатодіапазонних супутникових зображеннях. RF широко використовується в різних додатках дистанційного зондування [15], є менш чутливим до складних наборів даних та згідно з [9] показує ефективні результати класифікації супутникових зображень.

**Метою** роботи є дослідження можливостей і перспектив використання методів машинного навчання з метою класифікації геопросторових зображень для моніторингу шламонакопичувачів.

Завдання дослідження визначено наступним чином:

- формалізація етапів та визначення методології моніторингу шламонакопичувачів на основі геопросторових зображень з використанням методів машинного навчання: визначення засобів, формалізація етапів, розробка технічної блок-схеми процесу;

- застосування запропонованої методології до ідентифікації шламонакопичувача на геопросторових зображеннях.

**Методологія моніторингу шламонакопичувачів на основі геопросторових зображень ДЗЗ.** Запропонована методологія заснована на використанні GEE. Засоби платформи включають інтерактивний сервер додатків, що працює з відкритим каталогом даних, обчислювальне інтегроване середовище розробки, геопросторовий API (клієнтські бібліотеки надають оболонки Python і JavaScript для веб-API в архітектурі REST).

Методологія включає наступні етапи: (1) формування вибірки та передобробка зображень, (2) класифікація з використанням алгоритмів машинного навчання, (3) валідація результатів класифікації та визначення моделі з найвищою точністю. Розроблена технічна блок-схема процесу представлена на рис.1.

*Формування вибірки та передобробка зображень.* Процедура формування вибірки проводиться з використанням зображень ДЗЗ, у тому числі від Landsat, MODIS, Sentinel-1 та Sentinel-2, що надаються у каталогах GEE. Місія Sentinel-2 збирає багатоспектральні зображення з високою роздільною здатністю, які корисні для широкого кола додатків, включаючи моніторинг рослинності, ґрунтового та водного покриву, зміни земного покриву, а також гуманітарні ризики та ризики стихійного лиха [16]. Згідно з каталогом даних GEE, ці зображення віднесені до рівня 2A, а зображення поверхневого відображення пройшли попередню обробку для корекції випромінювання, геометрії та атмосфери за даними GEE станом на 21 січня 2021 р. [17]. Проводиться попередня обробка зображень: 1) відбір зображень без хмар, для покращення результатів подальшого аналізу, 2) об'єднання шарів зображень ДЗЗ, 3) анотація об'єктів, 4) розділення даних на тестовий та тренувальний набори даних пікселів.

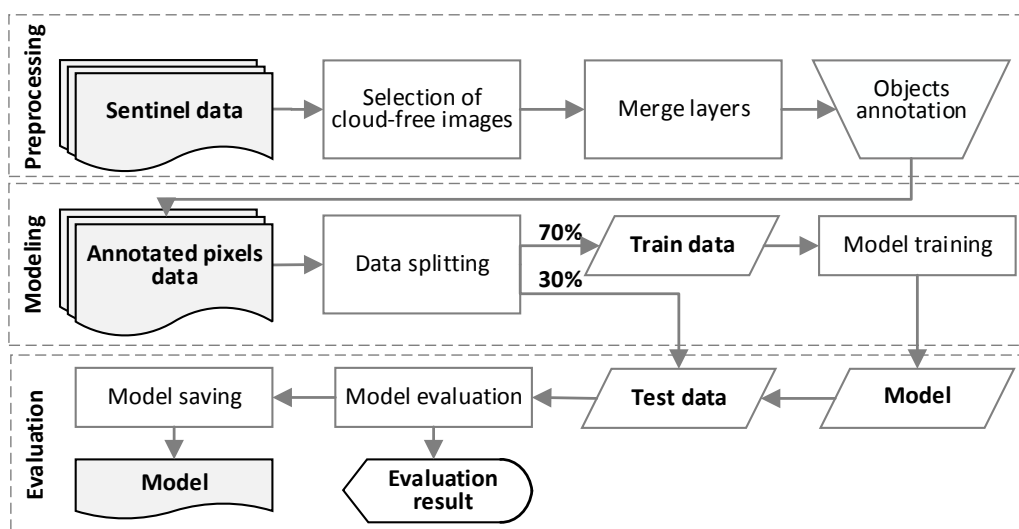


Рис. 1. Блок-схема моніторингу шламонакопичувачів з використанням методів машинного навчання на основі геопросторових зображень ДЗЗ

На основі спектральних і текстурних характеристик супутникових даних виділено п'ять категорій об'єктів зображень: дороги, рослинність, водоймища, сільськогосподарські культури та шламонакопичувачі. Об'єкти зображення є наборами зв'язаних пікселів, що мають однакове ціле значення. Процес анотації об'єктів є процедурою ідентифікації об'єкта зображення та присвоєння унікального ідентифікатора всім пікселям об'єкта. Результатом анотації є копія вхідного зображення з додатковим шаром міток, що з'єднує пікселі зі значенням ідентифікатора об'єкта на основі зв'язності пікселів у першому шарі зображення.

Усі точки вибірки об'єднані в одному шарі для формування набору даних, де 70% пікселів обрано випадковим чином для навчання моделі, а решта 30% для перевірки та оцінки точності алгоритму.

*Класифікація з використанням алгоритмів машинного навчання.* Для класифікації запропоновано використання наступних алгоритмів машинного навчання: CART, Random Forest (RF) та SVM.

*Валідація результатів класифікації.* Матриця плутанини є основним методом оцінки точності, який описує точність класифікації на тестових даних. На основі оцінки точності визначається оптимальна модель для ідентифікації шламонакопичувачів. На основі ідентифікованого об'єкту визначається площа шламонакопичувача. Зміни площі шламонакопичувача з плином часу можуть бути використані для моніторингу його деформації.

**Ідентифікація шламонакопичувача заводу «Ліссода» на геопросторових зображеннях та визначення його площі.** Оцінка якості запропонованої методології проведена на основі даних зображень шламонакопичувача заводу «Ліссода», який виділено червоним прямокутником на рис. 2.



Рис. 2. Географічне розташування шламонакопичувача заводу «Ліссода» на мапі

Вибірка сформована з використанням зображень Sentinel-2 від GEE. Для дослідження викорис-

тано дані контрольних зображень за 2015-2022 рік, а хвильовий код Quality Assessment 60 (QA60) використано в якості фільтру для зменшення каламутних частинок та усунення впливу хмар на зображеннях.

Реалізовано анотування наступних об'єктів зображень: дороги, рослинність, водоймища, сільськогосподарські культури та шламонакопичувач. Анотація шламонакопичувача проведена за двома характеристиками шламонакопичувача: відходи 1 - для відходів, що мають низьке залягання, та відходи 2 - для відходів, що мають високе залягання. Процес анотації об'єктів представлено на рис. 3, де а) анотація рослинності, б) анотація водойм, в) дороги, г) відходи 1, д) відходи 2, е) інше.

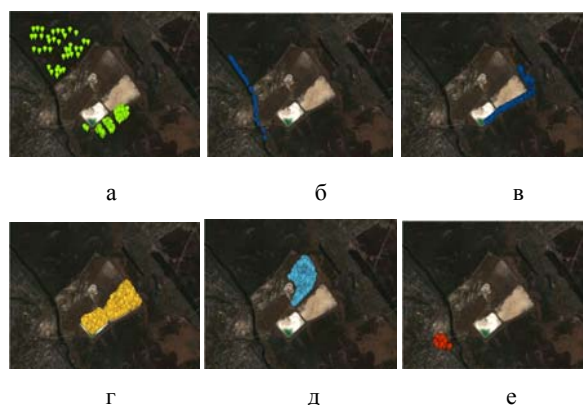


Рис. 3. Анотація об'єктів:  
а – анотація рослинності, б – анотація водойм, в – дороги,  
г – відходи 1, д – відходи 2, е – інше

Проведено класифікацію з використанням алгоритмів CART, RF та SVM. Приклад результатів класифікації представлено на рис. 4, де а) CART, б) RF та в) SVM.

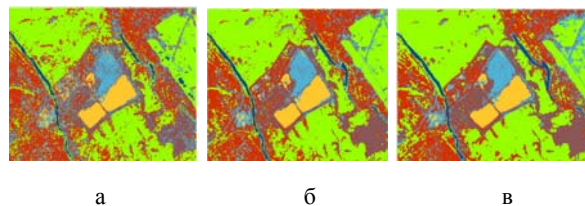


Рис. 4. Відокремлення області шламонакопичувача:  
а – CART, б – RF, в – SVM

Проведено відокремлення класифікованої області шламонакопичувача відходів від загальної мапи. Приклад результатів відокремлення представлено на рис. 5, де а) CART, б) RF та в) SVM.

Порівняльний аналіз алгоритмів ідентифікації шламонакопичувача проведено шляхом оцінки точності класифікації (дивись таблицю).

Найвищу точність ідентифікації шламонакопичувача на зображеннях, що дорівнює 98,05%, показав алгоритм SVM.

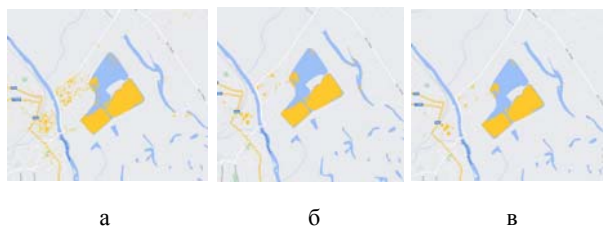


Рис. 5. Відокремлення області шламонакопичувача: а – CART, б – RF, в – SVM

Таблиця

Результати оцінки точності класифікації	
Алгоритм	Точність, %
CART	73,12
RF	85,62
SVM	98,05

**Висновки.** В роботі представлено формалізацію етапів та визначення методології моніторингу шламонакопичувачів на основі геопросторових зображень з використанням методів машинного навчання: визначено засоби моніторингу, формалізовано етапи, розроблено технічну блок-схему процесу. Представлено практичну реалізацію формалізованих етапів методології на прикладі ідентифікації шламонакопичувача заводу «Ліссода», що включила наступні етапи: (1) формування вибірки та передобробка зображень, (2) класифікація з використанням алгоритмів машинного навчання, (3) валідація результатів класифікації та визначення моделі з найвищою точністю. Практична реалізація проведена з використанням платформи Google Earth Engine. Попередня обробка зображень включала: 1) відбір зображень без хмар, для покращення результатів подальшого аналізу, 2) об'єднання шарів зображень ДДЗ, 3) анотація об'єктів, 4) розділення даних на тестовий та тренувальний набори даних пікселів. Класифікацію на основі даних пікселів реалізовано з використанням алгоритмів CART, RF та SVM. Ефективність моделей визначено на основі точності ідентифікації шламонакопичувача. Порівняльний аналіз алгоритмів ідентифікації шламонакопичувача проведено шляхом оцінки точності класифікації. Найвищу точність ідентифікації шламонакопичувача на зображеннях, що дорівнює 98,05%, показав алгоритм SVM

Л і т е р а т у р а

- Celenza, G., 2019. Industrial waste treatment process engineering: Biological Processes. CRC Press.
- Grebby S. et al. Advanced analysis of satellite data reveals ground deformation precursors to the Brumadinho Tailings Dam collapse. *Communications Earth & Environment*. – 2021. – Т. 2. – №. 1. – С. 1-9.
- Robertson, P. K., L.d. Melo, D.J. Williams, and G.W. Wilson. Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I. 2019. URL:

<https://www.resolutionmineeis.us/documents/robertson-et-al-2019> (дата звернення 10.12.2022).

- Критська Я. О., Білобородова Т.О. Дослідження методів обробки та аналізу геопросторових зображень для віддаленого моніторингу поверхневих вод. *Вісник СХУ імені Володимира Даля*. – 2022. – №. 1 (271). – С. 11-17.
- Imran, Shabir Ahmad, Do Hyeun Kim. Quantum GIS based descriptive and predictive data analysis for effective planning of waste management. *IEEE*. – 2020. – Т. 8. – С. 46193-46205.
- Kodwo Miezah, Kwasi Obiro-Danso. Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste management in Ghana. *Waste management*. – 2015. – Т. 46. – С. 15-27.
- Cigna, F., & Tapete, D. (2021). Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR. *Remote Sensing of Environment*. – 2021. – Т. 253. – С. 112161.
- Google Earth Engine. Developers.google.com URL: <https://developers.google.com/earth-engine> (дата звернення 10.12.2022).
- Ghorbanzadeh O., Blaschke T., Gholamnia K., Meena S.R., Tiede D., Aryal J. Evaluation of different machine learning methods and deep-learning convolutional neural networks for landslide detection. *Remote Sensing*. – 2019. – Т. 11. – №. 2. – С. 196.
- Roodposhti M. S., Aryal J., Bryan B. A. A novel algorithm for calculating transition potential in cellular automata models of land-use/cover change. *Environmental modelling & software*. – 2019. – Т. 112. – С. 70-81.
- Mezaal M. R., Pradhan B., Rizeei H. M. Improving landslide detection from airborne laser scanning data using optimized Dempster-Shafer. *Remote Sensing*. – 2018. – Т. 10. – №. 7. – С. 1029.
- Micheletti N, Foresti L, Robert S, Leuenberger M, Pedrazzini A, Jaboyedoff M, Kanevski M. Machine learning feature selection methods for landslide susceptibility mapping. *Mathematical geosciences*. – 2014. – Т. 46. – №. 1. – С. 33-57.
- Huang Y., Zhao L. Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. *Catena*. – 2018. – Т. 165. – С. 520-529.
- Kavzoglu T., Colkesen I., Sahin E. K. Machine learning techniques in landslide susceptibility mapping: a survey and a case study. *Landslides: Theory, practice and modelling*. – 2019. – С. 283-301.
- Melville B., Lucieer A., Aryal J. Object-based random forest classification of Landsat ETM+ and WorldView-2 satellite imagery for mapping lowland native grassland communities in Tasmania, Australia. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. – 2018. – Т. 66. – С. 46-55.
- Shaikh M. A. Using GIS in Solid Waste Management Planning: A case study for Aurangabad, India. – Institutionen för datavetenskap, 2006.
- Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. Developers.google.com URL: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S2\\_SR](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR). (дата звернення 10.12.2022).

## References

- Celenza, G., 2019. Industrial waste treatment process engineering: Biological Processes. CRC Press.
- Grebby S. et al. Advanced analysis of satellite data reveals ground deformation precursors to the Brumadinho Tailings Dam collapse. Communications Earth & Environment. – 2021. – Т. 2. – №. 1. – С. 1-9.
- Robertson, P. K., L.d. Melo, D.J. Williams, and G.W. Wilson. Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I. 2019. URL: <https://www.resolutionmineeis.us/documents/robertson-et-al-2019> (дата звернення 10.12.2022).
- Krytska Y.O., Biloborodova T.O. Geospatial images processing and analysis for remote surface water monitoring. Herald of East Ukrainian National University. Severodonetsk : EUNU. – 2022. – №. 1 (271). – С. 11-17.
- Imran, Shabir Ahmad, Do Hyeun Kim. Quantum GIS based descriptive and predictive data analysis for effective planning of waste management. IEEE. – 2020. – Т. 8. – С. 46193-46205.
- Kodwo Miezah, Kwasi Obiro-Danso. Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste management in Ghana. Waste management. – 2015. – Т. 46. – С. 15-27.
- Cigna, F., & Tapete, D. (2021). Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR. Remote Sensing of Environment. – 2021. – Т. 253. – С. 112161.
- Google Earth Engine. Developers.google.com URL: <https://developers.google.com/earth-engine> (дата звернення 10.12.2022).
- Ghorbanzadeh O., Blaschke T., Gholamnia K., Meena S.R., Tiede D., Aryal J. Evaluation of different machine learning methods and deep-learning convolutional neural networks for landslide detection. Remote Sensing. – 2019. – Т. 11. – №. 2. – С. 196.
- Roodposhti M. S., Aryal J., Bryan B. A. A novel algorithm for calculating transition potential in cellular automata models of land-use/cover change. Environmental modelling & software. – 2019. – Т. 112. – С. 70-81.
- Mezaal M. R., Pradhan B., Rizeei H. M. Improving landslide detection from airborne laser scanning data using optimized Dempster-Shafer. Remote Sensing. – 2018. – Т. 10. – №. 7. – С. 1029.
- Micheletti N, Foresti L, Robert S, Leuenberger M, Pedrazzini A, Jaboyedoff M, Kanevski M. Machine learning feature selection methods for landslide susceptibility mapping. Mathematical geosciences. – 2014. – Т. 46. – №. 1. – С. 33-57.
- Huang Y., Zhao L. Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. Catena. – 2018. – Т. 165. – С. 520-529.
- Kavzoglu T., Colkesen I., Sahin E. K. Machine learning techniques in landslide susceptibility mapping: a survey and a case study. Landslides: Theory, practice and modelling. – 2019. – С. 283-301.
- Melville B., Lucieer A., Aryal J. Object-based random forest classification of Landsat ETM+ and WorldView-2 satellite imagery for mapping lowland native grassland communities in Tasmania, Australia. International journal of applied earth observation and geoinformation. – 2018. – Т. 66. – С. 46-55.
- Shaikh M. A. Using GIS in Solid Waste Management Planning: A case study for Aurangabad, India. – Institutionen för datavetenskap, 2006.
- Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. Developers.google.com URL: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S2\\_SR](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR). (дата звернення 10.12.2022).

**Krytska Y.O., Khmelnytskyi D.B., Biloborodova T.O. Machine learning-based sludge identification on geospatial images.**

*In recent years, there has been an increase in cases of deformation of industrial sludge, which in many cases has a devastating impact on the environment and the ecosystem. Monitoring of Waste accumulation sites is crucial to prevent the destructive effects of deformation. Traditional monitoring methods require large resources and are also ineffective for early detection of potential deformation. Remote monitoring based on geospatial images is a promising area for monitoring of sludge caps with the purpose of early detection of potential deformation. The work presents the formalization of stages and determination of the methodology of Waste accumulation sites monitoring based on geospatial images using machine training methods: identified monitoring tools, formalized stages, developed a technical block diagram of the process. The defined methodology includes the following stages: (1) sampling and imagery, (2) classification using machine learning algorithms, (3) Validation of classification and model determination with the highest accuracy. The methodology is based on the use of Google Earth Engine (GEE). Platform tools include an interactive server of applications with an open data directory, computing integrated development environment, geospatial application programming interface (client libraries provide Python and JavaScript shells for web-API in representational state transfer (REST) architecture). The practical implementation and quality assessment of the proposed methodology was carried out based on image data of Waste accumulation sites of the open joint-stock company (OJSC) «Lysychanska soda». Pre-processing of images: 1) selection of images without clouds, to improve the results. 2) unification of layers of remote sensing images. 3) annotation of objects, 4) separation of data into test and training sets of pixel data. The classification is implemented using Classification and Regression Trees (CART), Random Forest (RF) and Support Vector Machine (SVM) algorithms. The effectiveness of the models is determined based on the accuracy of identification. The highest accuracy on test data was achieved using SVM, which was 98.05%.*

**Keywords:** remote sensing images classification, machine learning, waste accumulation sites

**Критська Я.О.** – д.ф., доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [kritskayana@gmail.com](mailto:kritskayana@gmail.com)

**Хмельницький Д.Б.** – магістр кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [dimon22052000@gmail.com](mailto:dimon22052000@gmail.com)

**Білобородова Т.О.** – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [beloborodova.t@gmail.com](mailto:beloborodova.t@gmail.com)

Стаття подана 25.09.2022.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-21-27>

УДК 004.3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІРТУАЛЬНОЇ БАГАТОПОТОЧНОСТІ (2, 3, 4 ПОТОКИ) ТИПУ HYPER THREADING ПРИ ВИКОНАННІ ПОТОКІВ В ОДНАКОВИХ ТА РІЗНИХ УМОВАХ

Недзельський Д.О., Сафонова С.О., Барбарук Л.В.

## RESEARCH EFFICIENCY VIRTUAL MULTITHREADING (2, 3, 4 THREADS) TYPE HYPER THREADING WHEN EXECUTION THREADS IN THE SAME AND DIFFERENT CONDITIONS

Nedzelskyi D.O., Safonova S.O., Barbaruk L.V.

В статті аналітичними методами з елементами теорії масового обслуговування досліджена ефективність ядер сучасних процесорів з використанням віртуальної багатопоточності типу технології Hyper Threading при 2-х, 3-х, 4-х потоках з урахуванням структурних особливостей ядра як при виконанні потоків в однакових умовах, так і в різних умовах. Під однаковими умовами розглядалося виконання потоків, коли використовували однакові обсяги рівнів кеш-пам'яті. Під різними умовами розглядалися ситуації, коли потоки послідовно виконувалися в умовах з використанням доступних обсягів кеш-пам'яті, а паралельно потоки виконувалися в гірших умовах використання кеш-пам'яті (з використанням нижчого рівня кеш-пам'яті або навіть оперативної пам'яті).

Для дослідження вибрано широко поширені та наочні програми: «Множення матриць», «Рішення диференціальних рівнянь у приватних похідних методом сіток». У програмах, що досліджувалися було виділено ядро, уточнені інформаційно залежні команди і команди редукції, сформовані групи команд, їх кількість та визначені часи виконання кожної групи в програмі ядра, а також визначені ймовірності появи кожної групи команд. Розроблено методичку досліджень та модель ядра. Для дослідження використовувалася двофазна спрощена модель ядра процесора. Було визначено коефіцієнт навантаження універсального ФП та, в залежності від значення різних параметрів програми і ядра процесора, визначено коефіцієнт використання ПУ моделі, визначені середній час виконання ядра програми та середні часи використання окремих спеціалізованих функціональних пристроїв.

Наведено результати досліджень у вигляді формул при 2-х, 3-х та 4-х потоках в одному фізичному ядрі як при виконанні потоків в однакових умовах, так і в різних умовах. Підтверджена ефективність віртуальної багатопоточності типу Hyper Threading при двох, трьох, чотирьох потоках з відсутністю структурних конфліктів, так і при різних умовах – наявності структурних конфліктів в підсистемі кеш-пам'яті.

При виконанні потоків у різних умовах ефективність (коефіцієнт прискорення) менша, ніж при виконанні в рівних умовах. Якщо при виконанні одного потоку використовуву-

ється більше половини кеш-пам'яті третього рівня або потрібна інтенсивна робота з оперативною пам'яттю, використання віртуальної багатопоточності недоцільно.

**Ключові слова:** багатопотокова віртуальність, процесор, ядро, конвеєр команд, переходи, продуктивність, ефективність.

**Вступ.** Найчастіше ефективність ядер процесорів досліджувалася експериментальним шляхом за допомогою програмних тестів. Отримані дані про час виконання тестів дозволяли визначити відношення реальної ефективності до пікової ефективності.

Проте тести не можуть відповісти на питання, чому реальна продуктивність значно менше теоретичної продуктивності і якими шляхами можна збільшити реальну продуктивність.

У роботах [1,2], а також в багатьох подібних роботах, досліджувалася віртуальна двопоточна ефективність (при реалізації технології Hyper Threading) експериментальним шляхом, виконуючи різні тести. Встановлено, що в багатьох випадках віртуальна двопоточність забезпечує збільшення ефективності до 30%. У той же час, при виконанні деяких програм ефективність або не збільшується, або навіть погіршується. У всіх експериментальних дослідженнях шляхом виконання програм і фіксації часу їх виконання не вказувалися причини, які пояснили б, чому отримані такі результати. У випадках відсутності або навіть негативного ефекту це пояснювалося тим, що виконуючі дві програми конкурували за однакові ресурси без вказівки цих ресурсів і ступеня їх використання кожною програмою окремо.

В роботі [3] досліджувалася аналітичним методом ефективність віртуальної двопоточності типу

технології Hyper Threading в одному фізичному ядрі процесора при виконанні кількох розповсюджених програм (множення матриць, рішення диференціальних рівнянь з приватними похідними, швидке перетворення Фур'є) при наявності перешкод плавній роботі конвеєра виконання команд при виконанні однієї та двох однакових програм. Встановлено, що при виконанні однієї програми коефіцієнти використання окремих підсистем ядра а також оперативної пам'яті значно менші 1. Коефіцієнти використання кеш-пам'яті також далекі від максимальних. Підтверджена доцільність використання технології Hyper Threading. Продемонстровані деякі причини відсутності ефективності технології Hyper Threading.

В роботі [4] коефіцієнт прискорення (ефективність двопоточної віртуальності типу HT) визначався як відношення часу послідовного виконання двох програм в одному фізичному ядрі до часу паралельного (одночасного) виконання цих двох програм, у цьому ж фізичному ядрі (тобто в режимі віртуальної двопоточності типу Hyper Threading). При цьому передбачалося, що для однопоточного виконання та двопоточного виконання програм фізичних ресурсів ядра достатньо. Наприклад, розміри масивів такі, що обсяги кеш-пам'яті достатні для розміщення даних виконуваних програм.

Проте, не завжди виконуються такі умови. У багатьох випадках можливі ситуації, коли обсяг кеш-пам'яті достатній для розміщення даних однопоточної програми, але не достатній для розміщення двопоточних програм. При дворазовому послідовному виконанні програми в однопоточному режимі, робота виконується в сприятливих умовах (значно більша кількість звернень за даними здійснюється в швидкі рівні кеш-пам'яті).

При двопоточному паралельному виконанні програм, робота виконується в менш сприятливих умовах (значно більша кількість звернень за даними здійснюється на повільніші рівні кеш-пам'яті або навіть в оперативну пам'ять). Це означає, що умови виконання двох однопоточних програм можуть суттєво відрізнятись від умов паралельного виконання двопотокової програми. Відповідно результати (коефіцієнт прискорення) можуть також значно відрізнятись.

Висновки, отримані в роботі [4], сумніву не піддаються, але вони справедливі тільки для оптимальних поєднань розмірів даних у програмах та розмірів кеш-пам'яті в ядрі та в процесорі.

Також у роботі [4] не досліджувалася можливість використання трьохпоточних і чотирихпоточних програм в одному фізичному ядрі, хоча зроблено висновки, що і під час виконання програм у двопоточному варіанті фізичні ресурси ядра використовуються не повною мірою.

**Метою даної роботи** є дослідження ефективності використання віртуальної багатопоточності типу Hyper Threading при 2-х, 3-х, 4-х потоках при

наявності як оптимального, так і неоптимального співвідношення розмірів даних в програмах та розмірів кеш-пам'яті в ядрі (інакше кажучи структурних конфліктів в підсистемі кеш-пам'яті).

**Методика досліджень.** В статті використана методика досліджень з роботи [4]. У досліджуваних програмах «Множення матриць», «Розв'язання диференціальних рівнянь в приватних похідних методом сіток»:

- виділялося ядро – ділянка програми, яка забезпечує основний внесок під час виконання програми;
- розроблялися на умовному асемблері програми ядер;
- з'ясовувалися інформаційно залежні команди і команди редуції, якщо вони є;
- формувалися групи команд, які виконують інформаційно залежні ділянки команд ядра, і їх кількість;
- визначалися ймовірності появи кожної групи команд в програмі ядра;
- визначалися часи виконання кожної групи команд в програмі ядра;
- розроблялася модель ядра процесора, що виконує ядро програми;
- в моделі інформаційно залежні групи команд виконувалися підсистемою виконання послідовно згідно з алгоритмом виконання програми.

Далі визначалися:

- середній час виконання ядра програми;
- середні часи використання окремих спеціалізованих функціональних пристроїв таких як: кеш-пам'яті першого, другого і третього рівнів; пристрої множення; пристрої складання;
- коефіцієнт навантаження універсального функціонального пристрою;
- коефіцієнт використання пристрою управління (ПУ) моделі в залежності від значення різних параметрів програми і ядра процесора;
- коефіцієнти використання спеціалізованих функціональних пристроїв.

**Модель ядра процесора при виконанні потоків.** Для дослідження використовувалася двофазна спрощена модель ядра процесора, що складається з пристрою управління (ПУ), підсистеми виконання груп команд і буфера між ними.

Структурну схему еквівалентної спрощеної моделі ядра надано на рисунку.

ПУ почергово читає блок командної інформації потоку  $i$  ( $i=1;2;3;4$ ) з підсистеми пам'яті, дешифрує цей блок командної інформації та записує чергову групу продешифрованих команд в буфер продешифрованих груп команд потоку  $i$ . Ймовірність генерації  $i$ -ї дешифрованої групи команд  $W_i$ .

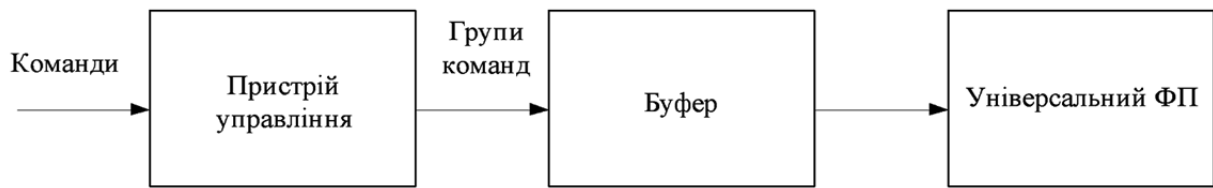


Рис. Спрощена структурна схема моделі ядра

Передбачається, що процес генерації груп команд ПУ найпростіший з показовим законом розподілу часу між згенерованими групами команд. Інтенсивність генерації груп команд визначається формулою (1)

$$\lambda_{\text{ПУ}}=1/t_{\text{ген}}, \quad (1)$$

де  $t_{\text{ген}}$  – математичне очікування часу генерації групи команд.

Час генерації чергової групи команд ПУ залежить тільки від архітектурних і структурних особливостей ядра процесора.

Після генерації однієї групи команд та запису її в буфер потоку і пристрій управління переходить до генерації груп команд для потоку  $i+1$ , якщо буфер продешифрованих команд цього потоку не заповнений. Інакше пристрій управління переходить до генерації груп команд для наступного по черзі потоку  $i+2$ .

Якщо буфер команд потоку  $i$  заповнений, то пристрій управління перестає генерувати нові групи для цього потоку  $i$ .

Якщо буфери команд всіх потоків заповнені, то пристрій управління простоє.

Підсистема виконання груп команд складається з декількох спеціалізованих функціональних пристроїв (ФПj).

Типи ФП:

- ФП читання даних з кеш-пам'яті першого рівня L1D.
- ФП читання даних з кеш-пам'яті другого рівня L2.
- ФП читання даних з кеш-пам'яті третього рівня L3.
- ФП читання та запису даних з (в) оперативну пам'ять.
- ФП складання/віднімання.
- ФП множення.
- ФП ділення.

Інші спеціалізовані пристрої.

Команди з буферів продешифрованих команд одночасно можуть видаватися до всіх наявних ФП, при умові, що кожний ФП готовий приймати команду та готові операнди для цієї команди.

ФП читання даних з кеш-пам'яті першого рівня L1D може одночасно читати 2 операнди і записувати один результат.

ФП читання даних із кеш-пам'яті другого рівня L2, ФП читання даних із кеш-пам'яті третього рівня

L3, та ФП читання та запису даних з (в) оперативну пам'ять комбінаційного типу та у будь-який момент часу можуть виконувати лише одну команду. До виконання наступної команди вони можуть розпочинати тільки після завершення попередньої команди.

Якщо ФП вільний і в буферах продешифрованих команд немає готових до виконання команд, ФП простоє.

Наприклад, при виконанні ядра програми «Множення матриць» група команд, що складається:

- з команд читання 2-х операндів з кеш-пам'яті даних першого рівня (L1D), команди множення прочитаних операндів і команди нагромаджуючого додавання результатів множення виконується з інтенсивністю  $\mu_1=1/t_{\text{скл}}$ , де  $t_{\text{скл}}$  - повний час виконання операції складання.
- з команд читання операнда з кеш-пам'яті даних першого рівня (L1D), команди читання операнда з оперативної пам'яті, команди множення прочитаних операндів і команди нагромаджуючого додавання результатів групи, виконується з інтенсивністю  $\mu_{\text{оп}}=1/t_{\text{оп}}$ , де  $t_{\text{оп}}$ - час читання операнда з оперативної пам'яті;
- з команд читання операнда з кеш-пам'яті даних другого рівня L2, команди читання операнда з кеш-пам'яті другого рівня L2, команди множення прочитаних операндів і команди нагромаджуючого додавання результатів множення, виконується з інтенсивністю, що визначається часом читання операнда з кеш-пам'яті другого рівня L2  $\mu_{L2}=1/t_{L2}$ , де  $t_{L2}$  час читання операнда з кеш-пам'яті другого рівня L2.
- з команд читання операнда з кеш-пам'яті даних першого рівня L1D, команди читання операнда з кеш-пам'яті третього рівня L3, команди множення прочитаних операндів і команди нагромаджуючого додавання результатів множення (тип групи L1; L3; Множ.; Дод.) виконується з інтенсивністю, що визначається часом читання операнда з кеш-пам'яті третього рівня L3  $\mu_{L3}=1/t_{L3}$ , де  $t_{L3}$  час читання операнда з кеш-пам'яті третього рівня L3.

Результати досліджень.

Таблиця 1

Дослідження програми «Множення матриць»		
Потоки виконуються в рівних умовах (структурні конфлікти відсутні)		
Варіант	Коефіцієнти прискорення	Приклади коефіцієнтів прискорення
всі дані в L1	$Sk \cong \frac{2/m + 15t_{\text{ОБЧ}}/t_{\text{ОП}}}{2/m + 15t_{\text{ОБЧ}}/kt_{\text{ОП}}}$	при $t_{\text{ОП}} = 256\tau$ ; $t_{\text{ОБЧ}} = 4\tau$ ; $m=64$ $S2 = 1.79$ ; $S3 = 2.43$ ; $S4 = 2.95$ .
всі дані в L2	$Sk \cong \frac{2/m + t_{L2}/t_{\text{ОП}} + 15 * t_{\text{ОБЧ}}/t_{\text{ОП}}}{2/m + t_{L2}/t_{\text{ОП}} + 15t_{\text{ОБЧ}}/kt_{\text{ОП}}}$	при $t_{L2} = 12\tau$ ; $t_{\text{ОП}} = 256\tau$ ; $t_{\text{ОБЧ}} = 4\tau$ ; $m=256$ $S2 = 1.68$ ; $S3 = 2.18$ ; $S4 = 2.55$ .
всі дані в L3	$Sk \cong \frac{2/m + t_{L3}/t_{\text{ОП}} + 15 * t_{\text{ОБЧ}}/t_{\text{ОП}}}{2/m + t_{L3}/t_{\text{ОП}} + 15t_{\text{ОБЧ}}/kt_{\text{ОП}}}$	при $t_{L3} = 36\tau$ ; $t_{\text{ОП}} = 256\tau$ ; $t_{\text{ОБЧ}} = 4\tau$ ; $m=512$ $S2 = 1.45$ ; $S3 = 1.70$ ; $S4 = 1.87$ .
всі дані в ОП	Прискорення відсутнє	$m > \text{обсягу } L3$
Потоки виконуються в нерівних умовах (структурні конфлікти є)		
Структурний конфлікт L1/L2	$Sk \cong \frac{15t_{\text{ОБЧ}}}{t_{L2} + 15t_{\text{ОБЧ}}/k}$	при $t_{\text{ОП}} = 256\tau$ ; $t_{\text{ОБЧ}} = 4\tau$ ; $m=100$ ; $S2=1.43$ ; $S3=1.88$ ; $S4=2.22$
Структурний конфлікт L2/L3	$Sk \cong \frac{t_{L2} + 15t_{\text{ОБЧ}}}{t_{L3} + 15t_{\text{ОБЧ}}/k}$	при $t_{L2} = 12\tau$ ; $t_{\text{ОП}} = 256\tau$ ; $t_{\text{ОБЧ}} = 4\tau$ ; $m=256$ $S2=1.03$ ; $S3=1.2$ ; $S4=1.31$ .

Примітки:

- $t_{L1}$  – латентність кеш-пам'яті першого рівня;
- $t_{L2}$  – латентність кеш-пам'яті другого рівня;
- $t_{L3}$  – латентність кеш-пам'яті третього рівня;
- $t_{\text{ОП}}$  – латентність оперативної пам'яті;
- $t_{\text{ОБЧ}}$  – час обчислення однієї операції;
- $m$  – розмір квадратної матриці.

Передбачається також, що:

- якщо ФП вільний, то чергова згенерована група команд з відповідного буферу продешифрованих команд відразу надходить на виконання в ФП;
- вибирає групи команд з буфера груп команд згідно дисципліни FIFO.
- Якщо ФП вільний і в буфері груп команд немає заявок, то ФП простоє.

Потік виконаних в ФП груп команд найпростіший, закон розподілу показовий з інтенсивністю  $\mu_{\text{ФП}}=1/t_{\text{ФП}}$ , де  $t_{\text{ФП}}$  – середній час виконання групи команд.

**Висновки.** 1. При виконанні потоків в рівних умовах коефіцієнти прискорення змінюються так:

1.79 - для двопоточності; 2.43 - для трьохпоточності; 2.95 = для чотирьохпоточності при виконанні всіх потоків з використанням кеш-пам'яті першого рівня L1D.

1.68 - для двопоточності; 2.18 - для трьохпоточності; 2.55 = для чотирьохпоточності при виконан-

ні всіх потоків з використанням кеш-пам'яті другого рівня L2.

1.45 - для двопоточності; 1.70 - для трьохпоточності; 1.87 = для чотирьохпоточності при виконанні всіх потоків з використанням кеш-пам'яті третього рівня L3.

Прискорення відсутнє, якщо дані навіть одного потоку більші обсягу кеш-пам'яті третього рівня L3.

2. Якщо потоки виконуються в нерівних умовах (структурні конфлікти є) коефіцієнти прискорення змінюються так:

Структурний конфлікт L1/L2 (один потік може виконуватися через L1, а вже 2, 3, 4 потоки будуть виконуватися через L2) - 1.43 - для двопоточності; 1.88 - для трьохпоточності; 2.22 для чотирьохпоточності.

Структурний конфлікт L2/L3 (один потік може виконуватися через L2, а вже 2, 3, 4 потоки будуть виконуватися через L3) - 1.03 - для двопоточності; 1.20 - для трьохпоточності; 1.31 для чотирьохпоточності.

Структурний конфлікт L3/ОП (один потік може виконуватися через L3, а вже 2, 3, 4 потоки будуть виконуватися через оперативну пам'ять прискорення відсутнє.

3. Наявність структурних конфліктів при використанні підсистеми кеш-пам'яті значно зменшує коефіцієнти прискорення. Наприклад: при двопоточності - від 1.79 до 1.45 – при виконанні потоків в рівних умовах; до 1.03 та відсутності прискорення; при трьохпоточності від 2.43 до 1.70 – при виконанні потоків в рівних умовах; до 1.20 та відсутності

прискорення при виконанні потоків в нерівних умовах; для чотирьохпоточності від 2.95 до 1.31 при виконанні потоків в рівних умовах та відсутності прискорення при виконанні потоків в нерівних умовах.

4. Підтверджуються експериментальні дані тестів ефективності віртуальної двопоточності про досить значне можливе прискорення, так і про його відсутність.

5. Віртуальні трьох- та чотирьохпоточності ефективні.

Таблиця 2

**Дослідження програми «Розв'язання диференціальних рівнянь в приватних похідних»**

Потоки виконуються в рівних умовах (структурні конфлікти відсутні)		
Варіант	Коефіцієнти прискорення	Приклади
всі дані в L1	$Sk \cong \frac{3t_{оп}/n + 16t_{обч}^2}{3t_{оп}/n + 16t_{обч}^2/k}$	n=128; t <sub>оп</sub> =256τ; t <sub>обч</sub> <sup>1</sup> = 12τ; t <sub>обч</sub> <sup>2</sup> = 24τ S2=1.97; S3=2.91, S4=3.82.
всі дані в L2	$Sk \cong \frac{3t_{оп}/n + 2t_{L2} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2}{3t_{оп} + 2t_{L2} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2/k}$	n=128; t <sub>оп</sub> =256τ; t <sub>обч</sub> <sup>1</sup> = 12τ; t <sub>обч</sub> <sup>2</sup> = 24τ; t <sub>L2</sub> = 12τ S2 ≅ 1.78; S3 ≅ 2.39; S4 ≅ 2.90.
всі дані в L3	$Sk \cong \frac{3t_{оп}/n + 2t_{L3} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2}{3t_{оп}/n + 2t_{L3} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2/k}$	n=128; t <sub>оп</sub> =256τ; t <sub>обч</sub> <sup>1</sup> = 12τ; t <sub>обч</sub> <sup>2</sup> = 24τ; t <sub>L3</sub> = 36τ S2 ≅ 1.67; S3 ≅ 2.15; S4 ≅ 2.5.
всі дані в ОП	$Sk \cong \frac{3t_{оп} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2}{3t_{оп} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2/k}$	m>обсягу L3 n=128; t <sub>оп</sub> =256τ; t <sub>обч</sub> <sup>1</sup> = 12τ; t <sub>обч</sub> <sup>2</sup> = 24τ S2 ≅ 1.19; S3 ≅ 1.27; S4 ≅ 1.31.
Потоки виконуються в нерівних умовах (структурні конфлікти є)		
Структурний конфлікт L1/L2	$Sk \cong \frac{3t_{оп}/n + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2}{3t_{оп}/n + 2t_{L2} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2/k}$	m=64; n=128, t <sub>оп</sub> =256 τ, t <sub>обч</sub> <sup>1</sup> =12 τ, t <sub>обч</sub> <sup>2</sup> =24 τ, t <sub>L2</sub> =12 τ S2=1.65; S3=2.26; S4=2.78.
Структурний конфлікт L2/L3	$Sk \cong \frac{3t_{оп}/n + 2t_{L2} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2}{3t_{оп}/n + 2t_{L3} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2/k}$	n=128, t <sub>L2</sub> =12 τ, t <sub>оп</sub> =256 τ, t <sub>обч</sub> <sup>1</sup> =12 τ, t <sub>обч</sub> <sup>2</sup> =24 τ, t <sub>L3</sub> =40 τ S2=1.45; S3=1.85; S4=2.14.
Структурний конфлікт L3/ОП	$Sk \cong \frac{3t_{оп}/n + 2t_{L3} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2}{3t_{оп} + t_{обч}^1 + 15t_{обч}^2/k}$	m>1024 Прискорення відсутнє

Примітки:

k – кількість потоків; n – кількість ітерацій;

m – розмір квадратної сітки;

t<sub>L2</sub> – латентність кеш-пам'яті другого рівня;

t<sub>L3</sub> – латентність кеш-пам'яті третього рівня;

t<sub>оп</sub> – латентність оперативної пам'яті;

t<sub>обч</sub><sup>1</sup> – час обчислення першої порції операцій;

t<sub>обч</sub><sup>2</sup> – час обчислення другої порції операцій.

**Висновки.** 1. При виконанні потоків в рівних умовах коефіцієнти прискорення змінюються так:

1.97 - для двопоточності; 2.91 - для трьохпоточності; 3.82 = для чотирьохпоточності при виконанні всіх потоків з використанням кеш-пам'яті першого рівня L1D.

1.78 - для двопоточності; 2.39 - для трьохпоточності; 2.90 = для чотирьохпоточності при виконанні всіх потоків з використанням кеш-пам'яті другого рівня L2.

1.67 - для двопоточності; 2.15 - для трьохпоточності; 2.5 = для чотирьохпоточності при виконанні всіх потоків з використанням кеш-пам'яті третього рівня L3.

1.19 - для двопоточності; 1.27 - для трьохпоточності; 1.31 = для чотирьохпоточності при виконанні всіх потоків з використанням виключно оперативної пам'яті

2. Якщо потоки виконуються в нерівних умовах (структурні конфлікти є) коефіцієнти прискорення змінюються так:

Структурний конфлікт L1/L2 (один потік може виконуватися через L1, а вже 2, 3, 4 потоки будуть виконуватися через L2) - 1.65 - для двопоточності; 2.26 - для трьохпоточності; 2.78 для чотирьохпоточності.

Структурний конфлікт L2/L3 (один потік може виконуватися через L2, а вже 2, 3, 4 потоки будуть виконуватися через L3) – 1.45 - для двопоточності; 1.85 - для трьохпоточності; 2.14 - для чотирьохпоточності.

Структурний конфлікт L3/ОП (один потік може виконуватися через L3, а вже 2, 3, 4 потоки будуть виконуватися через оперативну пам'ять - прискорення відсутнє.

3. Наявність структурних конфліктів при використанні підсистеми кеш-пам'яті зменшує коефіцієнти прискорення.

4. Підтверджуються експериментальні дані тестів ефективності віртуальної двопоточності про досить значне можливе прискорення, так і про його відсутність.

5. Віртуальні трьох- та чотирьохпоточності ефективні.

**Загальні висновки.** Отримані аналітичні вирази для коефіцієнтів прискорення.

Вони підтверджують ефективність віртуальної багатопоточності при 2-х, 3-х, 4-х потоках в одному фізичному ядрі як при виконанні потоків в рівних, так і в нерівних умовах.

Добре корелюються з експериментальними даними тестів про ефективність віртуальної двопоточності та можливості відсутності прискорення.

Якщо при виконанні одного потоку використовується більше половини обсягу кеш-пам'яті третього рівня або необхідна інтенсивна робота з оперативною пам'яттю, використання віртуальної багатопоточності залежить від типу програм, які будуть виконуватися, і може бути недоцільним.

## Література

1. С.О. Шквар. Ефективність використання технології віртуальної багатопоточності при паралельному розв'язанні рівняння Пуассона. Вісник НАУ, Київ. 2012 N3 (101), том 2, С.138- 141.
2. Буділовський С. Simultaneous Multithreading (SMT) в топології AMD Ryzen 7 2700X: тестування в синтетичі і іграх. Постійний URL: [https://ru.gecid.com/cpu/simultaneous\\_multithreading\\_smt\\_v\\_amd\\_ryzen\\_7\\_2700x](https://ru.gecid.com/cpu/simultaneous_multithreading_smt_v_amd_ryzen_7_2700x)
3. Недзельський Д.О. Дослідження ефективності підсистеми генерації команд в ядрах сучасних процесорів. Луганськ: Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2017. - №8 (238), - С.64-66.
4. Недзельський Д.О., Сафонова С.О., Барбарук Л.В. Аналітичне дослідження ефективності ядер процесорів при наявності «перешкод» з використанням технології Hyper Threading Наукові вісті Даліського університету. Електронне наукове фахове видання. - 2021. - №21. doi: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-3>

## References

1. E.O. Shkvar Effectiveness of using virtual multithreading technology in parallel solution of Poisson's equation. Bulletin of NAU, Kyiv. 2012 N3 (101), T 2, pp. 138-141.
2. Budilovskyi S. Simultaneous Multithreading (SMT) in the top AMD Ryzen 7 2700X: testing in synthetics and games. Permanent URL: [https://ru.gecid.com/cpu/simultaneous\\_multithreading\\_smt\\_v\\_amd\\_ryzen\\_7\\_2700x](https://ru.gecid.com/cpu/simultaneous_multithreading_smt_v_amd_ryzen_7_2700x).
3. Nedzelskyi D.O. Study of the effectiveness of the command generation subsystem in the cores of modern processors. Luhansk: Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Darya, 2017. - N. 8 (238), - P.64-66.
4. Nedzelskyi D.O., Safonova S.O., Barbaruk L.V. Analytical study effectiveness processor cores in the presence of "interference" using Hyper Threading technology. Scientific news of Daliv University. Electronic scientific publication. - 2021. - No. 21. doi: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-3>

**Nedzelskyi D.O., Safonova S.O., Barabruk L.V. Research efficiency virtual multithreading (2, 3, 4 threads) type Hyper Threading when execution threads in the same and different conditions.**

*The article uses analytical methods with elements of the mass service theory to investigate the efficiency of the cores of modern processors using virtual multithreading of the Hyper Threading type with 2, 3, and 4 threads, taking into account the structural features of the core both when executing threads under the same conditions, and in different conditions. Under the same conditions, the execution of threads was considered when they used the same amount of cache memory levels. Under different conditions, situations were considered when threads were executed sequentially in conditions using available cache memory volumes, and parallel threads were executed in worse cache memory usage conditions (using a lower level of cache memory or even RAM).*

*Widely used and visual programs were selected for the study: "Multiplication of matrices", "Solution of differential equations in partial derivatives by the grid method". In the studied programs, the kernel was identified, information-dependent*

commands and reduction commands were specified, groups of commands were formed, their number and execution times of each group in the kernel program were determined, and the probabilities of occurrence of each group of commands were determined. A research methodology and a model of the core have been developed. The study used a two-phase simplified model of the processor core. The load factor of the universal functional device was determined and, depending on the value of various parameters of the program and the processor core, the utilization rate of the model control device was determined, the average execution time of the program core and the average utilization times of individual specialized functional devices were determined.

The results of studies with 2, 3 and 4 threads in the form of formulas in one physical core are given, both when threads are executed under the same conditions, and under different conditions. The effectiveness of virtual multithreading such as Hyper Threading with two, three, four threads with no structural conflicts and under different conditions - the presence of structural conflicts in the of cache memory - has been confirmed.

When performing threads under different conditions, the efficiency (acceleration factor) is less than when performing under equal conditions. If a single thread uses more than half of

the third-level cache memory or requires intensive work with RAM, then the use of virtual multithreading is inappropriate.

**Keywords:** multi-threaded virtuality, processor, core, instruction pipeline, interference, performance, efficiency.

**Недзельський Дмитро Олександрович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: nedzelsky@snu.edu.ua

**Сафонова Світлана Олександрівна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: safonova@snu.edu.ua

**Барбарук Ліна Вікторівна** – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: barbaruk\_a@snu.edu.ua

Стаття подана 19.10.2022

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-28-34>

УДК 681.5:69.001.5

## УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛА ЕКСТРУДЕРА МОБІЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ 3D-ДРУКУ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ СТРУКТУР

Грицюк В.Ю., Невлюдов І.Ш., Цимбал О.М.

## IMPROVING THE EXTRUDER UNIT DESIGN OF A MOBILE ROBOTIC PLATFORM FOR LARGE-SCALE STRUCTURES 3D PRINTING

Gritsyuk V. Yu., Nevliudov I. Sh., Tsybmal O. M.

Аддитивне виробництво має величезний потенціал у будівельній галузі, а також при виробництві та ремонті дорожніх покриттів. Робототехнічний 3D-друк великомасштабних структур дозволяє архітекторам і будівельникам значно розширити межі проектування конструкцій та підвищити ефективність їх будівництва. Мобільні платформи для 3D-друку дозволяють вирішити проблему обмеженого робочого простору. З метою підвищення ефективності та економічності мобільної робототехнічної платформи для технології 3D-друку великомасштабних структур пропонується вдосконалити конструкцію вузла екструдера. Це досягається шляхом об'єднання електродвигуна, шнекового екструдера та нагрівача в одному корпусі. Такий підхід дає економію маси та розмірів, а також суттєве підвищення коефіцієнту корисної дії та надійності системи за рахунок функціональної інтеграції та повного використання дисипативної складової енергії. Пропонований перетворювач для мобільної робототехнічної платформи використовує зовнішній ротор-шнєк, який одночасно виконує функції ротора асинхронного двигуна, нагрівального елемента, виконавчого механізму і захисного корпусу. Метою роботи є оцінка ефективності використання шнекового перетворювача у складі мобільної робототехнічної платформи для аддитивного виробництва. Для досягнення мети проведено кінцево-елементний розрахунок і аналіз просторового розподілу вихрових струмів на ділянці порожнистого феромагнітного ротора. За допомогою програмно-обчислювального комплексу Comsol Multiphysics отримано картини розподілу z-складової густини вихрових струмів, а також розподілу густини дисипованої потужності, що враховує всі види втрат в роторі. Характер розподілу густини дисипованої потужності в роторі істотно змінюється зі збільшенням частоти поля, що впливає на якість теплової дії на матеріал. Результати просторового розподілу вихрових струмів ротора дозволяють удосконалити конструкцію перетворювача, забезпечити задані значення температури та градієнта, які, своєю чергою, визначають механічні властивості матеріалу на виході пристрою.

**Ключові слова:** адитивне виробництво, мобільна робототехнічна платформа, чисельний розрахунок, будівництво, вузол екструдера, вихрові струми.

**Вступ.** Адитивне виробництво являє собою новий клас технологій, які забезпечують унікальні переваги при створенні конструкцій складної форми, що мають великий попит в багатьох сферах застосування [1-3]. Крім свободи дизайну, адитивне виробництво має величезний потенціал у будівельній галузі [4-6], а також при виробництві та ремонті дорожніх покриттів [7, 8]. Одна з проблем 3D-друку полягає в тому, що типові настільні принтери є стаціонарними та мають обмежений робочий простір. Мобільні робототехнічні платформи для 3D-друку все частіше впроваджуються в сфері архітектури та будівництва, дозволяючи вирішити цю проблему. Крім того, робототехнічний 3D-друк великомасштабних структур дозволяє архітекторам і будівельникам значно розширити межі проектування конструкцій та підвищити ефективність їх будівництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [4] співробітники Массачусетського технологічного інституту представили великомасштабну цифрову будівельну платформу (DCP) для зондування, аналізу та цифрового виробництва на місці. Цей дослідницький проект складається із системи з 5-осьовою гідравлічною мобільною стрілою Altec, прикріпленою до 6-осьової роботизованої руки KUKA. Подібно до біологічної моделі людського плеча і руки, ця система використовує велику стрілу для загального позиціонування і маленьку роботизовану руку для точного позиціонування та корекції коливань. Платформа базується на вантажному автомобілі, що має вантажопідйомність 1500 фунтів та ма-

ніпуляційну здатність 20 фунтів. Розробники повідомляють про потенційні переваги проекту, включаючи виготовлення нестандартних архітектурних форм, інтеграцію даних зондування на місці в режимі реального часу, підвищення ефективності будівництва, підвищену роздільну здатність, зниження кількості похибок та підвищення безпеки. Платформ DCP розроблена як платформа для проектування та будівництва, що дозволяє визначати, проектувати та створювати високоінтегровані архітектурні конструкції. Розширені можливості автоматизації синхронізованих виробничих послідовностей створюють можливість розробки переплетеного набору взаємозв'язків між структурними, архітектурними та екологічними системами, що, своєю чергою, забезпечує справжню інтеграцію споруди. Це досягається за рахунок універсальності DCP та здатності створювати петлі зворотного зв'язку між процесами зондування у реальному часі. В майбутньому платформа буде оснащена механічними і сенсорними системами. Друга версія DCP використовує як платформу гусеничний електромобіль і застосовується для екструзії піни при заливанні стін, що аналогічно методу блокового будівництва.

У дослідженні [5] автори розробили систему мобільного друку, що складається з двох роботизованих маніпуляторів на мобільній базі (рис. 1), яка друкує цементні об'єкти досить великого розміру. Як правило, будівельні матеріали, ширина яких більша, ніж відстань до опори системи будівельного 3D-друку, не можуть бути надруковані. Це пов'язано з тим, що розміри друківаної конструкції обмежені одним з трьох факторів: досяжністю маніпулятора робота, обмеженням об'ємом або каркасом, що дозволяє голівці рухатися вздовж певної осі. Але розробники дозволили системі рухатися у будь-якому напрямку, поки вона знаходиться на плоскій поверхні, встановивши промисловий робот-маніпулятор на колісну базу. Потім, за допомогою шлангу фланцеве сопло маніпулятора платформи з'єднується з насосом. Рухи робота-маніпулятора та мобільної платформи ретельно плануються для досягнення скоординованих зусиль. Він використовує управління рухом зі зворотним зв'язком і високоточну локалізацію робота, щоб переконаватися, що сопло укладає бетон у потрібному темпі та у потрібному місці. Розміщуючи камеру на задній частині мобільної бази, її «система локалізації» краще працює на більшій площі поверхні.

Дослідники стверджують, що їхня система друку під час руху може збільшити розмір конструкцій, які може виготовити один робот. Щоб довести це, вони використовували мобільну платформу для 3D-друку цільної бетонної конструкції розміром 210 см × 45 см × 10 см, що безумовно більше, ніж 87-сантиметрова досяжність робота-маніпулятора. Ця система може значно підвищити ефективність 3D-друку будівельних конструкцій. Але ця робота ще не завершена, оскільки система має деякі обмеження, особливо щодо нерівномірності робочих зон.



Рис. 1. Система мобільного друку з використанням роботизованих маніпуляторів на мобільній базі

Дослідники Інституту передової архітектури Каталонії представили ідею мобільного 3D-друку, де застосовуються три окремі системи для друку архітектурних конструкцій з використанням цементу [6]. Minibuilders – це, по суті, процес екструзії багаточастикового матеріалу (рис. 2). Ця технологія вже добре зарекомендувала себе як у 3D-друку загалом (відома як моделювання наплавлення або FDM), так і в її варіантах у масштабі конструкції. Minibuilders відрізняється від інших процесів дуже інноваційним і зовсім іншим підходом до фактичного друку конструкції. У той час, як в інших технологіях використовуються портали або роботи-маніпулятори, які переміщують сопло навколо друківаної поверхні, в Minibuilders використовується група невеликих роботів, які працюють разом і навіть піднімаються на поверхню конструкції під час її друку.



Рис. 2. Застосування окремих систем для 3D-друку конструкцій з використанням цементу

Технологія адитивного виробництва Pylos є процесом екструзії шаруватих матеріалів. Це процес моделювання методом наплавлення (FDM) у масштабі конструкції, досить відомий процес настільних принтерів, де матеріал у рідкій формі видавлюється через маленьке сопло у вигляді безперервного потоку чи нитки. Потім матеріал твердне на друківаній поверхні і стає готовий до друку наступного шару. У його настільному аналогу використовується розплавлений пластик, який плавиться при проходженні через гаряче сопло, а потім твердне при охолодженні після нанесення на поверхню.

Процес масштабування в будівництві абсолютного протилежний. Тут матеріал на основі цементу, зазвичай розчин або паста змішується безпосередньо перед подачею в машину. Ще рідкий матеріал видавлюється через просту насадку, яка лише допомагає формувати та спрямовувати матеріал. Коли матеріал досягає поверхні друку, він починає тверднути сам по собі в результаті реакції з повітрям, яка відома як затвердіння. Цей процес має значний рівень чутливості, тому що затвердіння не повинно бути повністю завершено до того, як буде надруковано наступний шар, щоб забезпечити хороше зчеплення між шарами, але воно також має бути достатнім, щоб витримати вагу наступного шару (або шарів). Цьому процесу притаманно те, що екструзійне сопло встановлене на декількох різних роботах, які менші за розміром і переміщуються навколо або поверх вже надрукованих частин конструкції. Інші типи будівельних 3D-принтерів намагаються збільшити свій розмір, щоб мати можливість друкувати конструкції в архітектурних масштабах. Цей підхід має велику перевагу, дозволяючи принтеру бути меншим, ніж об'єкт, який він друкує, уникаючи проблеми обмеження розміру. Процедура друку (рис. 3) починається з перетворення файлу конструкції 3D-моделі на шлях і параметри конкретного робота-принтера в процесі друку. Це робиться за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке генерує серію кривих для кожного робота, якими він рухається при створенні різних частин об'єкта. Ці криві, що створюються одна над одною, є фактичними шарами об'єкту. Товщина цих шарів залежить від різних факторів, включаючи швидкість екструзії та тип використовуваного матеріалу, оскільки всі матеріали поведуться по-різному під вагою нанесених зверху шарів.

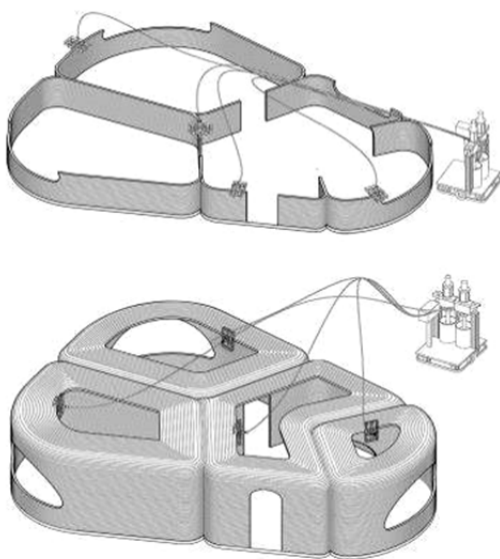


Рис. 3. Процедура друку з використанням роботів Minibuilders

Роботи Minibuilders створюють шари товщиною приблизно 6 мм, що можна регулювати за допомогою швидкості руху принтерів. Програмне забезпечення перетворює ці вигнуті шляхи в сигнали управління пристроєм, які передаються на зовнішній контролер (ПК або інший пристрій). Контролер управляє рухом і соплом для кожного робота і укладає шари відповідно до вигнутих траєкторій. Друк усієї конструкції розділений на три секції, в кожній з яких працює спеціальний робот. Всі три типи роботів підключені до більшого головного блоку, який керує ними та постачає матеріал. Як тільки останню частину або шар надруковано, процес завершується.

Відповідно до концепції «саморемонтованих міст» [7, 8], парк автономних транспортних засобів і дронів скануватиме дороги у пошуках тріщин, і усуватиме їх до того, як з'являться вибоїни. Виявивши тріщину на дорозі, робот із 3D-принтером зможе помістити асфальт у тріщину, щоб її відремонтувати, і все це протягом хвилини. Такий підхід може застосовуватися вночі, щоб уникнути перекриття доріг, які можуть порушити рух транспорту. Апарат в цілому заснований на настільному RepRap-принтері Mendel 90, але оснащений спеціальним екструдером та соплом із високотемпературного фотополімеру. Друк виконується бітумною крихтою з частинками міліметрового розміру, що засипається у бункер, нагрівається і продавлюється через сопло за допомогою шнека. Вузол екструдера має внутрішню нагрівальну втулку. Гранули розм'якшуються, коли вони проходять через шнек, за рахунок підвищення температури через дію нагрівальних резисторів, що призводить до витікання рідкого бітуму із сопла, як показано на рис. 4, а. Крокові двигуни, температура, градієнт та швидкість обертання шнека контролюються простою електронікою, підключеною до ПК (рис. 4, б). Покращені механічні властивості є функцією температури, що, можливо, пов'язано з мікроструктурними змінами в асфальті. Це призводить до утворення волокон, які перекривають тріщини, що підвищує ударну в'язкість.

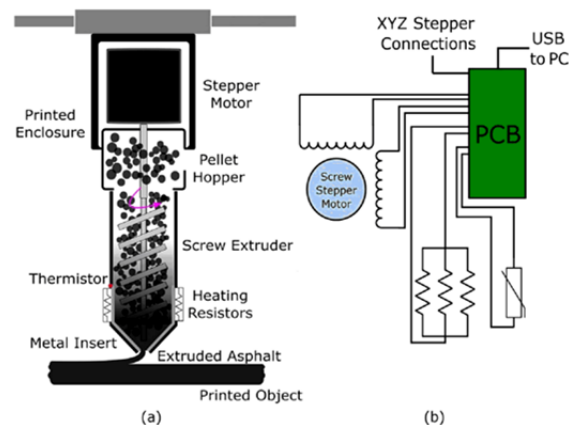


Рис. 4. Конструкція системи: а – конструкція екструдера; б – управляюча електроніка

У ході експериментів автори [7] встановили, що температура від 125 °С до 135 °С є оптимальною для створення безперервної екструзії асфальту з постійною шириною лінії. За їхніми прогнозами парк автономних транспортних засобів забезпечить функціонування нової економічної моделі, що лежить в основі міської інфраструктури, яка принесе користь суспільству. А покращені та налаштовувані властивості 3D-друкованого асфальту у поєднанні з гнучкістю та ефективністю платформи забезпечать передовий підхід до обслуговування об'єктів міської інфраструктури.

Окрім доріг, це дозволить змінити спосіб ремонту важкодоступних конструкцій, таких як плоских дахів будівель та інших споруд. Перевага цього методу полягає не тільки у можливості скоротити витрати (інші методи ремонту часто вимагають зведення будівельних риштувань та закриття або відключення інфраструктури для отримання доступу), але й у тому, що ремонт можна розпочати раніше, до того, як відбудеться масштабне зношування.

Ефективність технології 3D-друку великомасштабних структур можна підвищити за рахунок об'єднання електродвигуна, шнекового екструдера і нагрівача в одному корпусі. Це дозволить зменшити масу та розміри, а також значно підвищити ККД та надійність системи за рахунок функціональної інтеграції та повного використання дисипативної складової енергії. Потреба в сторонніх джерелах тепла зменшується або взагалі зникає, а поверхня електромеханічного перетворювача повністю занурена у речовину здатна передавати їй максимальну кількість теплової та механічної енергії.

Працездатність ідеї об'єднання електродвигуна та робочого органу була продемонстрована багатьма дослідниками, у тому числі авторами статті [9], які показали переваги енергоефективного промислового міксеру для виробництва бетону. Міксер створений на базі синхронного двигуна з масивним феромагнітним ротором та постійними магнітами. Лопаті, що призначені для перемішування розташовуються одразу на валу виключаючи наявність додаткової механічної передачі.

Пристрої такої конструкції виконують обертальний і лінійний рух одночасно, а також мають модульну структуру (рис. 5), яка може включати будь-яку кількість модулів із загальною трифазною обмоткою [10-13].

Як правило, вони використовуються для перемішування та свердління [14], однак, їхнє потенційне застосування варіюється від верстатів до робототехніки та різних пристроїв, що використовуються для складання, захоплення, переміщення, упаковки, струшування [11, 15].

Щоб наочно порівняти із звичайним електродвигуном, що використовується в промислових міксерах, був обраний асинхронний двигун з еквівалентною механічною потужністю, номінальними обертами та крутним моментом.

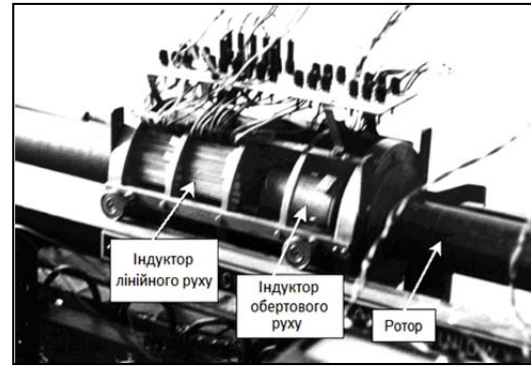


Рис. 5. Двостаторний обертально-лінійний електромеханічний перетворювач

Кількість споживаної двигунами енергії залежала від трьох чинників: робочого часу ( $t$ ), навантаження ( $P$ ) і ККД ( $\eta$ ). Співвідношення між ними розраховувалося наступним чином:

$$W = (t \cdot P) / \eta.$$

Коефіцієнт корисної дії електродвигуна з масивним ротором (рис. 6) при повному завантаженні становив 94%, а для асинхронного двигуна наближався до 87%.

Порівняльний аналіз результатів ґрунтується на публікації, що була представлена на конференції з промислового та комерційного використання енергії [16]. Варто наголосити, що вказаний порівняльний аналіз електродвигунів не враховує теплові втрати в масивному роторі та статорі, які доцільно використовувати для розігріву та зменшення в'язкості робочого матеріалу [17, 18].

Слід відзначити значні наукові здобутки зарубіжних авторів в сфері дослідження електромагнітних і теплових процесів у таких перетворювачах. Значна кількість публікацій серед яких [19-21], присвячені дослідженню фізичних полів в активній зоні електромеханічних перетворювачів із феромагнітним ротором за допомогою чисельних методів.

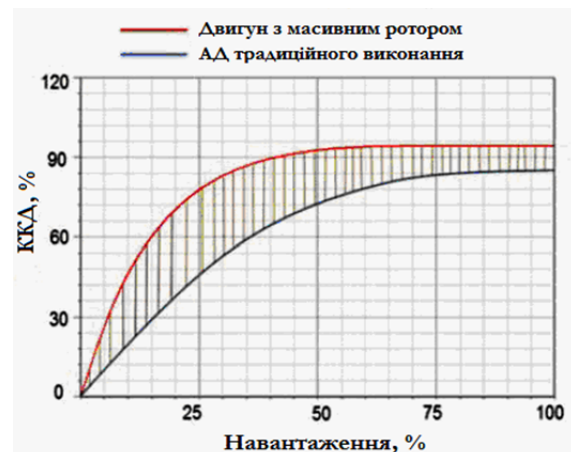


Рис. 6. Значення ККД для двигуна з масивним ротором і асинхронного двигуна традиційного виконання

Таким чином, для підвищення ефективності, економічності та універсальності пристроїв, які забезпечують операції транспортування, перемішування, пресування та нагрівання, важливе значення має їх використання як ланок технологічного ланцюга. Як альтернатива вищезазначеним підходам пропонується мобільна робототехнічна платформа, оснащена шнековим електромеханічним перетворювачем (екструдером). Пропонований перетворювач використовує зовнішній ротор-шнек, який одночасно виконує функції ротора асинхронного двигуна, нагрівального елемента, виконавчого механізму та захисного корпусу [22]. Отже, з урахуванням «корисних» втрат електромагнітної системи, ККД електромеханічного перетворювача збільшується до 98-99 %.

У шнековому перетворювачі використовується принцип саморегулювання при перетворенні енергії, згідно з яким розподіл на корисні потоки теплової та механічної енергії здійснюється відповідно до величини поточного ковзання, яка залежить від співвідношення електромагнітних моментів двигунового та гальмівного модулів. При під'єднанні обмотки статора двигунового модуля до джерела живлення, створюється магнітне поле, яке обертається. Це поле діє на прилеглу зону зовнішнього феромагнітного ротора, в якій за законом електромагнітної індукції наводяться вихрові струми (ВС). У результаті цього формується електромагнітний момент. Основним режимом роботи вважається протилежний напрямок обертання полів, при якому гальмівний модуль працює при ковзанні  $s_2 > 1$ , тобто в режимі електромагнітного гальмування.

**Мета статті.** Для оцінки ефективності використання електромеханічного перетворювача у складі мобільної робототехнічної платформи для промислового 3D-друку необхідно виконати аналіз розподілу вихрових струмів у феромагнітному роторі як основних джерел тепловиділень. Це буде слугувати важливою інформацією для прогнозування оптимальних значень температури, градієнта та швидкості обертання. У свою чергу, ці значення будуть визначати механічні властивості матеріалу на виході пристрою.

В роботі своє втілення отримала тривимірна модифікація кінцево-елементної моделі, що реалізована в рамках програмно-обчислювального комплексу Comsol Multiphysics. Цей комплекс відноситься до найбільш апробованих і доступних програмних продуктів, що реалізують метод кінцевих елементів. Розрахунок тривимірного розподілу ВС виконано на ділянці ротора для двигунового модуля експериментального зразка шнекового перетворювача. Тривимірною геометрією моделі складається з наступних розрахункових ділянок: порожнистого зовнішнього ротора, зубчастого магнітопроводу статора, повітряного зазору та обмотки статора. Кутова частота обертання ротора визначається як частота джерел поля відповідно до роторної системи координат. Питома електрична провідність матеріалу ротора приймала-

ся відповідно довідкових даних з урахуванням усередненої температури при робочому ковзанні двигунового модуля  $s = 0,88$ . Нелінійність магнітних властивостей масивного ротора та сердечника статора враховується завданням відповідних кривих намагнічування. Джерела поля задаються сторонньою густиною струму на ділянках пазів статора згідно трифазної схеми з'єднання обмотки.

**Результати досліджень.** Результат розв'язання польової задачі у вигляді тривимірного розподілу ВС показано на рис. 7. Одиночний поперечний зріз порожнистого ротора наведено для величини ковзання  $s = 0,88$  ( $n_2 = 90$  об./хв.). Зріз виконаний у «крайовій» зоні порожнистого циліндра, а зафарбуванням різного кольору та інтенсивності визначається величина z-складової густини ВС. На цьому ж рисунку показано лінію, вздовж якої виконано зріз стінки ротора, представлений на рис. 8.

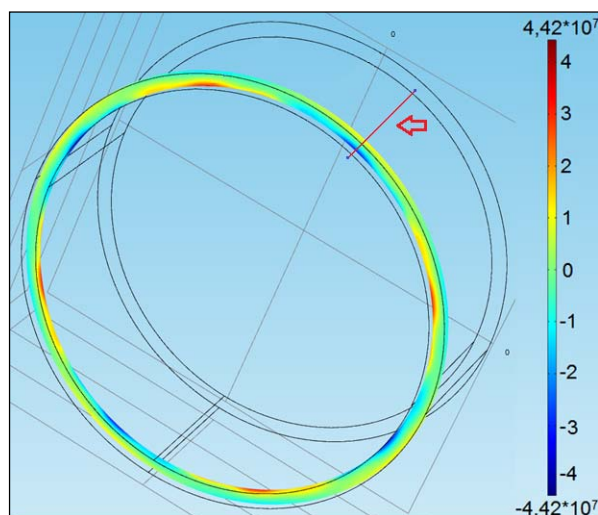


Рис. 7. Розподіл z-компоненти густини ВС у поперечному перерізі зовнішнього порожнистого ротора при  $s = 0,88$  ( $A/m^2$ )

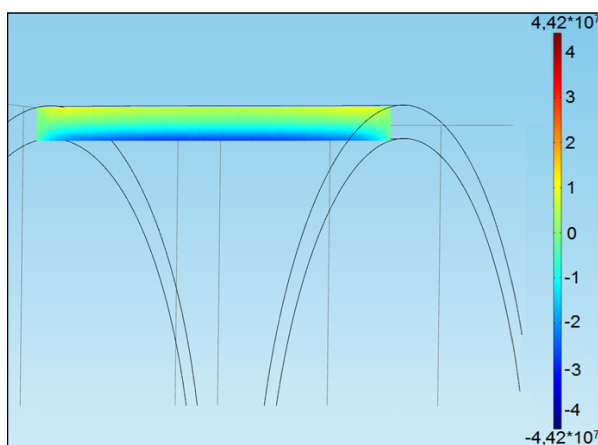


Рис. 8. Розподіл z-компоненти густини ВС у стінці зовнішнього порожнистого ротора при  $s = 0,88$  ( $A/m^2$ )

Найбільше значення нормальної компоненти густини ВС трохи перевищує максимальну величину ( $4,42 A/mm^2$ ) z-компоненти для  $s = 0,88$ . Основ-

ним джерелом теплової потужності є шар внутрішньої поверхні ротора (4-5 мм), обернений у бік дже-рела електромагнітного поля.

Картину розподілу густини дисипованої потужності, що враховує усі види втрат у роторі представлено на рис. 9. Переважно, густина дисипованої потужності на зовнішній поверхні ротора знаходиться у межах  $(10,5-20) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>3</sup>.

Значний перепад густини дисипованої потужності між внутрішньою та зовнішньою поверхнями ротору в робочих умовах не є критичним. Теплова енергія ротора активно передається навколишньому матеріалу, а температурний градієнт у напрямку товщини стінки циліндра залишатиметься невеликим [18].

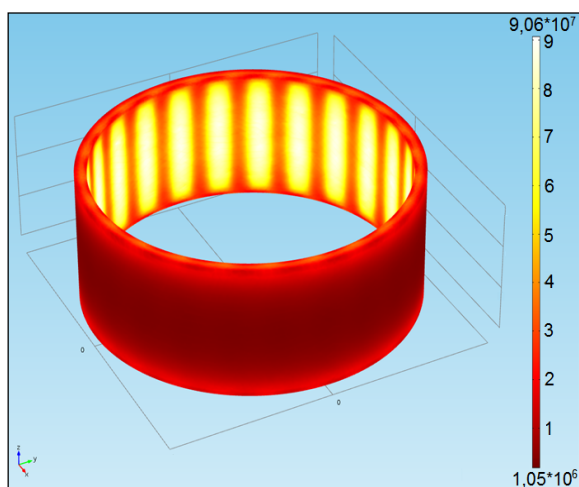


Рис. 9. Розподіл густини потужності у зовнішньому порожнистому роторі при  $s = 0,88$  (Вт/м<sup>3</sup>)

Зазначимо, що характер розподілу густини дисипованої потужності в роторі істотно змінюється зі збільшенням частоти поля, що впливає на якість теплової дії на матеріал. Це зумовлено зміною конфігурації контурів протікання ВС, ймовірно, через зменшення глибини проникнення електромагнітного поля, а також впливу крайового ефекту.

**Висновки.** Підвищення ефективності та економічності мобільної робототехнічної платформи для технології 3D-друку великомасштабних структур досягається шляхом об'єднання електродвигуна, шнекового екструдера та нагрівача в одному корпусі. Такий підхід дає економію маси та розмірів, а також суттєве підвищення ККД та надійності системи за рахунок функціональної інтеграції та повного використання дисипативної складової енергії. Оцінка рівнів густини дисипованої потужності на поверхні ротора дозволяє говорити про перспективи запропонованого підходу з удосконалення конструкції вузла екструдера мобільної робототехнічної платформи для 3D-друку великомасштабних структур.

## References

1. Yuk H., Lu B., Qu K., Xu J., Zhao X., Lin S., Luo J. 3D printing of conducting polymers. / H. Yuk, B. Lu, K. Qu, J. Xu, X. Zhao, S. Lin, J. Luo // *Natural Communication*. – 2020. Vol. 11, article number 1604.
2. Jankovics D. Customization of automotive structural components using additive manufacturing and topology optimization. / D. Jankovics // *IFAC-PapersOnLine*. – 2019. Vol. 52(10). – P. 212-217.
3. Wohlers T.T., Campbell I., Diegel O., Huff R., & Kowen J. Wohlers report 2020: 3D printing and additive manufacturing state of the industry. / T.T. Wohlers, I. Campbell, O. Diegel, R. Huff, & J. Kowen // Fort Collins: Wohlers Associates. – 2021.
4. Keating S., Spielberg N.A., Klein J., Oxman N. A compound arm approach. *Robotic Fabrication in Architecture*. / S. Keating, N.A. Spielberg, J. Klein // Oxman N. Dordrecht: Springer. – 2014. P. 99-110.
5. Efe Tiryaki M., Zhang X., Pham Q.C. Printing-while-moving: A new paradigm for large-scale robotic 3D Printing. / M. Efe Tiryaki, X. Zhang, Q.C. Pham // *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*. – 2018. Vol. 4. P. 2286-2291.
6. Hall N. IAAC Minibuilders small robots with big ambitions. *3D Print Ind, WA*. [Elektronic resurs] / IAAC. 2016. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/iaac-minibuilders-small-robots-big-ambitions-83257/>.
7. Jackson R.J., Wojcik A., Miodownik M. 3D printing of asphalt and its effect on mechanical properties / R.J. Jackson, A. Wojcik, M. Miodownik // *Materials & Design*. – 2018. Vol. 160. P. 468-474.
8. Johansson A. 3D printing robot may be the solution to potholes, PSFK. [Elektronic resurs] / A. Johansson URL: <https://www.psfk.com/print-post?format=pdf&id=322046>.
9. Dobzhanskyi O., Amiri E., Gouws R. Comparison analysis of electric motors with two degrees of mechanical freedom: PM synchronous motor vs induction motor. / O. Dobzhanskyi, E. Amiri, R. Gouws. // *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*. – 2016. P. 14-17.
10. Alwash J.H., Qaseer L.J. Three-dimension finite element analysis of a helical motion induction motor. / J.H. Alwash, L.J. Qaseer // *ACES*. – 2010. Vol. 25, No 8. P. 703-712.
11. Bolognesi P. A novel rotary-linear permanent magnets synchronous machine using common active parts. / P. Bolognesi // *15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. – 2010. P. 1179-1183.
12. Bentia I., Szabo L. Rotary-linear machines / I. Bentia, L. Szabo // *A survey. Journal of Computer Science and Control Systems*. – 2010. Vol. 3. P. 11-14.
13. Zhao J., Liu X., Xin Z., Han Y. Research on the energy-saving technology of concrete mixer trucks. / J. Zhao, X. Liu, Z. Xin, Y. Han // *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Xi'an. – 2009. P. 3551-3554.
14. Szczygieł M., Kluszczyński K. Rotary-linear induction motor based on the standard 3-phase squirrel cage induction motor – constructional and technological features. / M. Szczygieł, K. Kluszczyński // *Czasopismo Techniczne. Elektrotechnika*. – 2016. Vol. 1. 395-406.
15. Bolognesi P., Bruno O., Landi A., Sani L., Taponecco L. Electromagnetic actuators featuring multiple degrees of freedom: A survey. / P. Bolognesi, O. Bruno, A. Landi, L. Sani, L. Taponecco. // *16th International Conference on Electrical Machines*. – 2004. P. 1-6.

16. Dobzhanskyi O., Gouws R. 3-D Finite element method analysis of twin-armature permanent magnet motor with two degrees of mechanical freedom. / O. Dobzhanskyi, R. Gouws. // Springer Electrical Engineering. – 2017. Vol. 99, No. 3. P. 997–1004.
17. Zablodskiy M., Zhiltsov A., Kondratenko I., Gritsyuk V. Conception of efficiency of heat electromechanical complex as hybrid system. / M. Zablodskiy, A. Zhiltsov, I. Kondratenko, V. Gritsyuk // Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – 2017 P. 399–404.
18. Zablodskiy N., Pliugin V., Gritsyuk V. Submersible electromechanical transformers for energy efficient technologies of oil extraction. / N. Zablodskiy, V. Pliugin, V. Gritsyuk // Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. – 2014. Vol. 9. P. 223–227.
19. Gieras J.F. Performance calculation for a high-speed solid-rotor induction motor / J.F. Gieras // IEEE transactions on industrial electronics. – 2012. – Т. 59. – № 6. – P. 2689–2700.
20. Aho T. Experimental and finite element analysis of solid rotor end effects / T. Aho, J. Nerg, J. Pyrhonen // Industrial Electronics. – 2007. P. 1242–1247.
21. Papini L. Analytical-numerical modelling of solid rotor induction machine / L. Papini, C. Gerada // Electrimacs. – 2014. P. 121–126.
22. Zablodskii N.N., Plyugin V.E., Gritsyuk V.Y., Grin G.M. Polyfunctional electromechanical energy transformers for technological purposes / N.N. Zablodskii, V.E. Plyugin, V.Y. Gritsyuk, G.M. Grin // Russian Electrical Engineering. – 2016. Vol. 87. P. 140–144.

**Gritsyuk V.Yu., Nevliudov I.Sh., Tsymbal O.M. Improving the extruder unit design of a mobile robotic platform for large-scale structures 3D printing.**

*Additive manufacturing has huge potential in the construction industry, as well as in the production and repair of road surfaces. Robotic 3D printing of large-scale structures allows architects and builders to significantly expand the boundaries of structural design and increase the efficiency of their construction. Mobile 3D printing platforms solve the problem of limited workspace. To improve the efficiency and cost-effectiveness of a mobile robotic platform for 3D printing technology of large-scale structures, it is proposed to improve the design of the extruder assembly. This is achieved by com-*

*binning the electric motor, auger extruder and heater in one housing. This approach provides savings in weight and size, as well as a significant increase in the efficiency and reliability of the system due to functional integration and full use of the dissipative component of energy. The proposed converter for a mobile robotic platform uses an external auger rotor, which simultaneously performs the functions of an asynchronous motor rotor, a heating element, an actuator and a protective housing. The goal of the work is to evaluate the efficiency of auger converter using as part of a mobile robotic platform for additive manufacturing. To achieve the goal, a finite element calculation and analysis of the spatial distribution of eddy currents in the area of a hollow ferromagnetic rotor was performed. The distribution patterns of the eddy current density z-component, as well as the distribution of the dissipated power density, taking into account all types of losses in the rotor, are obtained using the Comsol Multiphysics software and computing system. The distribution nature of the dissipated power density in the rotor changes significantly with an increase in the field frequency, which affects the quality of the thermal effect on the material. The results of the spatial distribution of the eddy currents of the rotor will improve the design of the converter, provide the specified values of temperature and gradient, which in turn determine the mechanical properties of the material at the output of the device.*

**Keywords:** additive manufacturing, mobile robotic platform, numerical calculation, construction, extruder unit, eddy currents.

**Грицюк В.Ю.** – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки, [volodymyr.hrytsiuk@nure.ua](mailto:volodymyr.hrytsiuk@nure.ua)

**Невлюдов І.Ш.** – д.т.н., завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки, [igor.nevliudov@nure.ua](mailto:igor.nevliudov@nure.ua)

**Цимбал О.М.** – д.т.н., професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки, [oleksandr.tsymbal@nure.ua](mailto:oleksandr.tsymbal@nure.ua)

Стаття подана 15.10.2022.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-35-39>

УДК 62-83

## STUDY OF THE DYNAMICS OF THE MOVEMENT MECHANISM OF AN OVERHEAD CRANE AS A COMPLEX ELECTROMECHANICAL SYSTEM

Rudniev Y.S., Romanchenko J.A., Linevich A.O.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНУ ЯК СКЛАДНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Руднів Є.С., Романченко Ю.А., Лінєвич А.О.

*The article studies the dynamics of the crane movement mechanism to take measures for their reliable operation and reduce the wear of movement mechanisms. For this, the following assumptions are accepted: transverse motion is not considered, the dynamics of engines and electric drive is not considered; the crane is presented in the form of a seven-mass system, the load suspension is adopted as rigid.*

*It has been established that account of flexibility of the rope, with which the load is suspended, does not significantly affect (no more than 10%) the values of the largest dynamic loads in elastic connections; therefore, when determining the loads in the elastic connections of the movement mechanisms, it is possible to use a system with an elastic mechanism and a rigid suspension of the load. The processes in the movement mechanisms of load-lifting cranes are considered, using the calculated seven-mass dynamic scheme of structures. During the mechanism operation the oscillations occur in its metal structures and transmission shafts, in addition, the load sways (which, together with a rope of length  $L_s$ , forms a pendulum with a moving suspension point).*

*The graphs show the forces in the longitudinal, transverse beams of the crane and the linear speeds of wheels, with an external force applied to each wheel of 21700 N. All three types of oscillations have different frequencies, which allows them to be considered on simpler two-mass models. But when using synchronous rotation systems (SRS) on the movement mechanism, which are often prone to oscillations, the proposed model is better suited, because it takes into account the interaction of the SRS and the mechanism at different vibration frequencies. With these loads, the mismatch of the path of the sides  $\Delta x_c$  does not exceed 0,025 m, the relative swing of the load  $x_1$  is not more than 0,25 m.*

*The article found that according to the seven-mass model, when a driving force is applied, mechanical oscillations arise in which three frequencies of interaction are observed. For the crane designs discussed in the article, these frequencies are 0,2, 0,95 and 6,4 Hz; to study a more complete picture of the processes, it is necessary to consider the transverse displacement of the crane and the dynamics of electric drive movement.*

*The parameters of the calculated scheme for output data of the bridge are determined. Based on obtained results the calculated scheme of crane movement mechanism was constructed. The system is converted into a three-axle, the first of which is*

*the rotor of engine, the second - the first gear together with the coupling, and the third - the axle with two gears.*

**Keywords:** overhead crane, elasticity, design, load suspension, dynamic load, oscillations, force.

**Introduction.** Overhead cranes are widely used in mechanical engineering, metallurgical production, nuclear power plants and other industries. Overhead cranes are heavily loaded machines, their daily load reaches 70-80%, the load capacity is 75-85% of the nominal, the actual operating mode of the cranes is often overestimated compared to the standard. Despite the fact that the designs of overhead cranes have been improved for many years, premature failures of the crane system (crane-crane runaway) still occur. In addition to operational and technological causes of failures (unscheduled maintenance, violations of operating rules, etc.), design imperfections of crane assemblies can serve as causes. The most characteristic causes and consequences of premature failures include the short service life of crane wheels and crane rails, fatigue failure of end beams, destruction of low-speed shafts of movement mechanisms with mounted gearboxes, loosening and wear of the track gauge, wheel derailment [1].

**The objective.** The role of technological cranes that presented in modern steelmaking can hardly be overestimated, their number in a converter shop can reach several dozen. To take measures for their reliable operation and reduce the wear of movement mechanisms, it is necessary to study the dynamics of the crane movement mechanism, which is an objective of this work.

**Research results.** The following assumptions are accepted: transverse motion is not considered, the dynamics of engines and electric drive is not considered; the crane is presented in the form of a seven-mass system, the load suspension is adopted as rigid. It has been established [2] that account of flexibility of the rope, with which the load is suspended, does not significantly

affect (no more than 10%) the values of the largest dynamic loads in elastic connections; therefore, when determining the loads in the elastic connections of the movement mechanisms, it is possible to use a system with an elastic mechanism and a rigid suspension of the load.

To consider the processes in crane movement mechanism, we will depict the structural elements in the diagram. The calculated seven-mass dynamic scheme of the movement mechanism is shown in article [3]. It contains: two reduced masses  $m_{1k}$ ,  $m_{2k}$  of impellers (with electric motors), two reduced masses of idle wheels  $m_{3k}$ ,  $m_{4k}$ , masses  $m_1$ ,  $m_2$  of the crane end beams (the mass of the crane cross beam is evenly distributed between  $m_1$  and  $m_2$ , the mass of the cart is taken into account in mass  $m_2$ ), mass of cargo  $m_3$ ; elastic connections are taken into account by the stiffness coefficients:  $c_{12}$  – the transverse beam of the crane,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  – halves of the end beams of the crane;  $L_s$  – the length of the suspension of the load;  $F_{12}$  – elastic force in the cross beam of the crane;  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$  – forces in the end beams of the crane;  $V_{1k}$ ,  $V_{2k}$ ,  $V_{3k}$ ,  $V_{4k}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  – linear speeds of the crane wheels and central points 1, 2 of the end beams of the crane bridge;  $x_l$  – linear movement of the load relative to the point 2 of the load suspension;  $\Delta\varphi$  – skew angle of the transverse beam of the crane.

During the mechanism operation the oscillations occur in its metal structures and transmission shafts (due

to the presence of an elastic connection between the masses  $m_1$  and  $m_2$ ), in addition, the load sways (which, together with a rope of length  $L_s$ , forms a pendulum with a moving suspension point). Dynamic loads in elastic connections of movement mechanisms can exceed static loads by 3÷7 or more times [4, 5], and pendulum oscillations of the load cause uneven movement of cranes movement mechanisms or trolleys and create inconvenience during their operation.

To solve the above problems, an appropriate crane control system is needed, which would ensure the synchronism of the movement of the crane longitudinal beams. But often synchronous rotation systems tend to oscillate, so their interaction with the movement mechanism is of great interest. To study such interaction, a model of the movement mechanism is needed, built on the basis of the calculation scheme in one of the applied modeling packages, for example, in MATLAB and SIMULINK. The data of a bucket crane with a lifting capacity of 100 tons of the converter shop of the Alchevsk Steel Works ( $m_{1k} = m_{2k} = m_{3k} = m_{4k} = 31250$  kg,  $m_1 = 42500$  kg,  $m_2 = 127500$  kg,  $m_3 = 100000$  kg,  $c_{12} = 2.5 \cdot 10^6$  N\*m,  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 20 \cdot 10^6$  N\*m,  $L_s = 5$  m, friction coefficient  $k_{fr} = 0,0062$ ). The graphs show the forces in the longitudinal (Fig. 1,a), transverse (Fig. 1,b) beams of the crane and the linear speeds of wheels 1, 2 (Fig. 1,c), with an external force applied to each wheel of 21700N.

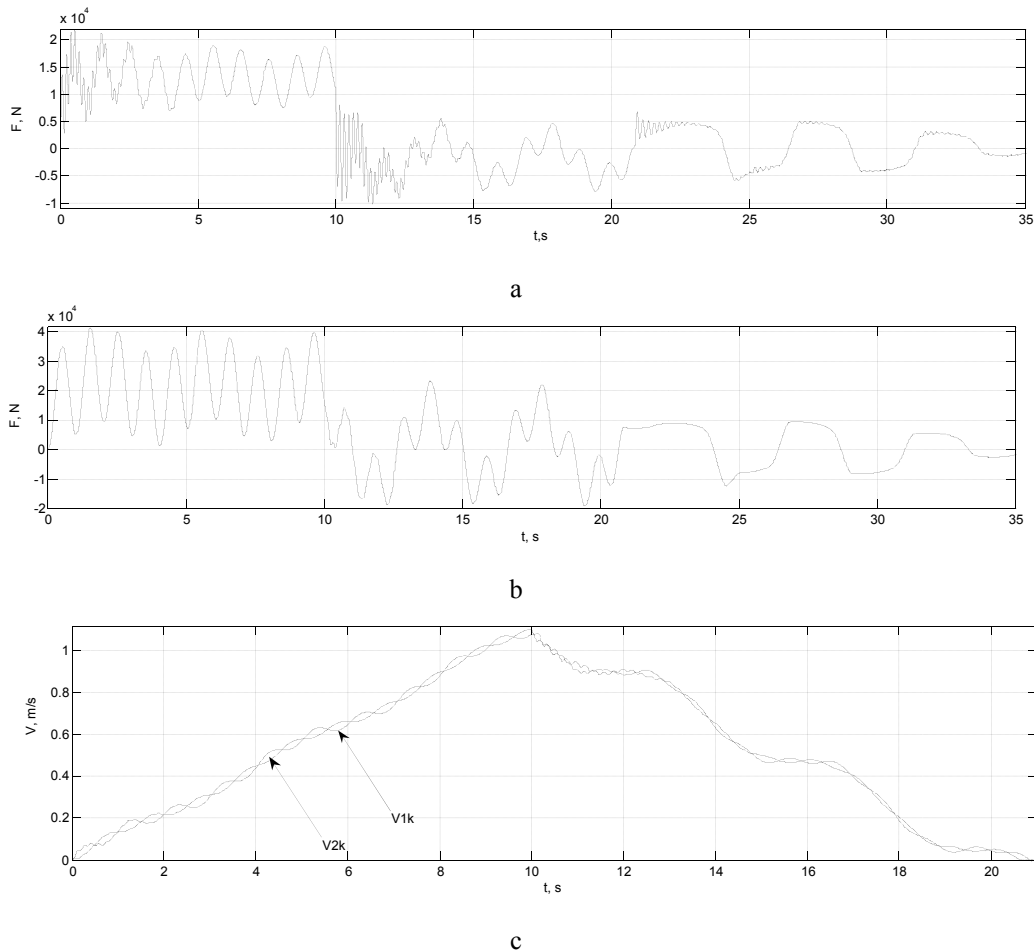


Fig. 1. Graphs:

a – elastic force  $F_1$  in the longitudinal beam; b – elastic force  $F_{12}$  in the transverse beam; c – wheel speeds  $V_{k1}$ ,  $V_{k2}$

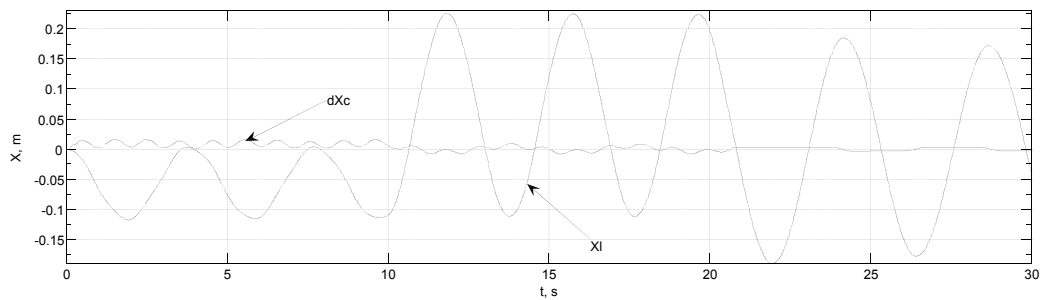


Fig. 2. Graphs of relative displacements of load  $x_1$  and sides of the crane  $\Delta x_c$

It follows from the graphs that torque and velocity oscillations have three components: suspended load oscillations  $\omega_0 = 1,25$  rad/s; oscillations due to compliance of the transverse beam  $\omega_0 = 6$  rad/s; oscillations due to the compliance of the longitudinal beams  $\omega_0 = 40$  rad/s [3].

All three types of oscillations have different frequencies, which allows them to be considered on simpler two-mass models. But when using synchronous rotation systems (SRS) on the movement mechanism, which are often prone to oscillations, the proposed model is better suited, because it takes into account the interaction of the SRS and the mechanism at different vibration frequencies. Figure 2 shows the deviation of the load from the suspension point and the linear mismatch of the path traveled by the sides of the crane. With these loads, the mismatch of the path of the sides  $\Delta x_c$  does not exceed 0,025 m, the relative swing of the load  $x_1$  is not more than 0,25 m [3].

The mechanical part of the electromechanical system contains all the connected moving masses: the engine, the transmission and the actuator. A direct idea of the moving masses of the system and the mechanical connections between them is given by the kinematic scheme of the electric drive, one of the variants of which is shown in Fig. 3.

Engine M through the first gear  $z_1/z_2$  drives a long intermediate shaft, which through two gears  $z_3/z_4$  transmits energy to the wheels (runners) of the crane bridge. The total mass of the bridge  $m_M$  consists of the masses of the bridge itself, the trolley and the load. The bridge is moving at speed  $V$ . Shafts and axes of runners have limited stiffness, which is determined by specific coefficients  $C_i$ . In the elements of the movement mechanism of the bridge there are forces of friction (in gears, wheel axles, wheels on rails by flanges), and also forces of resistance of rolling on rails.

The considered scheme clearly shows the position that in the general case the mechanical part of the electric drive is a system of bound masses that moving at different speeds rotating or translationally. Under load, the elements of the system (shafts, supports, gears) are deformed, because the mechanical connections are not absolutely rigid.

The masses and stiffness of the bonds in the kinematic chain of the drive are different. The greatest mass and the least rigidity of connections have a decisive in-

fluence on the movement of the system. Therefore, one of the first tasks in the design and study of the electric drive is to compile calculation schemes of the mechanical part, taking into account the possibility of neglecting the elasticity of sufficiently rigid mechanical connections and approximate consideration of the influence of small masses. This is a graphical representation of a system in which the masses (moments of inertia) are represented by rectangles whose areas are proportional to these inertia, and the stiffness of the connections between them is represented by lines whose length is proportional to the pliability. Due to the presence of gears, different elements of the system move at different speeds, so compare directly their moments of inertia  $J_j$ , mass  $m_w$ , stiffness of connections  $C_j$ ,  $C_w$ , displacement  $\Delta\varphi_j$ ,  $\Delta S_w$ , etc. is impossible. To compile the calculation scheme of the mechanical part of the electric drive, it is necessary to bring all the parameters of the kinematic circuit to one movement (engine or working body).

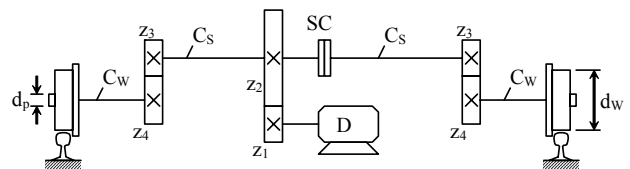


Fig. 3. Kinematic scheme of the movement mechanism of crane bridge

The condition for compliance of the given calculation scheme with the real mechanical system is the fulfillment of the law of conservation of energy (kinetic, potential), as well as the elementary work of all forces acting in the system, the moments of possible displacements.

When designing and researching electric drives, the moments of inertia, mass, stiffness of connections of real elements are usually known, and the forces acting in the system are either set or calculated based on the initial data of the mechanism and the conditions of its technology [6].

Definition of parameters of calculated scheme at such initial data of the bridge:

Bridge mass  $m_B=2600$  kg;

Load mass  $m_L=20000$  kg;

Movement speed  $V = 75$  m/min;

Wheel diameter  $d_w = 0,4$  m;

Diameter of pins  $d_p = 7,5$  cm;

Coefficient of rolling resistance on rails  $f=0,05$  cm;

Coefficient of friction when sliding in the  $\mu = 0,07$  pins;

Friction of the flange of the wheels on the rails take into account by the coefficient  $K_f=0,07$ ;

Gear efficiency  $\eta = 0,95$ ;

Flywheel moments of gears and coupling elements:

$GD_1^2 = 0,2$  kgm<sup>2</sup>;  $GD_2^2 = 3,4$  kgm<sup>2</sup>;  $GD_3^2 = 2,4$  kgm<sup>2</sup>;

$GD_4^2 = 20$  kgm<sup>2</sup> (together with the wheel);

$GD_m^2 = 0,4$  kgm<sup>2</sup>.

Coefficients of rigidity of:

engine shaft  $C_{ES} = 1,8 \cdot 10^6$  Nm;

shaft  $C_s = 5,6 \cdot 10^6$  Nm;

wheel axles  $C_w = 500 \cdot 10^6$  Nm;

The internal viscous friction in the transmission elements due to the complexity of its receipt is taken into account by the total reduced scattering coefficient  $\psi_c$  at a level corresponding to the logarithmic decrement of vibration damping  $\lambda_d \approx 0,25$ .

The engine has the following data:

$P_H = 7,5$  kW;  $n_H = 945$  rpm;  $\lambda_M = 2,8$ ;

$J_o = 0,142$  kgm<sup>2</sup>.

Gear ratios

$$i_1 = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{65}{16} = 4,06; \quad i_2 = i_3 = \frac{Z_4}{Z_3} = \frac{67}{14} = 4,79.$$

Total gear ratio from the engine shaft to the wheel axles

$$i = i_1 \cdot i_2 = 4,06 \cdot 4,79 = 19,45.$$

Total efficiency coefficient of gears

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,95 \cdot 0,95 = 0,9.$$

The total moment of resistance at the loaded crane that brought to engine shaft

$$\begin{aligned} M_w &= r_k(m_B + m_L) \cdot g \cdot (\mu r_p + f) K_f / i \eta = \\ &= \frac{0,2 \cdot (26000 + 20000) \cdot 9,81 \cdot (0,07 \cdot 0,0375 + 0,0005) \cdot 1,3}{9,45 \cdot 0,9} = \\ &= 21 \text{ Nm}. \end{aligned}$$

Rated and starting torque of the engine

$$M_R = \frac{P_R \cdot 10^3}{0,105 \cdot n_R} = \frac{7500}{0,105 \cdot 945} = 75,8 \text{ Nm};$$

$$M_S = 0,8 \cdot \lambda_M \cdot M_R = 0,8 \cdot 2,8 \cdot 75,8 = 170 \text{ Nm}.$$

The moments of losses in wheel pairs that brought to the engine shaft

$$\Delta M_{WP} = \frac{\Delta M_w}{3} = \frac{(1-\eta) M_w}{3} = \frac{(1-0,9) \cdot 21}{3} = 0,7 \text{ Nm}.$$

Moments of inertia and mass are given.

Gears:

$$J_1 = GD_1^2 / 4 = 0,2 / 4 = 0,05 \text{ kgm}^2;$$

$$J_2 = GD_2^2 / 4i_1^2 = 3,4 / (4 \cdot 4,06^2) = 0,053 \text{ kgm}^2;$$

$$J_3 = GD_3^2 / 4i_1^2 = 2,4 / (4 \cdot 4,06^2) = 0,045 \text{ kgm}^2;$$

$$J_4 = GD_4^2 / 4i_1^2 = 20 / (4 \cdot 19,45^2) = 0,013 \text{ kgm}^2;$$

Coupling

$$J_m = GD_m^2 / 4i_1^2 = 0,4 / (4 \cdot 4,06^2) = 0,006 \text{ kgm}^2;$$

Bridge with load

$$\begin{aligned} J_B &= (m_B + m_L) V^2 / \omega_0^2 = (m_B + m_L) r_w^2 / i^2 = \\ &= (26000 + 2000) \cdot 0,2^2 / 19,45^2 = 4,86 \text{ kgm}^2. \end{aligned}$$

The values of the stiffness coefficients of the shafts and wheel axles:

engine shaft  $C_{ES} = 1,8 \cdot 10^6$  Nm;

shaft  $C'_s = C_s / i_1^2 = 5,6 \cdot 10^6 / 4,06^2 = 0,34 \cdot 10^6$  Nm;

wheel axles  $C'_w = C_w / i^2 = 5 \cdot 10^8 / 19,45^2 = 1,32 \cdot 10^6$  Nm.

Based on the obtained results, the calculation scheme of the crane movement mechanism can be presented as shown in Fig. 4, a.

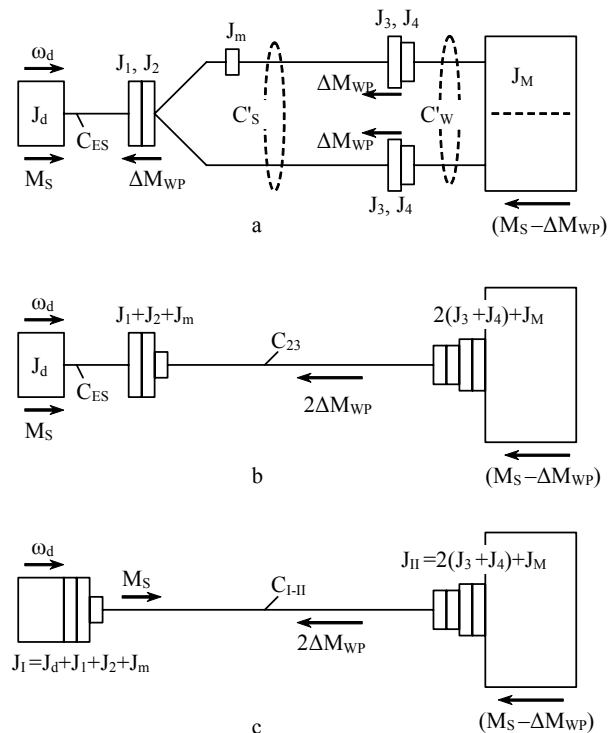


Fig. 4. Calculated scheme of the movement mechanism of overhead crane (according to Fig. 3)

As can be seen from the scheme, significant inertia in the system is the mass of the bridge  $J_M$ , the first gear pair  $(J_1 + J_2)$  and the engine rotor  $J_d$ . Two shafts have significant susceptibility. Therefore  $2(J_3 + J_4)$  can be connected with  $J_M$ , and  $J_m - (J_1 + J_2)$  with, replacing two parallel branches with series-connected  $C'_s$  and  $C'_w$  on one elastic connection with the stiffness coefficient

$$C_{23} = 2 \frac{C'_S \cdot C'_W}{C'_S + C'_W} = 2 \frac{0,34 \cdot 10^6 \cdot 1,32 \cdot 10^6}{(0,34 + 1,32)10^6} = 0,54 \cdot 10^6 \text{ Nm.}$$

The system is converted into a three-axle, the first of which is the rotor of engine, the second - the first gear together with the coupling, and the third - the axle with two gears (Fig. 4, b). The first mass is connected to the second by an elastic bond with  $C_{ES} = C_{12}$ , the second to the third by a bond with  $C_{23}$ . The starting mass of the engine is applied to the first mass, to the second - the moment of losses in the first gear  $\Delta M_{WP}$ , to the third - the moment  $(M_W - \Delta M_{WP})$  of technological resistance and losses in two transfers. Further simplification of the scheme is obtained by combining the first two masses with each other and replacing all elastic bonds with a single one with a stiffness coefficient.

$$C_{I-II} = \frac{C_{12} \cdot C_{23}}{C_{12} + C_{23}} = \frac{1,8 \cdot 10^6 \cdot 0,54 \cdot 10^6}{2,34 \cdot 10^6} = 0,415 \cdot 10^6 \text{ Nm.}$$

Such a two-mass system with inertia  $J_I = J_d + J_1 + J_2 + J_m$  and  $J_{II} = 2(J_3 + J_4) + J_M$  has an elastic connection between them with stiffness  $C_{I-II}$  and scattering coefficients  $\psi_c = 0,4$  ( $\lambda_d = 0,255$ ), which reflects all the dissipative forces arising in such a system (Fig. 4, c). A moment is applied to the first mass is  $(M_S - \Delta M_{WP})$ , and a moment of resistance to the second is  $(M_S - \Delta M_{WP})$ .

**Conclusions.** When studying the dynamics of an overhead crane without transverse displacement, it was established that according to the seven-mass model, when a driving force is applied, mechanical oscillations arise in which three frequencies of interaction are observed. For the crane designs discussed in the article, these frequencies are 0,2, 0,95 and 6,4 Hz; to study a more complete picture of the processes, it is necessary to consider the transverse displacement of the crane and the dynamics of movement electric drive.

### References

1. Fidrovs'ka N. M., Varchenko I. S., Slepuzhnikov Je. D. *Mehanizmy peresuvannya mostovyh kraniv: monografija*. Harkiv: NUCZU, 2019. 124 s.
2. Grygorov O. V., Petrenko N. O. *Vantazhopidjomni mashyny*. Harkiv: NTU «NPI», 2006. 300 s.
3. Morozov D.I., Makurin A.V. *Dinamika prodol'nogo peremeshhenija mostovogo kрана s uchetom uprugosti jelementov konstrukcii*. *Electrotechnic and Computer Systems* № 03(79), 2011. S. 167-169.
4. Mamaev L. M., Skripnik Je. T., Mihajlus' A. S. *K raschetu ustojchivosti dvizhenija mostovyh kranov*. *Pod'emnotransportnaja tehnika*, №2. K., Tehnika, 2003. S. 79-82.
5. Bondarjev V.S., Dubynec' O. I., Kolisnyk M. P., Bondarjev S. V., Gorbatenko Ju. P., Baranov V. Ja. *Podjomno-transportni mashyny*. K. : Vyshha shkola, 2009. 734 s.
6. Shevchenko I.S., Morozov D.I. *Dynamika skladnyh elektromehaničnyh system: Navch posibn. Alchevs'k: DonDTU, 2008. 171 s.*

### Руднев Є.С., Романченко Ю.А., Ліневич А.О. Дослідження динаміки механізму переміщення мостового крану як складної електромеханічної системи

У статті проведено дослідження динаміки механізму пересування крана для взяття заходів щодо їх надійної роботи та зниження зносу механізмів пересування. Для цього прийнято такі припущення: не розглядається поперечний рух, не розглядається динаміка двигунів та електроприводу; кран представлений у вигляді семи-масової системи, підвіс вантажу прийнятий жорстким.

Встановлено, що облік гнучкості каната, за допомогою якого підвищений вантаж, несуттєво (не більше 10%) позначається на значеннях найбільших динамічних навантажень у пружних зв'язках; тому при визначенні навантажень в пружних зв'язках механізмів пересування можна використовувати систему з пружним механізмом і жорстким підвісом вантажу.

Розглянуто процеси в механізмах пересування вантажопідіймальних кранів за допомогою розрахункової семи-масової динамічної схеми конструкцій. При роботі механізму виникають коливання в його металоконструкціях і трансмісійних валах, крім того, відбувається розгойдування вантажу (який разом з канатом довжиною утворює маятник з рухомою точкою підвісу).

На графіках були показані зусилля в поздовжній, поперечній балках крана та лінійні швидкості коліс, при прикладенні зовнішніх зусиль 21700 Н до кожного колеса. Всі три види коливань мають різні частоти, що дозволяє розглядати їх на більш простих двомасових моделях. Але при використанні на механізмі пересування системою синхронного обертання (ССО), які часто схильні до коливань, краще підійде запропонована модель, так як вона враховує взаємодію ССО та механізму на різних частотах коливань. При даних навантаженнях неузгодженя шляху сторін не перевищує 0,025 м, відносно розгойдування вантажу не більше 0,25 м.

У статті встановлено, що за семи-масовою моделлю при прикладенні рушійного зусилля виникають механічні коливання, в яких спостерігається три частоти взаємодії. Для конструкцій крана, розглянутого у статті, ці частоти становлять 0,2; 0,95 та 6,4 Гц. Для дослідження повнішої картини процесів необхідний розгляд поперечного зміщення крана та динаміки електроприводу переміщення.

Визначені параметри розрахункової схеми при вихідних даних моста. Виходячи з одержаних результатів, побудована розрахункова схема механізму переміщення крану. Система перетворюється на тримасову, першою в якій є ротор двигуна, другою – перша передача разом зі з'єднувальною муфтою, а третьою – міст разом з двома передачами.

**Ключові слова:** мостовий кран, пружність, конструкція, підвіс вантажу, динамічне навантаження, коливання, зусилля.

**Руднев Є.С.** – к.т.н., завідувач кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [rudnev\\_es@snu.edu.ua](mailto:rudnev_es@snu.edu.ua)

**Романченко Ю.А.** – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [romanchenko\\_ja@snu.edu.ua](mailto:romanchenko_ja@snu.edu.ua)

**Ліневич А.О.** – студент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [ee-19d-240@snu.edu.ua](mailto:ee-19d-240@snu.edu.ua)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-40-43>

УДК 004.92[621:744]

## МЕТОДИ ВИВЧЕННЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ДИСЦИПЛІН

Карпюк Л. В., Давіденко Н. О., Ганжа С. А., Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед

## METHODS OF STUDYING HIGH-TECH DISCIPLINES

Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Ganzha S. A., Gezevi Abdalhaleh Goma Ahmed

У статті розглядаються питання та проблеми навчання студентів, з якими вони зустрічаються під час вивчення високотехнологічних дисциплін. У вищих навчальних закладах (ВНЗ) в сучасних умовах потрібен новий підхід до підготовки студентів різних рівнів навчання – якісний, технологічний. До підготовки фахівців галузі знань «Автоматизація та приладобудування» висуваються підвищені вимоги. Зважаючи на умови традиційної освіти, реалізація цих вимог пов'язана з певними труднощами. Впровадження високотехнологічних дисциплін в навчання дозволяє досить швидко розробляти та пропонувати студентам різноманітні варіанти індивідуальних завдань за великою кількістю тем з урахуванням рівня початкової комп'ютерної підготовленості студентів. При правильному підході САПР може бути прекрасною основою запровадження у освітній процес проектного способу навчання. Суть його полягає в тому, що викладач задає вихідні дані та формулює заплановані результати навчальної задачі. Студенти самі намічають проміжні завдання, шукають шляхи їх вирішення, а виконуючи проект, порівнюють отримані результати із затребуваними, при необхідності коригують регульовані параметри. У результаті вони набувають навичок самостійно «добувати» нові знання, вчать застосовувати їх до вирішення практичних завдань, набувають першого досвіду дослідницької роботи. Але на шляху вирішення цієї проблеми вищі навчальні заклади сьогодні зустрічають низку серйозних труднощів, пов'язаних з недостатньою матеріальною базою (нестача потужних комп'ютерів, висока вартість ліцензійного програмного продукту тощо). Щоправда, низка великих компаній – розробників САПР – пропонують (безкоштовно) «урізани» студентські версії САПР, які можуть надати значну допомогу в навчанні. В свою чергу вивчення сучасних САПР та набуття навичок у роботі з ними, безумовно, сприятиме підвищенню якості підготовки інженерних кадрів, значно скоротить період часу, необхідний для адаптації молодого спеціаліста на робочому місці після закінчення вищого навчального закладу, суттєво підвищить його затребуваність з боку роботодавця. Крім того, використання у навчальному процесі систем автоматизованого проектування, поряд з рішенням основного завдання, дає низку додаткових освітніх ефектів. Сумарна дія таких ефектів багаторазово покращує результати навчання. В даній статті розглядаються деякі відмінні риси САПР, які позитивно вплива-

ють на результативність підготовки сучасного спеціаліста.

**Ключові слова:** проектування, технічне завдання, математична модель, методи, моделювання, когнітивний процес.

**Вступ.** Декілька останніх десятиліть у світі ознаменувалися не лише бурхливим розвитком комп'ютерної техніки, а й зародженням на її основі та подальшим стрімким розвитком нової галузі знань, яку сьогодні прийнято називати ІТ-технологіями. У вищій школі ІТ-технології широко застосовуються у навчальному процесі: це електронні підручники, мультимедіа-системи, комп'ютерні програми, системи контролю знань, системи дистанційного навчання та багато іншого. Поряд з перерахованими засобами для цілей навчального проектування все частіше застосовують так звані системи автоматизованого проектування (САПР), що являють собою пакети прикладних проблемно-орієнтованих програм. Питання їх застосування в освітньому процесі заслуговують на пильну увагу, оскільки у виробництві результати впровадження новітніх технологій на основі САПР у проектування найскладніших виробів давно довели свої переваги перед традиційними методами.

Сьогодні жодна важлива розробка у машинобудуванні, енергетиці, електроніці не обходиться без використання систем автоматизованого проектування. Сам термін «САПР» став синонімом таких характеристик, як висока точність та висока швидкість проектування. В цих умовах є очевидною необхідність деякого коригування вузівських освітніх програм. В даний час до найважливіших компетенцій випускників вузів інженерних спеціальностей і напрямів підготовки [1] віднесені вміння використовувати пакети прикладних програм аналізу та синтезу пристроїв.

На шляху вирішення цієї проблеми ВНЗ сьогодні зустрічають низку серйозних труднощів, пов'язаних з недостатньою матеріальною базою (нестача

потужних комп'ютерів, висока вартість ліцензійного програмного продукту тощо). Щоправда, низка великих компаній – розробників САПР – пропонують (безкоштовно) «урізани» студентські версії САПР, які можуть надати значну допомогу в навчанні.

Вивчення сучасних САПР та набуття навичок у роботі з ними, безумовно, сприятиме підвищенню якості підготовки інженерних кадрів, значно скоротить період часу, необхідний для адаптації молодого спеціаліста на робочому місці після закінчення ВНЗ, суттєво підвищить його затребуваність з боку роботодавця. Крім того, використання у навчальному процесі систем автоматизованого проектування, поряд з рішенням основного, сформульованого вище завдання, дає низку додаткових освітніх ефектів, сумарна дія яких багаторазово покращує результати навчання. Розглянемо деякі відмінні риси САПР, які позитивно впливають на результативність підготовки сучасного спеціаліста.

#### **Викладення основного матеріалу.**

##### ***Система для проектування систем.***

Відповідно до визначення [2] САПР – це сукупність засобів та методів здійснення автоматизованого проектування. Вона включає кілька складових частин (підсистем), що називаються технічним, математичним, програмним, лінгвістичним, інформаційним, методичним та організаційним забезпеченням. Важливо, що САПР – це система «людина-машина». Колектив розробників є складовою системою проектування, що виконує проектні роботи у взаємодії з ЕОМ. Зазначена особливість САПР найбільш природно сприяє розвитку у студентів навичок роботи в колективі, що є однією з найважливіших вимог освітніх стандартів.

Дуже важливо, що усі САПР призначені для проектування не окремих деталей чи вузлів, а всієї системи загалом. Таким чином, студент, розпочинаючи роботу з САПР, з першого кроку отримує уявлення про найскладніший виробничий процес проектування. Він вчиться складати технічне завдання, знайомиться із конструктивними особливостями майбутньої системи, виконує кресленики, вибирає матеріали та елементи для її реалізації тощо. САПР дозволяють моделювати роботу апаратури і мають засоби аналізу процесів, що відбуваються в моделі. Це забезпечує студенту можливість в інтерактивному режимі аналізувати результати, зіставляти з технічним завданням, при необхідності вносити корективи у вихідні дані. Студент при цьому зайнятий справжньою творчою інженерною справою. Проміжні та підсумкові результати САПР обчислює з урахуванням взаємодії окремих елементів проєктованої системи, цим сприяючи найважливішому процесу синтезу знань, отриманих студентом на ранніх етапах навчання. Синтез розрізнених знань прищеплює настільки необхідний для розробника складної техніки системний підхід.

**Проектне навчання.** При правильному підході САПР може бути прекрасною основою запровадження у освітній процес проектного способу навчання [3]. Суть його полягає в тому, що викладач задає вихідні дані та формулює заплановані резуль-

тати навчальної задачі. Студенти самі намічають проміжні завдання, шукають шляхи їх вирішення, а виконуючи проєкт, порівнюють отримані результати з необхідними, при необхідності коригують регульовані параметри. У результаті вони набувають навичок самостійно «добувати» нові знання, вчать застосовувати їх до вирішення практичних завдань, набувають першого досвіду дослідницької роботи.

Роль педагога в такій ситуації зводиться до спрямовуючої, консультаційної та коригуючої діяльності. При цьому вимоги до кваліфікації викладача під час роботи за проектним методом надзвичайно високі. Тепер від викладача вже недостатньо вимагати наявності багажу знань і досвіду роботи з САПР, уміння виступити в ролі тренера, який грає. Його роль значно складніша. Справа в тому, що подібний метод навчання припускає порушення традиційної послідовності вивчення дидактичних одиниць курсу. Студент має можливість самостійно формулювати для себе навчальні завдання відповідно до особливостей проєкту, планувати та вирішувати їх у тій послідовності, яка потрібна для його виконання. При цьому виникає небезпека «пропуску» у вивченні важливих розділів курсу. Є інші ризики. Наприклад, неприпустимою є ситуація, коли студент досить успішно освоює правила користування САПР, не переймаючись вивчення методів проектування, запрограмованих у системі. Отже, впровадження проектного методу навчання, що спирається на використання сучасних САПР, може дати прогресивний результат, але вимагає дуже виваженого підходу та участі викладачів дуже високої кваліфікації.

##### ***Математичні моделі та можливості САПР.***

При вивченні фізичних або інженерних дисциплін математичний опис процесів часто нашоухується на значні труднощі сприйняття отриманих результатів і фізичного тлумачення виразів і формул. У цих випадках на допомогу приходять чисельне (комп'ютерне) моделювання. Модель дозволяє не тільки виконувати розрахункову частину, але й правильно трактувати отримані результати, глибше вникати в процеси, що вивчаються. З освітньої точки зору сам процес створення подібних математичних (отримання формул, розробка алгоритмів) та комп'ютерних (написання та налагодження програм) моделей є одним з найважливіших та найефективніших етапів вивчення дисципліни. На жаль, сформулювати завдання студенту з дорученням розробити серйозну модель вдається рідко, оскільки навчальним планом далеко не завжди передбачено необхідну кількість годин на цю роботу. Викладачеві, який обрав такий підхід, доводиться йти на вимушені заходи, скорочуючи завдання, застосовуючи наближені методи вирішення проблеми. У цих випадках доцільно розглянути можливість використання покупного програмного продукту як САПР. Робота з нею не потребує витрат зусиль на розробку моделі, студент має лише освоїти правила роботи. Це дозволить зосередитись на процесі проектування, на вивченні та аналізі отриманих результатів та,

можливо, на процедурі оптимізації отриманого рішення.

Водночас робота з САПР має і свій «тіньовий» бік. Не беручи безпосередньої участі у створенні математичної моделі, студент отримує лише приблизне уявлення про її особливості та методи вирішення. Як правило, його частина роботи зводиться до правильного опису (комп'ютерного креслення) проєктованого виробу. Після цього необхідні операції САПР виконує самостійно в автоматичному режимі. У результаті виникає небезпека поверхневого освоєння теоретичних основ дисципліни. Щоправда, заощаджені на створенні моделі витрати зусиль дозволяють значно далі просунутися шляхом створення проєкту.

Аналізуючи можливості застосування САПР в освітньому процесі, не зайве нагадати, що перші спроби автоматизувати процеси проєктування часто наштовхувалися на перешкоди, пов'язані з недостатніми обчислювальними ресурсами (невисока швидкість обчислень, малі обсяги оперативної пам'яті комп'ютерів, примітивний інтерфейс). Ці обмеження змушували розробників САПР створювати системи, засновані на примітивніших моделях, що використовують наближені методи опису проєктованих виробів. Ось чому спочатку такі системи не дуже відрізнялися від навчальних моделей.

Бурхливі темпи розвитку обчислювальної техніки поступово дозволяли знімати обмеження на ступінь автоматизації проєктування. Збільшення швидкодії, підвищення «потужності» систем автоматизованого проєктування та розширення їх можливостей – це не єдиний і найголовніший результат прогресу в галузі ІТ-технологій. Значно найважливішим результатом стала можливість початку створення САПР, що базуються на досконаліших математичних моделях, які найбільш адекватно описують складні фізичні процеси з урахуванням численних зв'язків, властивостей матеріалів та його змін у процесі роботи, впливу довкілля тощо. Як наслідок, вдосконалення моделей та САПР на їх основі призвело до підвищення достовірності результатів проєктування, а розробка засобів аналізу та оптимізації отриманих результатів, а також створення зручних інтерфейсів різко підвищили ефективність праці проєктувальників.

Вирішення питання про те, як краще організувати навчальне проєктування – з використанням САПР або на основі спрощених моделей, що створюються студентом, – повинна приймати кафедра. Це рішення вимагає виваженого підходу, обліку всіх «за» та «проти» та висуває високі вимоги до кваліфікації викладацького складу.

Повертаючись до процесу навчання, слід наголосити, що робота з САПР дозволяє студенту поринути в атмосферу, наближену до умов майбутньої роботи на реальному виробництві. Результатами його проєкту стануть не просто абстрактні структурні схеми, формули і цифри, а конкретні конструкції приладів, виготовлені з реальних елементів і матеріалів. САПР дає студенту можливість оцінити поведінку характеристик спроектованого ним при-

ладу в реальних умовах, у тому числі і при зміні параметрів зовнішнього середовища, оцінити необхідні витрати на його виробництво і т.п. Це серйозний крок у справі підготовки спеціаліста з огляду на вимоги сучасного виробництва. Зближення навчальних завдань із потребами та можливостями виробництва в даний час – дуже актуальна проблема.

У процесі проєктування студент має можливість проводити невеликі власні дослідження, спрямовані на отримання оптимального рішення.

**Робота з САПР як когнітивний процес.** Навчальне проєктування під час використання САПР значно розширює пізнавальні можливості. Цьому сприяють закладені у них механізми проєктування та відображення отриманих результатів. Практично всі сучасні системи автоматизованого проєктування дозволяють візуалізувати складні фізичні процеси, які не спостерігаються у звичайних умовах [4].

Слід зазначити, що всі САПР дозволяють після створення просторової комп'ютерної моделі її всебічно розглянути, побачити «невидиму» сторону, вивчити деталі та вузли, що знаходяться всередині блоку, краще зрозуміти їхнє взаємне розташування. Іншими словами, система проєктування формує адекватний деталізований образ виробу, що створюється.

**Комп'ютерне інтерактивне моделювання на основі САПР як віртуальна лабораторна робота.** Перехід до нових освітніх стандартів зажадав перегляду співвідношення годин аудиторної та самостійної роботи студентів на користь останньої. При цьому очевидно, що зниження кількості лабораторних занять з більшості дисциплін негативно позначиться на якості підготовки. Деяким компромісом може бути виконання віртуальних аналогів лабораторних робіт, у яких закладено комп'ютерне моделювання [5, 6]. САПР і в цьому випадку може виявитися дуже корисним інструментом та скласти основу створення лабораторної роботи. Важливо відзначити, що її виконання можна організувати дистанційно, що позбавить необхідності встановлювати САПР на комп'ютер кожного студента.

**Засіб підвищення мотивації до навчання.** Пропонується викладачам «розвивати у тих, хто навчається самостійність, ініціативу, творчі здібності». Це складне завдання. Однією з найголовніших умов її виконання є підвищення мотивації студентів до навчання за вибраним напрямом. Досвід організації освітнього процесу як для бакалаврів, так і для магістрів свідчить про позитивну роль САПР у підвищенні зацікавленості студента у вивченні предмета. Робота з комп'ютером, з «розумною» програмою автоматизованого проєктування в режимі діалогу з перших кроків залучає студента до найцікавішого процесу творення. Цю психологічну особливість доводиться враховувати у шкільному віці. Не випадково за кордоном народився і стає все більш популярним спеціальний термін *edutainment*, що означає отримання знань через гру. Така «доросла гра» в абсолютній більшості випадків сприяє підвищенню інтересу студента до майбутньої професії..

Великі можливості САПР надають студенту впевненість у тому, що він може виконати серйозні проекти. І справді, якби ВНЗ досить широко залучали студентів до виконання замовлень підприємств із розробки нової техніки, студент відчував би себе у при цьому рівноправним виконавцем науково-дослідної чи дослідно-конструкторської розробки, проведеної ВНЗ. У багатьох прокидалася б потреба у творчості, у реалізації власних ідей та створенні своїх розробок. У ряді університетів США існує система підтримки подібних ініціативних розробок студентів та просування їх на ринок. Інтелектуальна власність у цьому випадку належить студенту та університету; дохід від продажу таких розробок становить значну частку у бюджеті університету.

**Висновки.** Розглянутий аналіз особливостей застосування систем автоматизованого проектування в освітньому процесі ґрунтується на реальному досвіді викладання низки технічних дисциплін, які за сучасною термінологією можуть бути віднесені до сфери високих технологій. Наведені результати спостереження, хоч і є вичерпними, але переконливо доводять цілий ряд позитивних ефектів. Найбільш цінною в них є відповідь на питання, як, яким чином можна забезпечити формування у майбутніх бакалаврів та магістрів цілої низки найважливіших професійних компетенцій, причому як компетенцій, сформульованих в українських освітніх стандартах, так і критеріїв якості інженерної освіти, викладених у вимогах зарубіжних та міжнародних акредитаційних організацій.

### Література

1. Стандарт вищої освіти України: другий (магістерський) рівень, галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. 2020 р.
2. Саєнко С. Ю., Нечипоренко І. В. Основи САПР : навч. посібник / Харків : ХДУХТ, 2017. 120 с.
3. Малиух В. Н. Введение в современные САПР : Курс лекций. / М.: ДМК Пресс, 2010. 192 с.
4. Карпюк Л. В., Гуліда М. І., Ревенко С. А. Комп'ютерна графіка в машинобудівних кресленнях : Навч. посібник. Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2007. 132 с.

### References

1. Standart vyshchoi osvity Ukrainy: druhyi (mahisterskyi) riven, haluz znan 15 Avtomatyzatsiia ta prylyadobuduvannia 151 Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii. 2020 r.
2. Saienko S. Yu., Nychyporenko I. V. Osnovy SAPR : navch. posibnyk / Kharkiv : KhDUKht, 2017. 120 s.
3. Maliukh V. N. Vvedenie v sovremennye SAPR : Kurs lektsyi. / M.: DMK Press, 2010. 192 s.
4. Karpyuk L. V., Hulida M. I., Revenko S. A. Kompiuterna hrafika v mashynobudivnykh kreslenniakh : Navch. posibnyk. Luhansk: Vyd-vo Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia, 2007. 132 s.

### Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Ganzha S. A., Gezevi Abdalhaleh Goma Ahmed. Methods of studying high-tech disciplines

*The article deals with the issues and problems of teaching students encountered in the study of high-tech disciplines. Higher education institutions (HEIs) in modern conditions require a new approach to the training of students of different levels of education - a qualitative, technological approach. Increased demands are placed on the training of specialists in the field of knowledge «Automation and instrumentation». Considering traditional education, there are challenges in realising these requirements. The introduction of high-tech disciplines into teaching allows a variety of individual task options to be quickly developed and offered to students on a large number of topics, taking into account the level of initial computer proficiency of the students. With the right approach, CAD can serve as an excellent basis for introducing project-based learning into the educational process. It consists of the teacher setting the baseline data and formulating the intended outcomes of the learning task. The students themselves outline intermediate tasks, look for solutions and, when completing the project, compare the results with those required and adjust the parameters to be adjusted if necessary. As a result, they acquire the skills to independently «extract» new knowledge, learn to apply it to solving practical problems, and get the first experience of research work. But on the way to solving this problem, higher education institutions today face a number of serious difficulties associated with an insufficient material base (lack of powerful computers, high cost of licensed software, etc.). It is true that a number of large CAD companies offer (free of charge) «stripped-down» student versions of CAD, which can be of considerable help in learning. In its turn, studying modern CAD and acquiring skills in working with it will undoubtedly contribute to the quality of engineering training, significantly reduce the time required for a young specialist to adapt to the workplace after graduation from a higher education institution, and significantly increase his/her employers' demand for him/her. In addition, the use of automated design systems in the educational process along with the solution of the main task gives a number of additional educational effects. The cumulative effect of such effects repeatedly improves learning results. In this article, some distinguishing features of CAD are considered, which have a positive effect on the effectiveness of the training of a modern specialist.*

**Key words:** design, technical task, mathematical model, methods, modeling, cognitive process.

**Карпюк Людмила Вікторівна**, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [karp224@gmail.com](mailto:karp224@gmail.com)

**Давіденко Наталія Олександрівна**, старший викладач кафедри іноземних мов та професійної комунікації, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [nat.davidenko11@gmail.com](mailto:nat.davidenko11@gmail.com)

**Ганжа Світлана Анатоліївна**, викладач вищої категорії, Сєвєродонецький політехнічний фаховий коледж Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [gsaua@ukr.net](mailto:gsaua@ukr.net)

**Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед** - аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [gezevi@ukr.net](mailto:gezevi@ukr.net).

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-44-48>

УДК 004.92[621:744]

## СКРИПТИ ПРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРОБКИ КРЕСЛЕНИКІВ В AUTOCAD

Карпюк Л. В., Давіденко Н. О., Лорія М. Г., Гурін О. М.

## SCRIPTS IN AUTOMATING THE DEVELOPMENT OF AUTOCAD DRAWINGS

Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Loria M. G., Gurin O. M.

У даній статті розглядається поняття скриптів при автоматизації розробки креслеників у графічному редакторі AutoCad. Однією з переваг використання AutoCAD і вертикальних рішень на його основі є можливість автоматизації операцій або дій, що часто повторюються. Один із найпростіших способів автоматизації процесів у AutoCAD – написати скрипт або сценарій. У цій статті ми розглянемо, як створювати сценарії для AutoCAD. Що ж таке сценарій? З точки зору комп'ютерної термінології, сценарій – це програма, яка виконується без втручання користувача. Для AutoCAD файл скрипта - це текстовий файл у кодуванні ASCII, який містить набір інструкцій для командного рядка AutoCAD. Так само, як актор грає свою роль, слідує сценарію, так і AutoCAD слідує сценарію здатний виконувати послідовність заданих у цьому сценарії дій. Файли сценаріїв для AutoCAD мають формат \*.scr. Перш ніж автоматизувати процес, його потрібно описати. Щоб AutoCAD міг виконати необхідні дії, попередньо треба виконати ці дії самостійно і записати їх послідовність. А потім описати цю послідовність у сценарії. Таким чином, кожен сценарій, що запускається, виконує певне завдання, є індивідуальним для кожного кресленника. Тобто текст сценарію – це лише результат обробки конкретних вихідних даних, а \*.scr-файл – лише проміжна ланка, що зв'язує програму, в якій пишеться сценарій, з AutoCAD. Скрипти AutoCAD можна використовувати для автоматизації багатьох завдань. Можна використовувати сценарії для додавання стандартних шарів або стилів до кресленника. Можна написати сценарій для оновлення основного напису кресленника. І, звичайно ж, можна адаптувати сценарій для автоматизації друку кресленника. Якщо провести аналіз процедур, що виконуються конструктором при оформленні своєї роботи, то можна побачити, що всі вони дотримуються суворих алгоритмів, в основу яких покладено загальноприйняті методики (норми проектування), а також вимоги різних нормативних документів. Наявність таких формалізованих алгоритмів відкриває шлях автоматизації проектних робіт із використанням персональних комп'ютерів. Основна проблема полягає у передачі даних з розрахункових програм у графічні, а вбудовані розрахункові модулі, як правило, не мають можливості модифікації під завдання, що вирішуються конкретним користувачем. У поданій статті розглядаються способи подібної передачі з розрахункових програм в графічні. Вирішення цього завдання

наводиться на прикладі конкретної програми. Також у статті йдеться про те, що скрипти написані для AutoCAD працюють і в інших додатках на базі AutoCAD. Крім того використовуючи пакетну обробку файлів, можна обробляти кресленики цілими партіями.

**Ключові слова:** скрипти, AutoCAD, кресленник, автоматизація, алгоритм, генерація, команди, інтерфейс, додатки, специфікація, сценарій, проект.

**Вступ.** Робота інженера-конструктора будь-якої галузі, зайнятої проектуванням різних виробів, пов'язана з виконанням великої кількості регламентованих та часто повторюваних дій: проведенням розрахунків, складанням специфікацій та ін. Проектування технічного об'єкта – це створення, перетворення та уявлення у загальноприйнятій формі образу цього ще не існуючого об'єкта [1, 2]. Однак, як показує практика, безпосередньо «створення» об'єкта, тобто формування у свідомості проектувальника його конструктивного виконання, складу елементів та принципів дії, займає лише незначну частину процесу проектування близько 10-15%. Решту часу інженер присвячує викладенню своїх думок на папір і приведенню їх до загальноприйнятого вигляду [3].

### Викладення основного матеріалу.

**Автоматизація та її переваги.** Якщо провести аналіз процедур, які виконуються конструктором під час оформлення своєї роботи, можна побачити, що вони слідує суворим алгоритмам, в основу яких покладено загальноприйняті методики (норми проектування), і навіть вимоги різних нормативних документів. Наявність таких формалізованих алгоритмів відкриває шлях автоматизації проектних робіт із використанням ЕОМ – персональних комп'ютерів. І одним із найпоширеніших додатків, в якому можна автоматизувати проектні роботи, є графічний редактор AutoCAD [5]. Після освоєння основних принципів роботи в AutoCAD виникає необхідність позбавитися рутинних операцій, які, залежно від специфіки виконуваних завдань, можуть займати багато часу. Для цього є додаткові програми, написані мовою

програмування LISP. Звідси і походить назва скриптів: ЛІСП-додатки.

Одним із найпростіших способів автоматизації процесів в AutoCAD є написання скриптів або сценаріїв. Що ж таке сценарій? З точки зору комп'ютерної термінології, сценарій – це програма, яка виконується без втручання користувача. Для AutoCAD файл скрипта - це текстовий файл у кодунанні ASCII, який містить набір інструкцій для командного рядка AutoCAD. Так само, як актор грає свою роль, слідує сценарію, так і AutoCAD слідує сценарію здатний виконувати послідовність заданих у цьому сценарії дій. Файли сценаріїв для AutoCAD мають формат \*.scr. Перш ніж автоматизувати процес, його потрібно описати. Щоб AutoCAD міг виконати необхідні дії, попередньо треба виконати ці дії самостійно і записати їх послідовність. А потім описати цю послідовність у сценарії. Таким чином, кожен сценарій, що запускається, виконує певне завдання, є індивідуальним для кожного кресленника. Тобто текст сценарію – це лише результат обробки конкретних вихідних даних, а \*.scr-файл – лише проміжна ланка, що зв'язує програму, в якій пишеться сценарій, з AutoCAD.

Розглянемо звичайний приклад. Після аналізу кількох варіантів майбутнього виробу проєктувальник вирішив застосувати зубчасте зачеплення для передачі обертання між валами. Зі службового призначення виробу, що розробляється, йому відомі частоти обертання валів ( $n$ ) і навантаження ( $T$ ), що передається. Необхідно дати повний вичерпний опис механізму та його елементів. Якими будуть дії проєктувальника? Спочатку, з величини крутного моменту, він підбере матеріали коліс. Потім, за формулами, відомими з курсу «Деталі машин», проведе розрахунок всіх геометричних параметрів, призначить технічні умови та перейде до оформлення робочих креслеників проєкту. Таким чином, в результаті 2-3 годин роботи в залежності від кваліфікації буде отримано необхідний результат – набір креслеників.

Якщо поглянути на виконану проєктувальником роботу, то можна побачити, що, починаючи з моменту прийняття рішення про використання зубчастої передачі та визначення її основних параметрів ( $n$ ,  $T$ ), всі подальші дії аж до видачі готової конструкторської документації, можуть бути за лічені секунди виконані ЕОМ без участі самого конструктора. Задля реалізації цієї ідеї використовуються спеціальні програмні додатки – системи автоматизованого проєктування (САПР).

Ще один приклад - оформлення специфікацій або інших відомостей виробів, інструментів або процедур. На цьому етапі вся проєктна інформація (деталі, їх кількість тощо) вже відома, завдання полягає в тому, щоб подати цей масив даних у необхідному вигляді. Усі пов'язані з цим процедури також можуть бути виконані з використанням САПР.

**Результати.** Виходячи зі всього вищесказаного, можна сформулювати основні переваги використання САПР:

1. Підвищення продуктивності проєктування.
2. Можливість детальнішого опрацювання проєктних рішень за рахунок порівняння декількох варіантів.
3. Зниження ймовірності помилок при проведенні розрахунків за рахунок унеможливлення впливу людського фактора.
4. Виключення невідповідностей при оформленні (шрифт, товщина ліній тощо), і, як наслідок, підвищення читабельності конструкторського документа [6].
5. Зниження трудомісткості оформлення результатів проєктування, що дає змогу збільшити питому вагу творчої роботи конструктора.

Сучасні мови програмування роблять завдання автоматизації інженерних розрахунків досить легко вирішуваним. Велика кількість інструментальних засобів була створена і для оформлення робочої документації. У різних галузях промисловості знайшли своє застосування різні конструкторські САПР, такі як AutoCAD, SolidWorks, Creo Parametric, CATIA, T-Flex/CAD та багато інших [4].

Основна проблема полягає у передачі даних з розрахункових програм у графічні, а вбудовані розрахункові модулі, як правило, не мають можливості модифікації під завдання, що вирішуються конкретним користувачем.

Розглянемо способи подібної передачі з розрахункових програм в графічні. Вирішення цього завдання наводиться на прикладі конкретної програми.

**Способи автоматизації креслення.** Отже, є таке завдання: необхідно виконати готовий кресленник за даними розрахунку без участі користувача. В якості графічної програми для визначеності виберемо систему AutoCAD – висока популярність цієї конструкторської системи дає можливість знайти безліч практичних додатків розглянутим питанням (хоча описані нижче принципи підходять і для багатьох інших систем). AutoCAD має власну вбудовану мову програмування, AutoLisp, однак її використання накладає певні обмеження. По-перше, розробнику доведеться вивчати нову мову програмування, а по-друге, неможливо використовувати всю міць сучасних мов високого рівня. Тому необхідно побудувати принципи автоматизації, що не залежать ні від мови програмування, ні від операційної системи [3, 4].

Розглянемо кілька способів автоматизації:

1. *Безпосередня генерація файлу креслення.* Результатом роботи програми є графічний файл, готовий до відкриття, коригування, друку та ін. (Рис. 1).

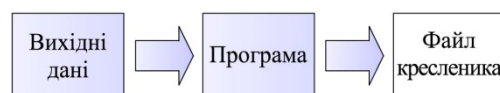


Рис. 1. Схема генерації креслення

На перший погляд, це найшвидший і найефективніший спосіб автоматизації креслення, проте його використання пов'язане з певними труднощами. Для створення файлу креслення AutoCAD, тобто файлу з розширенням .dwg, необхідно знати його формат (специфікацію файлу). Враховуючи, що ця інформація є інтелектуальною власністю розробника і, як правило, не надається у спільне користування, доводиться використовувати відкритий формат графічних файлів .dxf. Це текстовий файл, що включає велику кількість різних секцій та розділів, у яких міститься вся інформація про креслення. Як показує практика програмування, генерація таких файлів виявляється проблематичною через їх значні розміри та складність структури.

2. *Автоматизація з використанням API-інтерфейсу* (спеціального інтерфейсу, головною метою якого є впровадження у свій продукт функцій стороннього додатку). У цьому випадку робота програми виглядає наступним чином: після проведення всіх необхідних розрахунків програма запускає AutoCAD і за допомогою API-команд (таких як, наприклад, лінія, коло) формує креслення (Рис. 2.).

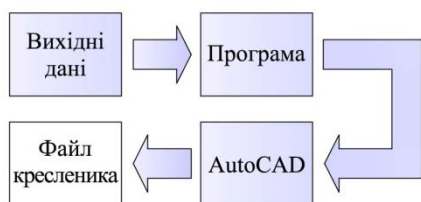


Рис. 2. Схема генерації креслення з використанням API

Надалі його можна відредагувати, надрукувати, зберегти тощо.

Недоліком даного способу є необхідність вивчення великої кількості команд API, набір яких різний для кожної графічної системи. Крім того, помилки, пов'язані з використанням API на етапі налагодження програми, можуть завдати ушкодження як програмному забезпеченню, так і всій операційній системі.

3. *Автоматизація на основі скриптів*. У цьому випадку результатом роботи програми стає скрипт - проміжний текстовий файл, на підставі даних якого проводиться побудова готового креслення (Рис. 3).

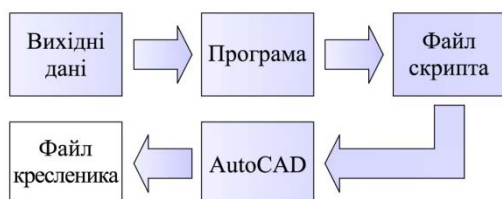


Рис. 3. Схема генерації креслення з використанням скриптів

Цей спосіб автоматизації підходить для всіх графічних систем, що підтримують роботу з командним рядком (в т.ч. AutoCAD, SolidWorks, Creo Elements/Pro, CATIA тощо). Дані, що містяться у файлі скрипта, є командами, аналогічними тим, які вводяться в командному рядку AutoCAD. Параметрами команд є дані, отримані внаслідок розрахунків, виконаних програмою. Після виконання скрипта отримуємо готовий креслення, готове до друку збереження і т.п.

**Результати.** Зі сказаного вище видно, що ефективність використання розрахункової програми у всіх трьох випадках практично однакова – користувач практично відразу отримує готовий креслення. Тому доцільність використання того чи іншого способу автоматизації слід оцінювати за трудомісткістю розробки розрахункової програми та необхідній кваліфікації програміста.

На основі досвіду використання всіх трьох методів можна зробити висновок, що автоматизація на основі скриптів є найефективнішою, і досягається це з таких причин:

- Не потрібно вивчення специфікацій будь-яких файлів чи принципів роботи API.

- Команди, що включаються до скрипту, звичні для користувача і за ними завжди можна отримати допомогу у стандартній довідковій системі.

- Файл скрипта має значно менший розмір, ніж файли інших форматів. На рисунку 4 представлена діаграма, що показує порівняння розмірів трьох типів файлів (у кілобайтах): файл «обміну кресленнями» (\*.dxf), файл AutoCAD (\*.dwg) та файл скрипта AutoCAD (\*.scr). Як видно із діаграми, файл скрипта має мінімальний розмір. Це досягається за рахунок включення до нього тільки найнеобхіднішої (і водночас достатньої) інформації.

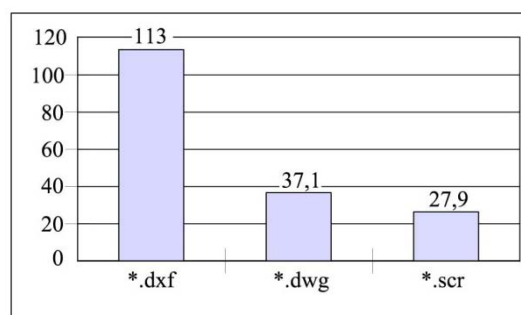


Рис. 4. Порівняння розмірів файлів різного формату

- Для роботи програми не обов'язкова наявність на комп'ютері встановленої системи CAD. Сгенеровані скрипти можуть бути перетворені у разі необхідності в креслення пізніше, на іншому комп'ютері. Це дає можливість суттєво прискорити процес проектування на малих підприємствах, де, як правило, кількість пакетів ліцензійного програмного забезпечення обмежена через високу вартість останнього. Таким чином, скрипти є простим і в той же час ефективним механізмом автоматизації, що до-

зволяє істотно підвищити продуктивність проектних робіт.

Приклад автоматизації на основі скриптів – програма «Специфікація».

Розглянемо як приклад програму, побудовану на вищевикладених принципах (Рис. 5). Програма призначена для автоматизації складання конструкторських специфікацій, а також отримання готових заповнених бланків специфікацій у форматі AutoCAD [6].

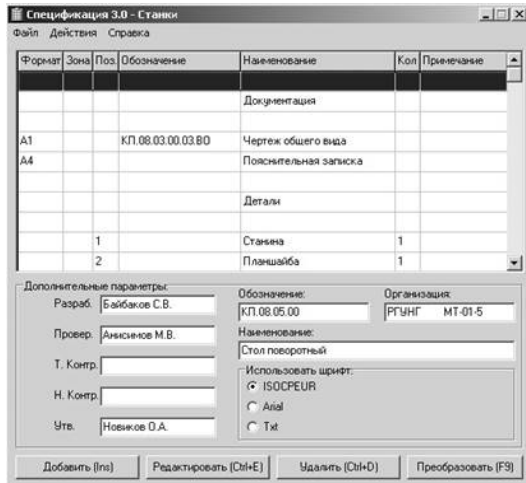


Рис. 5. Основне вікно програми «Специфікація»

У структурному плані програма складається з двох модулів, призначених, відповідно, для внесення інформації до специфікації та для приведення її до необхідного виду (перетворення на кресленник).

Перший модуль являє собою інтерфейс, завдяки якому користувач може швидко занести дані до специфікації. При цьому вбудована бібліотека елементів суттєво прискорює та полегшує процес заповнення форми (Рис. 6).

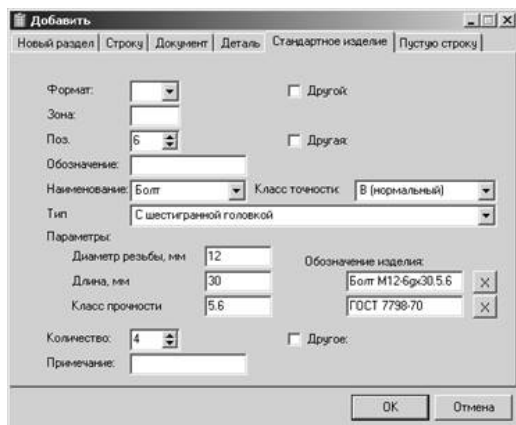


Рис. 6. Вікно додавання даних до специфікації

У базах даних програми міститься інформація про деталі, що використовуються найчастіше, матеріали та типи документів. Наявність шаблонів позначень стандартних виробів дозволяє унеможливити їх пошук у відповідних нормативних документах, а

також частково відмовитися від використання самих нормативних документів, оскільки вся необхідна інформація вже міститься у програмі. Додаткові функції дозволяють упорядкувати позиції, ввести позначення деталей шаблону та виконати інші дії, що дозволяють прискорити роботу зі специфікацією. У програмі є можливість зберегти введені дані у своєму власному форматі та використовувати їх надалі як аналог.

Другий модуль являє собою алгоритм, що перетворює введені проектувальником дані в необхідний вигляд. Запускається він після натискання на кнопку «Преобразовать (F9)» і результатом його роботи є файл скрипта, призначений для виконання в середовищі AutoCAD (Рис. 7).

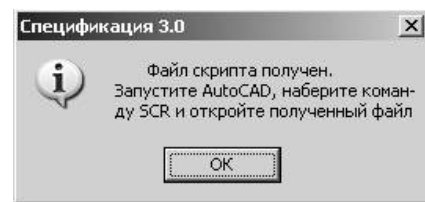


Рис. 7. Вікно, що інформує користувача про створення скрипту

Після виконання скрипта в AutoCAD (будь-якої версії) отримуємо електронний кресленник специфікації у повній відповідності до нормативного документа.

**Результати.** Практична цінність розробленої програми полягає в тому, що вона дозволяє суттєво підвищити продуктивність робіт на етапі конструкторської підготовки виробництва, пов'язаному із заповненням стандартизованих конструкторських документів. Також програма впроваджується та використовується в організаціях, що займаються проектуванням. Йде подальше вдосконалення програми.

**Висновки.** Таким чином, розглянуті принципи дозволяють створювати велику кількість програмних додатків, призначених для автоматизації виконання робіт на різних етапах технічної підготовки виробництва.

Також спеціалізовані функції для розміщення та редагування компонентів, побудови кількох ланцюгів за одну операцію, з'єднання їх на різних аркушах, параметричне створення компонентів, використання баз даних та графічних меню, автоматичне позначення складових частин та автономерація ланцюгів значно прискорюють створення наступних типів схем: електричні принципіві, однолінійні, пневматичні, гідравлічні, схеми з'єднань та КВПіА.

Отже, при проектуванні в середовищі AutoCAD способи автоматизації доступні будь-якому користувачеві, не вимагають навичок програмування та використання додаткових програм, можуть використовуватись у різних версіях AutoCAD, включаючи спеціалізовані версії, значно зменшують витрачений на роботу час та спрощують сам робочий процес. Кожен із методів автоматизації передбачає певні знання, може використовуватись до ви-

конання низки конкретних завдань і має переваги і недоліки. Сценарії для написання вимагають знань команд, командних опцій, спеціальних функцій, які застосовуються для пакетів, тобто все, що можна вводити в командному рядку. Таким чином, у середовищі AutoCAD існує безліч вбудованих можливостей для його адаптації до вирішення конкретних завдань та автоматизації робочого процесу.

### Література

1. Тимченко А. А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів: Основи САПР та системного проектування складних об'єктів: Підручник / за ред. В. І. Бикова. - 2-ге вид. - К.: Либідь, 2003. - 272 с.
2. Наумчук О. М. Основи систем автоматизованого проектування. - Рівне : НУВГП, 2008. - 136 с.
3. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. Для ВУЗов / И П. Норенков. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. - 430 с.
4. Саєнко С. Ю. Основи САПР / С. Ю. Саєнко, І. В. Нечипоренко - Х. : ХДУХТ, 2017. - 120 с.
5. Т. Ю. Соколова AutoCAD 2012 на 100%. / Соколова Т. Ю. Справочник. Практическое руководство - Издательство: Питер, 2012. - 576 с.
6. ГОСТ 2.106-96. Единая система конструкторской документации. Текстовые документы. - Введ. 01.01.99. - М.: Изд-во. стандартов, 2002. - 40 с.

### References

1. Tymchenko A. A. Osnovy systemnoho proektuvannia ta systemnoho analizu skladnykh ob'ektiv: Osnovy SAPR ta systemnoho proektuvannia skladnykh ob'ektiv: Pidruchnyk / za red. V. I. Bykova.- 2-he vyd. - K.: Lybid, 2003. - 272 s.
2. Naumchuk O. M. Osnovy system avtomatyzovanoho proektuvannia. - Rivne : NUVHP, 2008. - 136 s.
3. Norenkov Y. P. Osnovy avtomatyzovannoho proektyrovannia : ucheb. Dlia VUZov / Y P. Norenkov. - 4-e izd., pererab. i dop. - M. : Izd-vo MHTU im. N. E. Baumana, 2009. - 430 s.
4. Sayenko S. Yu. Osnovy SAPR / S. Yu. Sayenko, I. V. Nechyporenko - Kh. : KhDUKht, 2017. - 120 s.
5. T. Yu. Sokolova AutoCAD 2012 na 100%. / Sokolova T. Yu. Spravochnyk. Praktycheskoe rukovodstvo - Izdatelstvo: Pyter, 2012. - 576 s.
6. GOST 2.106-96. Edynaia systema konstruktorskoj dokumentatsii. Tekstovye dokumenty. - Vved. 01.01.99. - M.: Izd-vo. standartov, 2002. - 40 s.

**Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Loria M. G., Gurin O. M. Scripts in automating the development of AutoCAD drawings**

*This article discusses the concept of scripts in automating the development of drawings in the AutoCad graphics editor. One of the advantages of using AutoCAD and vertical solutions is the ability to automate frequently recurring operations or actions. One of the easiest ways to*

*automate processes in AutoCAD is to write a script or script. In this article, we will look at how to create scripts for AutoCAD. What is a script? In computer terminology, a script is a program that runs without user intervention. For AutoCAD, a script file is an ASCII text file that contains a set of instructions for the AutoCAD command line. Just as an actor plays a role following a script, AutoCAD can follow a script to perform the sequence of actions given in that script. Script files for AutoCAD are always in \*.scr format. Before automating any process, it must be described. In order for AutoCAD to perform the required actions, you must first perform these actions yourself and record their sequence. And then describe this sequence in the script. Thus, each run script that performs a specific task is individual for each drawing. That is, the text of the script is only the result of processing specific source data, and the \*.scr file is only an intermediate link that connects the program in which the script is written with AutoCAD. AutoCAD scripts can be used to automate many tasks. You can use a script to add standard layers or styles to a drawing. You can write a script to update the drawing title block. And, of course, you can adapt the script to automate the printing of drawings. If we analyze the procedures performed by the designer when designing their work, we can see that they all follow strict algorithms, which are based on generally accepted methods (design standards), as well as the requirements of various regulatory documents. The presence of such formalized algorithms opens the way for automation of design work using personal computers. The main problem is the transfer of data from calculation programs to graphic ones, and built-in calculation modules, as a rule, do not have the ability to be modified for tasks solved by a specific user. The presented article discusses the methods of such data transfer from calculation programs to graphic ones. The solution of this problem is given on the example of a specific program. The article also says that scripts written for AutoCAD also work in other AutoCAD-based applications. In addition, using batch file processing, you can process drawings in batches.*

**Keywords:** *scripts, drawings, automation, algorithm, generation, commands, interface, applications, specification, script, project.*

**Карпюк Людмила Вікторівна**, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [karp224@gmail.com](mailto:karp224@gmail.com)

**Давіденко Наталія Олександрівна**, старший викладач кафедри іноземних мов та професійної комунікації, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [nat.davidenko11@gmail.com](mailto:nat.davidenko11@gmail.com)

**Лорія Марина Геннадіївна**, д.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [m\\_loria@snu.edu.ua](mailto:m_loria@snu.edu.ua)

**Гурін Олександр Миколайович**, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, [gurin@ukr.net](mailto:gurin@ukr.net)

Стаття подана 01.10.2022.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-49-54>

УДК 681.5.015

## ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА АМІАКУ

Куліков Д.О., Купіна О.А., Лорія М.Г., Целіщев О.Б.

### USE OF A MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF AMMONIA PRODUCTION PROCESSES

Kulikov D.O., Kupina O.A., Loria M.G., Tselishchev O.B.

*У роботі розглядається питання розробки математичної моделі, яку можна застосовувати як для оптимізації технологічного процесу, так і для автоматизованої системи регулювання. Переваги такого підходу наступні: він ґрунтується на об'єктивних даних, що формує сам об'єкт керування; достатньо проста реалізація такого підходу; отримання адекватної і точної математичної моделі.*

*Дослідження проводиться для оптимізації технологічного процесу та автоматизованої системи регулювання, що розглядається.*

*Адаптація моделі буде забезпечувати ефективність обох стратегій керування. Для досягнення оптимальної динамічної моделі вирішувалися наступні завдання:*

*- була розроблена інформаційно-логічну схему взаємозв'язків між параметрами технологічного процесу, що розглядається;*

*- складена математичні моделі газового реактору за концентрацією цільового компонента та за температурою.*

*Отримана динамічна модель дозволяє адекватно описати характер зміни параметрів у діапазоні, які значно перевищує регламентні границі. Це особливо важливо при застосуванні її в системах контролю безпеки реактора й технологічних тренажерах.*

*В результаті досліджень встановлено, що урахування в моделі процесу хімічної реакції дозволяє контролювати такий складний параметр як зміна активності каталізатора. Це характеристика здатності каталізатора прискорювати хімічну реакцію. Каталітична активність визначається як різниця між швидкостями однієї і тієї ж реакції в даних умовах за присутності каталізатора та без нього або як відношення цих швидкостей. Каталітична активність залежить від природи та кількості активних центрів, які беруть участь в каталітичному процесі. В ідеальному випадку, коли всі активні центри каталізатора беруть участь у каталізі, каталітична активність — максимальна кількість молекул, що прореагували на одному активному центрі за одиницю часу. Цей показник є дуже важливим при визначенні необхідності адаптації моделі. Адаптація моделі одночасно забезпечує її адекватність як у системі оптимізації, так і у автоматизованої системі регулювання. Що є суттєвою пере-*

*вагою, бо дозволяє використовувати одну математичну модель в декількох випадках, що, в свою чергу, є більш доцільним з економічної точки зору.*

**Ключові слова:** математична модель, адаптація моделі, реактор, автоматизована система регулювання, оптимізація.

**Вступ.** Аміак є одним з основних продуктів хімічної промисловості, виробництво якого складає мільйони тон на рік і відноситься до великотоннажних хімічних виробництв. Технологія синтезу аміаку з елементів є сучасним методом фіксації атмосферного азоту, що покликана забезпечити потреби людства у азотовмісних сполуках. У зв'язку з цим аміак є основною проміжною сировиною для одержання практично усіх інших продуктів зв'язаного азоту, до найбільш поширених з яких відносяться азотна кислота, її солі і добрива. У світовій практиці 80 % від загального обсягу виробництва аміаку використовується у виробництві мінеральних добрив. Аміак також широко використовується для синтезу таких важливіших полімерних матеріалів, як поліаміди, поліуретани, поліакрилонітрил та інші. Шляхом нітрування азотною кислотою різних органічних речовин (толуолу, фенолу, бензолу, целюлози, гліцерину) одержують їх нітропохідні, які використовуються як вибухові речовини (нітробензол, тротил, піроксилін, амоніти), а також напівпродукти для синтезу барвників (наприклад аніліну).

#### **Актуальність.**

У зв'язку з великим попитом людства в продуктах зв'язаного азоту (особливо азотних добрив) світове виробництво аміаку за об'ємами поступаєть тільки виробництву сірчаної кислоти і кисню. Є три основні технології отримання аміаку: під низьким тиском, під середнім тиском та під високим тиском. Діапазон тисків для синтезу аміаку становить (12-34) МПа. Найбільш розповсюдженою схемою отримання аміаку в Україні являється схема під

середнім тиском (порядку 30 МПа). Основні потужності існуючих виробництв нашої країни являються 600 т/добу, 1360 т/добу та 1700 т/добу. На даному етапі світовий розвиток промисловості синтезу аміаку має ряд пропозицій для його реалізації. Синтез аміаку проводять в основному 7 на установках потужністю 1360-1500 т/добу; окремі агрегати мають потужність 2000 т/добу, проєктуються агрегати потужністю 3000 т/добу. В експлуатації знаходяться також побудовані раніше установки потужністю Синтез аміаку – один із широко застосовуваних у промисловості способів переробки вуглеводневої сировини й зокрема природного газу. [1].

Важливою проблемою промислового виробництва аміаку є підвищення технологічної та економічної ефективності цього процесу. Поряд з методами розв'язання цієї проблеми за рахунок впровадження нових каталізаторів та вдосконалення конструкцій реакторного обладнання, широко застосовується оптимізація технологічних параметрів процесу синтезу аміаку.

Окреме місце займає задача ефективного регулювання процесом та вироблення оптимальної стратегії зміни технологічних параметрів. Розв'язання цієї задачі вимагає розробку математичної моделі, яка відображає динаміку процесу з високою ступеню адекватності в широкому діапазоні зміни параметрів.

**Мета роботи.** Мета роботи – Отримати динамічну модель, яка дозволяє адекватно описати характер зміни параметрів в певному діапазоні діапазоні, адаптація якої одночасно забезпечує її адекватність як у системі оптимізації, так і у автоматизованій системі регулювання.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити інформаційно-логічну схему взаємозв'язків між параметрами технологічного процесу, що розглядається;

- скласти математичні моделі газового реактору за концентрацією цільового компонента та за температурою.

**Аналіз досліджень і публікацій. Результати досліджень.** Процес синтезу аміаку проводиться за циркуляційною схемою, що дозволяє досягати значної ступені конверсії синтез-газу. Основою технологічної схеми є реактор поличного типу з байпасом «холодного» газу. На рис. 1 наведена схема такого реактора.

Виробництво аміаку відрізняється відносно високою складністю й різноманіттям параметрів, що впливають на хід процесу, складною кінетикою хімічних реакцій, розподіленістю і нелінійністю параметрів процесу як об'єкта моделювання. Існуюче виробництво є високо автоматизованим, однак керування процесом ведеться за алгоритмами, які не враховують зміни параметрів реактора у часі.

У зв'язку із цим постає питання розробки математичної моделі (ММ), яка була би застосовуваною як для оптимізації технологічного процесу, так і для автоматизованої системи регулювання. У цьому випадку адаптація моделі буде забезпечувати ефективність обох стратегій управління. Крім того, динамічну модель можна застосовувати у системи навчання і тренування обслуговуючого персоналу, а також підвищення безпеки роботи реактора. [2-4]

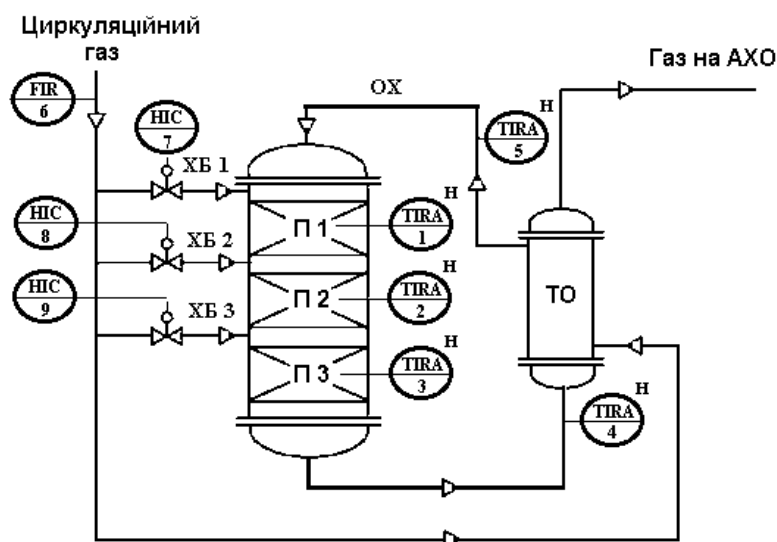


Рис. 1. Схема багато поличного газового реактора із вбудованим теплообмінником

ТО – теплообмінник; П1, П2, П3 – перша, друга и третя полиці із каталізатором;

ОХ - потік основного ходу синтез - газу; ХБ1, ХБ2, ХБ3 – потоки «холодних» байпасів синтез - газу на відповідні поли реактора; АХО – аміачно-холодильне відділення; TIRA 1-6 - прилади контролю температури; FIR - 7 – прилад контролю витрати синтез - газу; НС 8-10 – панелі дистанційного керування електричними засувками

Наявність великої кількості складного хіміко-технологічних обладнання і різноманітних процесів суттєво ускладнює моделювання всього комплексу в цілому. Тому логічно почати з формування динамічної моделі газового реактора, у якому й відбуваються основні процеси синтезу аміаку. Хімічні процеси, що відбуваються в реакторі, також характеризуються великим ступенем складності, тому задача розробки математичної моделі всіх основних процесів з урахуванням їх динаміки є суттєво нетривіальною.

Створення моделі складного фізико-хімічного процесу є, як правило, ітераційним процесом, коли функціонування розроблюваної математичної моделі постійно зрівнюється з параметрами реального процесу й відповідно корегується. [5,6]

При цьому необхідне застосування знань із різних наукових областей, зокрема, необхідно враховувати:

- фізичні закони збереження речовини, енергії і імпульсу;
- термодинамічні властивості речовин;
- хімічні механізми і кінетику реакцій.

У реакторі, що розглядається, тиск стабілізується роботою компресора синтез-газу. Тому, тиск не є регульованою величиною, а може бути віднесений до збурюючого фактору. При керуванні газовими реакторами достатньо регулювати температуру, а концентрацію можна оцінити використовуючи математичну модель процесу. Регулюючим параметром для кожної полки є витрата синтез-газу за «холодним» байпасом.

Всі інші параметри процесу є збурюючими координатами. До них слід віднести температури вхідних потоків  $T_1$  та  $T_2$  та концентрації  $Q_1$  та  $Q_2$  у них цільового компоненту. Інформаційно-логічна схема газового реактора наведена на рис. 2.

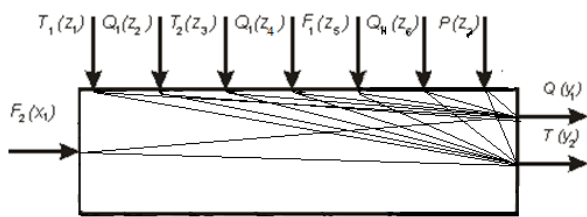


Рис. 2. Інформаційно-логічна схема полиці колони синтезу аміаку

Також слід відміти, що вихідні координати газового реактора є взаємопов'язаними. Так, наприклад, зміна температури  $T$  в реакторі з одного боку відповідно до закону Ле Шательє змінить кількість речовини, що утворюється, тобто викличе зміну концентрації  $Q$ . З цього випливає, що зміна будь-якої з вхідних координат (регулюючої або збурюючої) викличе зміну відразу всіх вихідних координат.

Для визначення ММ газового реактора слід скласти дві часткові моделі: за концентрацією  $Q$

цільового компоненту та за температурою  $T$ . Складемо ці часткові ММ.

Розглянемо складання часткової ММ за концентрацією  $Q$  аміаку, що утворюється в реакції (цільового компоненту). Складемо рівняння матеріального балансу за цільовим компонентом (компонентом, що утворюється в реакції). Цільовий компонент надходить в реактор із першим та з другим потоком (наприклад, у технологічних схемах із рециклом), утворюється в реакторі в наслідок реакції, накопичується в реакторі та відводиться з потоком, який виходить, із реактора.

Рівняння матеріального балансу за цільовим компонентом має вигляд.

$$dm_1 + dm_2 + dm_p = dm_v + dm, \quad (1)$$

де  $dm_1 = F_1 Q_1 dt$  – маса цільового компоненту, що потрапляє в реактор із першим потоком;  $dm_2 = F_2 Q_2 dt$  – маса цільового компоненту, що потрапляє в реактор із другим потоком;  $dm_p = \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} dt$  – маса цільового компоненту, що утворюється в реакції;  $dm_v = \rho V dQ$  – маса цільового компоненту, яка накопичується в реакторі об'ємом  $V$ ;  $dm = (F_1 + F_2) Q dt$  – маса цільового компоненту, що відводиться з реактора.

В рівнянні (1)  $F_1$  – витрата потоку першого реагенту,  $\frac{\kappa\mathcal{Z}}{c}$ ;  $F_2$  – витрата потоку другого реагенту,  $\frac{\kappa\mathcal{Z}}{c}$ ;  $\rho$  – густина газової суміші в реакторі (визначається з рівняння Менделєєва-Клапейрона),  $\frac{\kappa\mathcal{Z}}{M^3}$ ;

$V$  – вільний об'єм газового реактора,  $M^3$ ;  $K$  – швидкість хімічної реакції,  $\frac{1}{c}$ ;  $Q_1$ ,  $Q_2$ , та  $Q$  – концентрація цільового компоненту на входах та на виході з реактора відповідно, мас. частка;  $T$  – температура у реакторі,  $K$ ;  $R$  – універсальна газова стала,  $\frac{Дж}{\text{моль} \cdot K}$ ;  $E$  – енергія активації,  $\frac{Дж}{\text{моль}}$ .

Рівняння матеріального балансу в технологічних змінних набуде вигляду

$$F_1 Q_1 dt + F_2 Q_2 dt + \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} dt = \rho V dQ + (F_1 + F_2) Q dt \quad (2)$$

Після лінеаризації, вилучення рівняння статички та переходу до безрозмірних координат

$$\left( \frac{\Delta Q}{Q_0} = y_1; \quad \frac{\Delta T}{T_0} = y_2; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = y_3; \quad \frac{\Delta F_1}{F_{10}} = x_1; \right.$$

$$\frac{\Delta F}{F_0} = \frac{\Delta S}{S_0} = x_2; \quad \frac{\Delta T_1}{T_{10}} = z_1; \quad \frac{\Delta Q_1}{Q_{10}} = z_2; \quad \frac{\Delta T_2}{T_{20}} = z_3;$$

$$\left. \frac{\Delta Q_2}{Q_{20}} = z_4; \quad \frac{\Delta F_2}{F_{20}} = z_5; \quad \frac{\Delta Q_n}{Q_{n0}} = z_6; \quad \frac{\Delta P}{P_0} = z_7 \right), \text{ от-}$$

римуємо рівняння:

$$\tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11}x_1 + K_{12}z_2 + K_{13}z_4 + K_{14}z_5 +$$

$$+ K_{15}z_6 + K_{16}y_2$$

(3)

де  $\tau_1 = \frac{\rho V Q_0}{\Pi_1}$  – стала часу,  $c$ ;

$$\Pi_1 = Q_1 \left[ F_1 + F_2 - \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} \right];$$

$$K_{11} = \frac{(Q - Q_2) F_{20}}{\Pi_1} \quad \text{– коефіцієнт}; \quad K_{12} = -\frac{Q_1 F_1}{\Pi_1};$$

$$K_{13} = -K_{14} = -\frac{Q_2 F_2}{\Pi_1}; \quad K_{15} = \frac{\rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_n}{\Pi_1} \frac{P}{P_0}$$

– коефіцієнт;  $K_{16} = \frac{E}{RT_0} \frac{\rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) (Q - Q_n)}{\Pi_1} \frac{P}{P_0}$

– коефіцієнт.

Рівняння (3) є частковою динамічною ММ газового реактора за концентрацією цільового компонента без урахування часу запізнення. [7,8]

Для того щоб розробити часткову математичну модель газового реактора за температурою, слід скласти рівняння теплового балансу. Тепло в реактор надходить із потоками реагентів, виділяється у процесі реакції. Це тепло накопичується в об'ємі реактора та виходить із нього з потоком  $F_1 + F_2$ . При розрахунку ММ вважатимемо, що втрата тепла у навколишнє середовище незначна та нею можна нехтувати. Отже рівняння теплового балансу матиме вигляд:

$$dq_1 + dq_2 + dq_p = dq_v + dq, \quad (4)$$

де  $dq_1 = F_1 c_1 T_1 dt$  – кількість тепла, що надходить із першим потоком;  $dq_2 = F_2 c_2 T_2 dt$  – кількість тепла, що надходить із другим потоком;

$$dq_p = r \rho V K (Q - Q_n) \frac{P}{P_0} dt$$
 – кількість тепла, що

виділяється в наслідок реакції;  $dq_v = \rho V c dT$  – кількість тепла, що накопичується у реакторі;

$dq = (F_1 + F_2) c T dt$  – кількість тепла, що виходить із реактора.

В рівнянні (4):  $c_1, c_2, c$  – теплоємність вхідних та вихідного потоку,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $T_1, T_2, T$  – температура вхідних та вихідного потоку,  $\text{К}$ ;  $r$  – питома теплота реакції,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;  $dT$  – зміна температури у реакторі,  $\text{К}$ .

Після лінеаризації, вилучення рівняння статички та переходу до безрозмірного вигляду маємо:

$$\tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}x_1 + K_{22}z_1 + K_{23}z_3 +$$

$$+ K_{24}z_5 + K_{25}z_6 + K_{26}z_7 + K_{27}y_1$$

(5)

де  $\tau_2 = \frac{\rho V c T_0}{\Pi_2}$  – стала часу,  $c$ ;

$$\Pi_2 = \left[ (F_{10} + F_{20}) c T_0 - \frac{E}{RT_0} r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) \right];$$

$$\left[ (Q_0 - Q_{n0}) \frac{P}{P_0} \right];$$

$$K_{21} = \frac{(c_2 T_{20} - c T_0) F_{20}}{\Pi_2} \quad \text{– коефіцієнт};$$

$$K_{22} = \frac{F_{10} c_1 T_{10}}{\Pi_2} \quad \text{– коефіцієнт}; \quad K_{23} = \frac{F_{20} c_2 T_{20}}{\Pi_2} \quad \text{–}$$

коефіцієнт;  $K_{24} = \frac{F_{10} (c_1 T_{10} - c T_0)}{\Pi_2} \quad \text{– коефіцієнт};$

$$K_{25} = -\frac{r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_{n0} \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} \quad \text{– коефіцієнт};$$

$$K_{26} = \frac{r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) (Q_0 - Q_{n0}) \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} \quad \text{–}$$

коефіцієнт;  $K_{27} = \frac{r \rho V K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) Q_0 \frac{P}{P_0}}{\Pi_2} \quad \text{–}$

коефіцієнт.

Рівняння (5) є частковою динамічною математичною моделлю газового реактора за температурою.

Аналізуючи отримані часткові ММ газового реактора, слід зробити висновок, що вихідні координати є взаємозалежними. Рівняння (3) та (5) утворюють систему рівнянь. Для того, щоб виключити залежність однієї вихідної координати від інших, слід розв'язати систему рівнянь (6).

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = K_{11}x_1 + K_{12}z_2 + K_{13}z_4 + K_{14}z_5 + \\ + K_{15}z_6 + K_{16}y_2 \\ \tau_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = K_{21}x_1 + K_{22}z_1 + K_{23}z_3 + K_{24}z_5 + \\ + K_{25}z_6 + K_{26}z_7 + K_{27}y_1 \end{array} \right. \quad (6)$$

Система рівнянь (6) може бути розв'язана будь-яким методом. Це можна зробити використовуючи, наприклад, матричний метод розв'язання системи рівнянь, як це було показано раніше.

Аналогічним чином складаються системи рівнянь для другої та третьої полиць реактора. Ці три системи рівнянь сумісно з математичною моделлю внутрішнього теплообмінника, який являє собою кожухотрубчастий теплообмінник (вивід динамічної математичної моделі наведений в [5]), складають математичну модель колони синтезу аміаку у виробництві аміаку.

**Висновок.** Отримана динамічна модель дозволяє адекватно описати характер зміни параметрів у діапазоні, якій значно перевищує регламентні межі. Це особливо важливо при застосуванні її у системах контролю безпеки реактора та технологічних тренажерах. Урахування в моделі процесу хімічної реакції дозволяє контролювати такий складний параметр як зміна активності каталізатора. Цей показник є дуже важливим при визначенні необхідності адаптації моделі. Адаптація моделі одночасно забезпечує її адекватність як у системі оптимізації, так і у автоматизованій системі регулювання.

### Л і т е р а т у р а

1. Амелин А.Г. Общая химическая технология [Текст] / А.Г.Амелин, А.М.Кутепов – М.: Химия, 1977. – 324 с.
2. Стенцель Й.І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Підручник [Текст] / Й.І. Стенцель, О.В. Поркуян - Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2010. – 300 с.
3. Математичне моделювання технологічних об'єктів [Текст] : Підручник / О.Б.Целіщев, П.Й.Єлісеєв, М.Г.Лорія, І.І.Захаров – Луганськ. Вид-во Східноукр. нац. унів. ім. В. Даля, 2011. – 421 с.
4. Принципы математического моделирования химико-технологических систем [Текст] / В.В.Кафаров, В.Л.Перов, В.П.Мешалкин и др.– М.: Химия, 1974. – 344 с.
5. Spatial Self-Organization in One Process of Chemical Technology [Text] : International Conference on Differential Equations and Dynamical Systems., 1-4 August 1997. Canada. Waterloo : 1997. - P. 166.
6. Thermal Spots in an Industrial Packed Bed Catalytic Reactor [Text] : Year 2000 International Conference on Dynamical Systems and Differential Equations (ICDSDE) Abstracts Book. USA, Kennesaw, 2000. - P.81.
7. Абдалхамид, Д. Система экстремального управления многополочным реактором с моделью [Текст] / Д.Абдалхамид, М.Г.Лорія, А.Б.Целищев, П.И.Елисеєв // Вісник СХУ. - 2012. - №15(186). - ч.2. - С.152-156.

### References

1. Amelin A.G., General chemical technology. (1977). Moscow, USSR:Higher school, 448с.
2. Stentsel Y.I., (2010). *Avtomatyzatsiia tekhnologichnykh protsesiv khimichnykh vyrobnytstv, Pidruchnyk* [Automation of technological processes of chemical production, Textbook], Luhansk, vyd-vo Skhidnoukr. nats. uh-tu im. V. Dalia, , 300 p.
3. Tselishchev O.B. (2011), *Matematychni modelyuvannia tekhnologichnykh obektiv* [Mathematical modeling of technological objects], Luhansk. Vyd-vo Skhidnoukr. nats. uh-tu im. V. Dalia, 421 p.
4. Kafarov V.V., (1974).Principles of mathematical design of the chemical-technological systems. Moscow, USSR:Chemistry,. 344 p.
5. Spatial Self-Organization in One Process of Chemical Technology [Text] : International Conference on Differential Equations and Dynamical Systems., 1-4 August 1997. Canada. Waterloo : 1997. - P. 166.
6. Thermal Spots in an Industrial Packed Bed Catalytic Reactor [Text] : Year 2000 International Conference on Dynamical Systems and Differential Equations (ICDSDE) Abstracts Book. USA, Kennesaw, 2000. - P.81.
7. D.Abdalhamid, (2012).System extreme management by a multishelf of Reactor with the model / D.Abdalhamid, Loria M.G., Tselishchev O.B., Yeliseiev P.Y., // Visnik SNU. - №15(186). - p.2. p.152-156p.

### **Kulikov D.O., Kupina O.A., Loria M.G., Tselishchev O.B. Us of a mathematical model for optimization of the dynamic parameters of ammonia production processes .**

*The work deals with the development of a mathematical model that can be used both for the optimization of the technological process and for the automated regulation system. The advantages of this approach are as follows: it is based on objective data that forms the control object itself; the implementation of such an approach is quite simple; obtaining an adequate and accurate mathematical model.*

*The study is conducted to optimize the technological process and the automated control system under consideration.*

*Adaptation of the model will ensure the effectiveness of both management strategies. To achieve the optimal dynamic model, the following tasks were solved:*

*- an informational and logical scheme of relationships between the parameters of the technological process under consideration was developed;*

*- mathematical models of the gas reactor based on the concentration of the target component and temperature were compiled.*

*The obtained dynamic model allows to adequately describe the nature of the change of parameters in a range that significantly exceeds the regulatory limits. This is especially important when it is used in reactor safety control systems and technological simulators.*

*As a result of research, it was established that taking into account the chemical reaction process in the model allows controlling such a complex parameter as the change in catalyst activity. This is a characteristic of the catalyst's ability to accelerate a chemical reaction. Catalytic activity is defined as the difference between the rates of the same reaction under the given conditions in the presence of a catalyst and without it, or as the ratio of these rates. Catalytic activity depends on the nature and number of active centers involved in the catalytic process. In the ideal case, when all*

*active centers of the catalyst participate in catalysis, the catalytic activity is the maximum number of molecules that reacted on one active center per unit of time. This indicator is very important when determining the necessity of adapting the model. The adaptation of the model simultaneously ensures its adequacy both in the optimization system and in the automated regulation system. Which is a significant advantage, because it allows you to use one mathematical model in several cases, which, in turn, is more expedient from an economic point of view.*

**Keywords:** *mathematical model, model adaptation, reactor, automated control system, optimization.*

**Куліков Д.О.** – аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [kulikov@ukr.net](mailto:kulikov@ukr.net)

**Купіна О.А.** – аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [kupina@snu.edu.ua](mailto:kupina@snu.edu.ua)

**Лорія М.Г.** – д.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [m\\_loria@snu.edu.ua](mailto:m_loria@snu.edu.ua)

**Целіщев О. Б.** – д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [atp00@ukr.net](mailto:atp00@ukr.net)

Стаття подана 11.10.2022.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-55-57>

UDK 629.4

## THE USE OF THE MULTIVARIATE ANTISKID SENSOR TO GAIN MAXIMUM TRAILED LOAD OF THE ROLLING STOCK

Mogyla V.I., Morneva M.O., Kovtanets M.V.

## ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО ПРОТИЮЗНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МАКСИМАЛЬНОЇ СИЛИ ТЯГИ РУХОМОГО СКЛАДУ

Могила В.І., Морнева М.О., Ковтанець М.В.

*The article examines the use of the antiskid sensor to gain maximum trailed load. Skidding means the slip of wheels of a vehicle (tram, railway carriage) along the bearing surface (road, rails) where the linear speed of the wheel surface is lower than the speed of the bearing surface towards the vehicle.*

*The wheel slip occurs during braking. It is caused by the excess braking force over the traction with the bearing surface. Skidding of rail vehicles leads to the wear-out of locked wheels in the place of their contact with the rail and to the flat area on the wheel tire.*

*To prevent skidding of railway vehicles, one should regulate the braking force, depending on the load, using the cargo automatic mode or apply systems and devices of antiskid and nonskid equipment of vehicle units. The system for gaining maximum trailed load by attaching rail vehicles to the electric drive should have a skidding detection device (tram, railway carriage). At specified parameters of the engine and traction converter, the coefficient of transmission and the time constant of the nonskid device are chosen in case of steadiness.*

*For this purpose, one linearizes the system and builds the stability area in plane of the specified parameters using the D-decomposition method.*

*The final choice of the coefficient of transmission and the time constant is made so that the system will be less subject to fluctuations and the slip speed will be as resilient as possible.*

*The system for gaining maximum trailed load by attaching rail vehicles to the electric drive will be optimized by its supplementing with corresponding technical means that can include the use of the multivariate antiskid sensor.*

*Contemporary antiskid devices involving quick-response electronic equipment will allow not just preventing wheel failures but also increasing the adhesive coefficient in contaminated areas of the route.*

*The use of the multivariate antiskid sensor will allow obtaining a more informative useful signal in order to expand the functional capacity of the sensor, increase the reliability of its operations, which will ensure maximum trailed load of the rolling stock.*

**Keywords:** sensor, electronic device, rods, skidding, electric transport, slip, adhesive coefficient.

**Introduction.** The skidding phenomenon is the slip of wheels of a locomotive or carriage along rails where the linear speed of the wheel surface is lower than the speed of the bearing rail surface. Skidding occurs during braking. It is caused by the excess braking force over the traction with the bearing surface. It appears not only during wheels locking up but also during their rotation when the wheel slips along the road [1].

**The goal of the research** is to investigate the impact of using the antiskid sensor to gain maximum trailed load of the rolling stock.

**Research results.** Skidding of rail vehicles (tram, railway rolling stock, subway) leads to the wear-out of locked wheels in the place of their contact with the rail and to the flat area on the wheel tire, the so-called wheel flat. Wheel flats (asymmetry of wheels towards the rotation axis) results in the increase in noisiness (chattering from rail strokes), vibration (the distance from the wheelset axle to the rail surface is unsteady when moving), uneven wear of rails (so-called corrugated rail wear) [2].

To avoid skidding and ensure its prevention in railway vehicles, one should regulate the braking force, depending on the load, using the cargo automatic mode or apply systems and devices of antiskid and nonskid equipment of vehicle units.

Therefore, the system for gaining maximum trailed load by attaching rail vehicles to the electric drive should have a skidding detection device that forms a feedback control signal proportional to the speed of excess wheel slip. At specified parameters of the engine and traction converter, the coefficient of transmission and the time constant of the nonskid device are chosen in case of steadiness. For this purpose, one linearizes the system and builds the stability area in plane of the specified parameters using the D-decomposition method.

In the built area, one takes initial points for which the calculation of the transient process is conducted on the model considering the non-linear nature of the adhesion characteristics in order to define quality indicators. The final choice of the coefficient of transmission and the time constant is made so that the system will be less subject to fluctuations and the slip speed will be as resilient as possible [3]. The fluctuation of the transient process defines the use of the squared integral quality evaluation while the marginal resilient slip ensures the maximum traction effort in case of adhesion.

Thus, to avoid skidding and ensure its prevention in railway vehicles, one should regulate the braking force, depending on the load, using the cargo automatic mode [4] or apply systems and devices of antiskid and nonskid equipment of vehicle units.

The system for gaining maximum trailed load by attaching rail vehicles to the electric drive will be optimized by its supplementing with corresponding technical means that can include the use of the multivariate antiskid sensor [5].

Figure 1 shows a constructional scheme of the multivariate antiskid sensor that contains body 1 with embedded axis 4 in bearing bushes 2 and 3, on which bob weight 5 is set, and bob weight 7 is set via resilient element 6 along with permanent bar magnet 8, 9, the first and third differential flux-gate magnetometers 10-12, element HI 13, element I 14, analog-to-digital converter 15, computing block 16, and frequency counter 17.

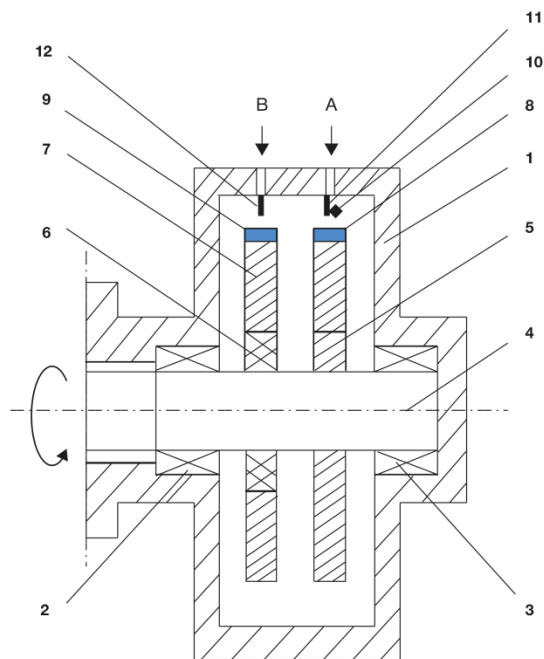


Fig. 1. Constructional scheme of the multivariate antiskid sensor

In the stationary velocity node, bob weights 5, 7 rotate simultaneously. The movement of permanent bar

magnets 8, 9 towards the first and third differential flux-gate magnetometers 10-12 at the output of the first differential flux-gate magnetometer 10 results in signal  $H_{zop}$  that enables transmission through the second input of element I 14 of short pulses formed at the output of element HI 13, to the input of which the zero signal from the second differential flux-gate magnetometer 11 is given, which reads the vertical intensity of magnetic field  $H_{верп}$  during its staying on magnetic neutral axis  $n-n$  of permanent bar magnet 8 (Fig. 2). This results in short pulses at the output of element I 14 with frequency  $f$  of axis rotation 4, which are given to the control input of analog-to-digital converter 15 and frequency counter 17. At the same time, a signal at the output of the third differential flux-gate magnetometer 12 is absent.

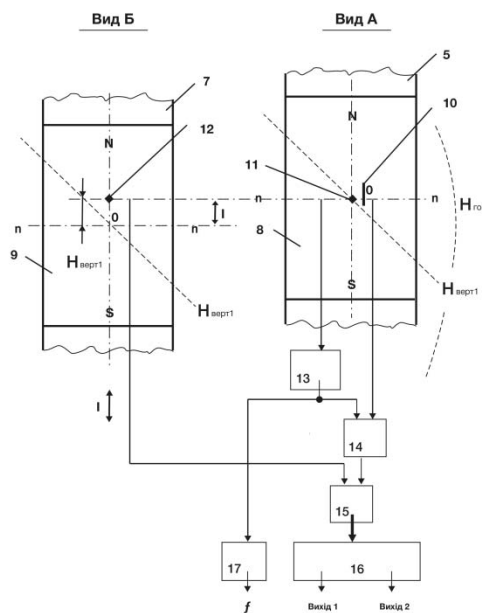


Fig. 2. Principle diagram of multivariate antiskid sensor operations

During vehicle movement, while braking and when wheels can shift to skidding, bob weight 7 rotates towards bob weight 5 using resilient element 6 as a result of inertness, outrunning it at a corresponding angle. Meanwhile, permanent bar magnet 9 along with bob weight 7 is screwed up around at distance  $l$  towards permanent bar magnet 8 (Fig. 2). At the same time, signal  $H_{zop}$  proportional to displacement  $l$  occurs at the output of the third differential flux-gate magnetometer 12 that reads the vertical intensity of magnetic field,  $H_{верп}$  which goes to the information input of analog-to-digital converter 15 and then to computing block 16, the output of which *Output 1* results in the *Braking/Skidding* signal (depending on its value) (Fig. 2).

During vehicle movement, while speeding up and when wheels can shift to dragging, bob weight 7 rotates towards bob weight 5 using resilient element 6 as a

result of inertness, failing to keep pace with it at a corresponding angle. In this case, signal  $H_{\text{верт}}$  proportional to displacement  $l$  occurs at the output of the third differential flux-gate magnetometer 12, which goes to the information input of analog-to-digital converter 15 and then to computing block 16, the output of which

**Conclusions.** The use of the multivariate antiskid sensor will allow obtaining a more informative useful signal that will enable analyzing braking, skidding, speeding up and dragging modes of the vehicle. After the analysis, one will be able to expand the functional capacity of the sensor, increase the reliability of its operations, which will ensure maximum trailed load of the rolling stock.

Contemporary antiskid devices involving quick-response electronic equipment will allow not just preventing wheel failures but also increasing the adhesive coefficient in contaminated areas of the route.

### References

1. Bobyr, D.V., Hryshchenko, M.A., Serdiuk, V.N. Teoriia lokomotyvnoi tiahы / D.V. Bobyr, M.A. Hryshchenko, V.N. Serdiuk; UDUNT; NNI «Dniprov. in-t infrastruktury i transp.» – Dnipro, 2022. – 385 p
2. Ukraine's Railway Operating Rules. Kyiv, 2002. - 132 p.
3. CD-0058 Instructions on railway traffic and shunting activities on Ukrainian railways. Kyiv, 2005. - 462 p.
4. Development strategy of Ukrainian Railways JSC for 2019-2023. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/591-2019-%D1%80#Text>
5. Multivariate antiskid sensor. Utility model patent No. 120241 dd. October 25, 2017. / Smyrnyi M. (UA); Mohyla V. (UA); Horbunov M. (UA); Kovtanets M. (UA). Bulletin No. 20, 2017.

### Literatura

1. Бобир Д.В., Грищенко М.А., Сердюк В.Н. Теорія локомотивної тяги / Д.В. Бобир, М.А.Грищенко, В.Н. Сердюк; УДУНТ; ННІ «Дніпров. ін-т інфраструктури і трансп.» – Дніпро, 2022. – 385 с.
2. Правила експлуатації залізниць України. Київ, 2002. - 132 с.
3. CD-0058 Інструкція з залізничного руху та маневрової діяльності на залізницях України. Київ, 2005. - 462 с.
4. Стратегія розвитку АТ «Українська залізниця» на 2019-2023 роки. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/591-2019-%D1%80#Текст>
5. Багатоваріантний датчик протиковзання. Патент на корисну модель № 120241 від 25 жовтня 2017 р. / Смирний М. (UA); Могила В. (UA); Горбунов М. (UA); Ковтанець М. (UA). Вісник № 20, 2017.

**Могила В.І., Морнева М.О., Ковтанець М.В. Використання багатопараметрового протиюзного датчика для реалізації максимальної сили тяги рухомого складу**

*У статті розглянуто питання щодо використання протиюзного датчика для досягнення максимальної сили*

*тяги. Юз - ковзання по опорній поверхні (дорозі, рейках) коліс транспортного засобу (трамваю, залізничного вагона), при якому лінійна швидкість поверхні коліс нижче швидкості опорної поверхні щодо транспортного засобу.*

*Юз спостерігається при гальмуванні, причиною юза є перевищення зусилля гальма над силою зчеплення колеса з опорною поверхнею. Для рейкових транспортних засобів рух юзом призводить до стирання заблокованих коліс у місці їх стикання з рейкою та появи на бандажі колеса плоскої ділянки.*

*Щоб забезпечити попередження юзу на залізничному транспорті застосовується регулювання гальмівного зусилля залежно від завантаження з допомогою вантажного авторежиму або використання систем та пристроїв протиюзного та протибуксувального обладнання одиниць транспортного складу. Система реалізації максимальної сили тяги за умовами зчеплення рейкових транспортних засобів з електричним приводом повинна мати пристрій виявлення юза.*

*Остаточний вибір коефіцієнта пропускання та постійної часу робиться таким чином, щоб система була менш схильна до коливань, а швидкість ковзання була максимально стійкою. Сучасні пристрої з використанням швидкодіючої електронної апаратури дозволяють не тільки запобігти поломці коліс, але й підвищити коефіцієнт зчеплення на забруднених ділянках траси.*

*При заданих параметрах двигуна і тягового перетворювача коефіцієнт передачі і стала часу протибуксувального пристрою вибирається за умови стійкості.*

*Остаточний вибір коефіцієнта передачі, сталої часу здійснюється таким чином, щоб система була якомога менш схильна до коливань, а швидкість ковзання була близька до максимально пружної.*

*Використання багатопараметрового протиюзного датчика дозволяє отримати більш інформативний корисний сигнал, щоб розширити функціональні можливості датчика, підвищити надійність його роботи, що сприятиме забезпеченню реалізації максимальної сили тяги рухомого складу залізниці.*

*Сучасні протиковзані пристрої з використанням швидкодіючої електронної апаратури дозволяють не тільки запобігти поломці коліс, але й підвищити коефіцієнт зчеплення на забруднених ділянках траси.*

**Ключові слова:** датчик, електронний прилад, сила тяги, юз, електротранспорт, ковзання, коефіцієнт зчеплення.

**Могила В.І.** – к.т.н., професор кафедри залізнично-го, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [vmogilal@ukr.net](mailto:vmogilal@ukr.net)

**Морнева М.О.** – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [morneva@snu.edu.ua](mailto:morneva@snu.edu.ua)

**Ковтанець М.В.** - доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [kovtanetsm@gmail.com](mailto:kovtanetsm@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-58-64>

УДК 629.4

## КОНЦЕПЦІЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСНОЇ РЕНОВАЦІЇ І РЕГЕНЕРАЦІЇ ГУМОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ, ОЛІЙ ТА КОМПОЗИТІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ З ОТРИМАННЯМ НОВИХ ЯКОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

Могила В.І., Ковтанець М.В., Морнева М.О., Ковтанець Т.М.

## CONCEPT AND IMPLEMENTATION OF COMPLEX RENOVATION AND REGENERATION OF RUBBER ENGINEERING PRODUCTS, OILS AND COMPOSITES OF RAILWAY TRANSPORT WITH OBTAINING NEW QUALITY OF MATERIALS

Mogila V.I., Kovtanets M.V., Morneva M.O., Kovtanets T.M.

*Робота присвячена створенню наукової теорії концепції та закономірностей пов'язаних з переробкою промислових відходів залізничної галузі – ГТВ (гумотехнічних виробів), олій і мастил, накладок пантографів, гальмових коллодок, обрuntuванню їх екологічної небезпеки та розробці комплексних способів реновації, регенерації, утилізації для мінімізації антропогенного впливу на навколишнє середовище. Аналіз сучасного стану застосування технологій реновації, регенерації ГТВ, олій вуглеводородних полімерів, теоретичне та експериментальне дослідження властивостей відпрацьованих матеріалів, температури, вмісту води та інших параметрів, вплив локального охолодження високочастотних (ВЧ) і понад високочастотних (ПВЧ) електромагнітних полів відпрацьованих матеріалів, використання озону для інтенсифікації деструкції гумотехнічних виробів, що дозволить розробити екологічно-безпечні способи регенерації, реновації та утилізації ГТВ різного складу і терміну зберігання.*

*Запропоновано спосіб отримання рідкого та газоподібного палива з відходів гумо-мастильних матеріалів, в якому ключове блоку інноваційних технічних рішень, а саме: збудження ультразвукових коливань для руйнування гумових відходів; розігрів металевих корд наведенням току високої частоти; збудження електромагнітних коливань корду; озон в піролізній камері для покращення розчину гуми та утворення однорідної суміші. Встановлено, що під дією озону відбувається швидке окислення гумових відходів у зв'язку із руйнуванням міжмолекулярних та внутрішньо-молекулярних зв'язків. Тому, при наявності на поверхні гуми мікротріщин (кількість яких значна для відпрацьованих шин), насамперед починається атака озоном тих молекул, які розташовані у вершинах тріщин, що приводить до швидкого розростання тріщин і розпаду матеріалу на шматки з порівняно гладкими поверхнями. У випадку озонної атаки, поверхні шматків, що утворилися, окислені, тобто на поверхнях знижується молекулярна маса й з'являються киснево-містять продукти окислення гуми. Паралельно з поданням озону та ультразвуку включають по черзі електромагніти, які створюють електромагнітне поле; металевий корд (входить до складу*

*гуми) по черзі рухається від одного магніта до іншого. Електромагніти активізують рух суміші. Таким чином досягається розчинення гуми, відділення її від металеві частини та високоефективне перемішування.*

**Ключові слова:** гумотехнічні вироби, утилізація, способи переробки, реновація, регенерація.

**Вступ.** В останні десятиріччя суттєво збільшилося виробництво всіх галузей промисловості, що призвело до утворення великої кількості відходів. Актуальність досліджень по освоєнню нових методів утилізації відходів безпосередньо пов'язана з екологічним аспектом забруднення навколишнього середовища відходами промислового виробництва [1]. Обмеженість запасів природних енергоресурсів диктує пошук нових методів реновації, регенерації, переробки відходів, що дозволить вирішити ряд проблем сучасної економіки та енергетики. Однією з найважливіших проблем, з якою зіткнулася світова цивілізація в даний час, є проблема забруднення навколишнього середовища відходами гумотехнічних виробів (ГТВ), олій, мастил, вуглеводородних полімерних матеріалів [2, 3]. До недавнього часу основними методами утилізації таких відходів було їх складування на полігонах або просте спалювання. Однак такі методи не вирішують проблему забруднення навколишнього середовища, так як по-перше для більшості матеріалів просто не існує мікроорганізмів, здатних перетворювати їх в безпечні для навколишнього середовища речовини, а по-друге, при спалюванні, утворюється значна кількість газоподібних і твердих відходів, які, в свою чергу, також необхідно утилізувати. У зв'язку з цим розробка ефективних способів утилізації відходів таких матеріалів є однією з першорядних завдань світової спільноти.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В процесі експлуатації та подальшої переробки výro-

бів та матеріалів, зокрема залізничного транспорту, відбуваються численні фізико-хімічні перетворення. Досліджено зміни: молекулярного складу; мікро- і макроструктури каучуків, що входять у рецептуру відпрацьованих гум (підрейкових прокладок, шлангів, олій, накладок пантографу, гальмових колодок; їх хімічної структури; стану мікроагрегації, щільності вулканізаційної сітки, рівня деструкції на різних стадіях переробки.

Об'єктами дослідження служили: ГТВ (шланги, гумові ущільнювальні для гальмових пневматичних систем рухомого складу залізниць, прокладки гумові для рейкової колі, кільця гумові ущільнювальні і тощо), олії, мастила, гальмівні колодки, накладки пантографу вітчизняного та імпорного виробництва, як нових, так і вийшовших з експлуатації; різні за розмірами фракції гумової крихти, а також регенерат, отриманий комбінованої механотермохімічної деструкції [2]. Для всіх перерахованих об'єктів дослідження здійснено поділ матеріалу на фракції. Для вихідних й тих, що пройшли експлуатацію або переробку зразків, проведено структурний аналіз за результатами динамічної механічної спектроскопії (температурний інтервал від -100 до +1500 °С, частота 20 Гц) на маятниковому еластометрі в скануючому температурному режимі. Для фракції проведені дослідження молекулярного складу, хімічної структури, гетерогенності (методами оптичної мікроскопії та світлорозсіювання).

Останнім часом у пресі, наукових публікаціях і патентах з'явилось багато повідомлень про різні напрямки і засоби переробки відходів матеріалів у цінні органічні речовини [2, 3, 4]. Одним з таких напрямків є їх термічна і термокаталітична деструкція у вуглеводневі фракції, які після відповідної обробки можуть бути використані в якості високоякісного моторного палива. Інформація, наведена в літературних джерелах, носить не систематичний і, найчастіше, суперечливий характер.

У зв'язку з цим, дослідження процесів термічної і фізико-хімічної термокаталітичної деструкції матеріалів і розробка високоєфективних промислових способів переробки відходів полімерних матеріалів є досить актуальним завданням.

Ефективним методом переробки складних полімерних відходів є низькотемпературна деструкція (піроліз) [3, 5]. Для газоподібних палив при більш низьких енергетичних витратах на проведення удосконалення термічних методів переробки полімерних відходів актуальним є пошук нових каталізаторів, які мають високу активність і дешевизну. Важливість цієї проблеми характеризується відсутністю фахових публікацій в наукових виданнях за останні роки.

Гуми на основі натурального каучуку, ізопрену, бутадієну і їх сополімерів з стиролом мають в своїй структурі ненасичені зв'язки, які активно взаємодіють з озоном, і цей фактор можна використовувати в технологічному процесі їх переробки. Гельпроникаючої хроматографії. В результаті були отримані ві-

домості про обсяги розчиненого матеріалу, середньо-чисельної і середньо-масової молекулярної маси, полідисперсності, знайдена величина характеристичної в'язкості. При порівнянні різних способів регенерації методом світлової мікроскопії визначали розміри гумових включень, які не зазнали змін у процесі обробки. На основі крихти і регенерату були отримані вулканізат за єдиною рецептурою і проведені стандартні випробування їх фізико-механічних властивостей.

Серед найважливіших властивостей регенератів, необхідних для оцінки їх здатності до переробки і з точки зору можливості використання при створенні нових виробів, оцінювали термоокислювальну стабільність (дериватографія, ДСК), теплофізичні параметри і діелектричні властивості [4, 5, 6, 7]. Досліджено можливість подрібнення гуми накладок і колодок за новими рішеннями та способами. Знайдено реагенти, які прискорюють досліджуваний процес. Так, оксидативні процеси, що викликають деструкцію органічних сполук під дією озону, повинні прискорювати переробку полімерних відходів і можуть відігравати значну роль в науковій теорії реновації та утилізації, що потребує подальших комплексних досліджень.

Для удосконалення термічних методів переробки полімерних відходів актуальним є пошук нових каталізаторів, які мають високу активність і дешевизну. Важливість цієї проблеми характеризується відсутністю фахових публікацій в наукових виданнях за останні роки. Гуми на основі натурального каучуку, ізопрену, бутадієну і їх сополімерів з стиролом мають в своїй структурі ненасичені зв'язки, які активно взаємодіють з озоном, і цей фактор можна використовувати в технологічному процесі їх переробки.

З огляду на той факт, що кількість щорічно відпрацьованих відходів велика за обсягом (понад 200 млн. тонн), розробка високоєфективної технології їх переробки, вторинного використання, перетворення у вуглеводневі паливні фракції дозволить зберегти енергетичні і матеріальні ресурси, створити додаткове джерело виробництва моторного палива і олії та частково вирішити проблему його дефіциту [6, 8, 9].

Зношена деталь (гальмівна колодка, накладки пантографу), відпрацьовані олії, мастила, ГТВ представляє собою цінну вторинну сировину, що містить 65-70% гуми (каучук), 15-25% технічного вуглецю, 10-15% металу, тому буде просто злочинно викидати «зношені ГТВ». Вуглець, який міститься в полімерах, необхідно переробляти і залучати отриманий в результаті комплексної багатостадійної переробки, в економічний оборот.

Завдяки унікальному складу ГТВ, олії, мастила вуглецеві матеріали є цінними вторинними ресурсами, які доцільно переробляти екологічно чистими методами і економічно вигідним шляхом. Розробка екологічно безпечних способів реновації, регенерації, знешкодження та утилізації відпрацьованих матеріалів із застосуванням дешевих активаторів і сор-

бентів, отриманих з відходів різних галузей, є актуальним і затребуваним завданням.

Встановлення основних закономірностей протікання піролізу ГТВ в присутності каталізаторів фізико-хімічних методів аналізу дозволить визначити оптимальні параметри проведення процесу (температура, вид і концентрація хлориду металу), що в подальшому позначиться на збільшенні ефективності процесу переробки [4, 6, 7, 8].

Озон в процесі деструкції полімерів здатен виконувати роль «хімічного ножа», що дозволить істотно підвищити ефективність технології їх переробки.

Кількість ГВР, яку можна використати для їх реновації і регенерації, у загальному випадку визначають за формулою [5]:

$$H = C \cdot P, \quad (1)$$

де  $H$  – норма відходів, що утворюються, кг/кг, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$C$  – обсяг продукції або сировини, при виробництві або переробці якої утворюються відходи, кг, м<sup>2</sup>, м<sup>3</sup>;

$P$  – безрозмірний коефіцієнт, що враховує частку відходів, придатних для використання (у кожному конкретному випадку цей коефіцієнт визначається в залежності від придатності відходів для переробки по напрямках використання).

Для підвищення рівня використання відходів важливе значення має вдосконалення системи ціноутворення на відходи й одержувану з них продукцію. Ціну відходів, наприклад, механічної переробки сировини й матеріалів визначають, виходячи із ціни сировини, що переробляється, або повноцінного матеріалу за допомогою коефіцієнта перерахування ціни, розмір якого залежить від споживчих властивостей відходів, тобто від ступеня їх придатності до використання. Основою для визначення економічної ефективності виробництва продукції з ГТВ є його співставлення з виробництвом цієї ж продукції з вихідної сировини, згідно формули [5]:

$$E = (BP \cdot I - BB) \cdot QB, \quad (2)$$

де  $E$  – ефективність використання відходів, грн./одиницю продукції;

$BP$  і  $BB$  – приведені витрати на одиницю продукції відповідно з первинної сировини (матеріалу) і з відходів, грн.;

$I$  – коефіцієнт, що враховує споживчі властивості продукції з первинної сировини й відходів ( $I = QP / QB$ );

$QB$  – кількість продукції, виробленої з відходів на рік (за звітний період);

$QP$  – кількість продукції з первинної сировини, рівноцінної по споживчим властивостям кількості продукції з відходів.

Визначення норми відходів можна розглянути на прикладі збору відпрацьованих мастил – найпоширеніших і цінних відходів промисловості й тран-

спорту [1]. Під нормуванням відходів відпрацьованих мастил розуміється визначення планової міри їх збору. Норми збору відпрацьованих мастил по ступеню агрегації (укрупнення) підрозділяються на індивідуальні й групові. Індивідуальна норма збору – це технічно обґрунтована кількість відпрацьованих мастил, які витягаються із всіх мастиломістких ємностей з одиниці рухомого складу. Групова норма збору відпрацьованих мастил (нормований збір за рік) – це збір мастил із загальної кількості одиномного устаткування, зайнятого в реалізації планових завдань по кожному рівню планування (депо – відділення дороги – міністерство). Групові норми збору відпрацьованих мастил розраховують на підставі індивідуальних норм.

Вихідними даними для визначення індивідуальних норм збору відпрацьованих масел є:

$V_i$  – заправна місткість конкретного локомотива(беруть з інструкції з експлуатації машин);

$K_{nj}$  – коефіцієнт повноти виходу відпрацьованих масел (залежить від особливостей конструкції ємності системи змазування, в'язкості вживаних масел, температури зливного масла, розташування та типу зливних отворів, місця установки конкретного типу устаткування), приймається в межах від 0,8 до 0,95.

У загальному випадку  $K_{nj}$  є функцією  $f$  відношення кількості (об'єму) злитого масла  $V_{злит}$  до кількості (об'єму) заправленого  $V_i$ .

$$K_{nj} = f \cdot (V_{злит}/V_i), \quad (3)$$

Індивідуальна норма збору відпрацьованого моторного або індустріального мастила для всіх видів техніки й устаткування, а також залізничного транспорту розраховується за формулою:

$$N_{isj} = V_i \cdot K_{ni}, \quad (4)$$

де  $N_{isj}$  – індивідуальна норма збору моторного або індустріального мастила для одиниці устаткування певного типу в натуральних одиницях, кг, т.

Проведений фахівцями аналіз показує, що норми збору мастил в Україні значно нижчі, ніж у багатьох інших країнах. Це обумовлюється, мабуть, відсутністю єдиних твердих норм втрат для відпрацьованих нафтопродуктів. Так, наприклад, у Польщі збір відпрацьованих індустріальних мастил становить 50%, а трансформаторних – 90%; приблизно такі ж норми збору нафтопродуктів установлені в Болгарії і ряді інших країн. В Україні для різних підприємств міського господарства норми збору становлять: моторних мастил автотракторного парку – 25%, індустріальних відпрацьованих мастил – 35% [1]. При цьому слід зазначити, що якщо збір нафтопродуктів груп ММВ (масло моторне відпрацьоване) і МІВ (масло індустріальне відпрацьоване) планується й нормується директивними органами, то збір груп СНВ (суміш нафтопродуктів відпрацьована), куди входять і нафтопродукти, практично не плану-

ється й не нормується. Методичні основи визначення обсягів утворення відходів були розроблені практично у всіх провідних галузях промисловості країни.

Норму утворення відходів фізико-хімічно-термічної переробки (обробки) сировини й матеріалів розраховують як різницю між нормою витрати сировини й матеріалів на одиницю продукції та їх чистою (корисною) витратою, з урахуванням неминучих втрат, обумовлених технологічним режимом даного виробництва, а також рівнем організації виробничого процесу згідно формули:

$$N_y = N - Q - q \cdot a, \tag{5}$$

де  $N$  – норма витрати сировини, матеріалів, кг/т, т/т, т/м, т/м<sup>2</sup> та ін.;

$Q$  – чиста (корисна) витрата сировини, матеріалів на одиницю готової продукції, т, м<sup>2</sup>;

$q$  – неминучі втрати при випуску готової продукції, м, шт. та ін.;

$a$  – вид неминучих втрат,  $a = 1 \dots m$ .

Кількість відходів виробництва, що можуть бути використані для одержання нових видів продукції, згідно з формулою дорівнює:

$$N_v = N_o \cdot V \cdot p, \tag{6}$$

де  $V$  – обсяг продукції або сировини, при переробці якого утворюються відходи, т;

$p$  – коефіцієнт, що враховує частку відходів, придатних для використання.

Підприємство повинно самостійно визначати та подавати відомості про подальше поводження з відходами за місцем надходження, зокрема зазначають: утилізацію, переробку, знешкодження, тимчасове зберігання, транспортування, захоронення, спалення чи компостування [1, 10].

**Мета дослідження** полягає в проведенні комплексного дослідження процесів деструкції найпоширеніших відходів ГТВ в середовищі мастильних матеріалів та інших з одночасним детальним аналізом складу продуктів, що утворюються.

**Результати дослідження.** Розробка технічних рішень основана на енергозберігаючих технологіях. Паливо, отримане на основі запропонованих способів [11, 12, 13, 14], може бути використане у теплоенергетичних установках та на транспортних засобах, які працюють на рідкому вуглеводному та газоподібному паливі. Технологія одержання палива запатентованими способами відрізняється:

простотою технологічного процесу (незначна тривалість процесу здрибнювання відходів гумо-мастильних матеріалів транспортних засобів та безпосередньо одержання палива);

високою якістю одержуваного рідкого вуглеводного палива;

не потребує використання значної кількості рідких каталізаторів;

не енергоємна (незначні енерговитрати на підігрів під час процесу);

не матеріалоємна.

Спосіб отримання рідкого та газоподібного палива з відходів гумо-мастильних матеріалів (рис. 1), в якому заключне блок інноваційних технічних рішень, а саме: збудженням ультразвукових коливань для руйнування гумових відходів; розігрів металевих корд наведенням току високої частоти; збудження електромагнітних коливань корду; озон в піролізній камері для покращення розчину гуми та утворення однорідної суміші, працює наступним чином.

Гумові матеріали завантажують до піролізного апарату крізь живильник. Для розчину гуми додають низькопробний бензин (типу «Калоша») за пропорцією 1:1, суміш перемішують. До одержаного продукту додають відпрацьоване мастило у пропорції 1:1. Для зм'якшення гумових відходів піролізний апарат підключають до току високої частоти, що сприяє підвищенню температури у апараті та розм'якшенню гумо-мастильної суміші. На наступному етапі знімається струм високої частоти й до камери через насос подається озон та включається апарат, що створює ультразвукові коливання в камері з сумішшю.

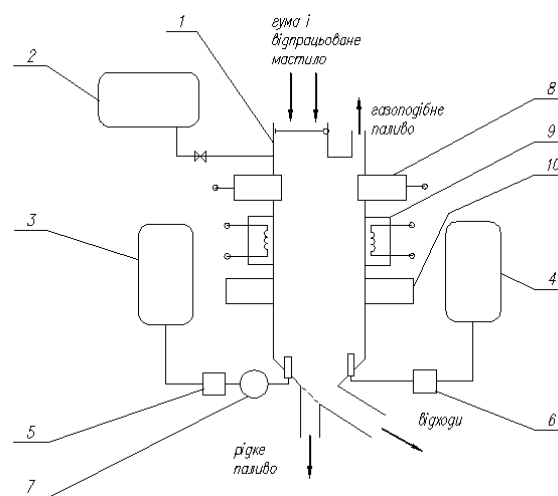


Рис. 1. Схема установки для одержання рідкого та газоподібного вуглеводного палива з відходів гумо-мастильних матеріалів транспортних засобів:

- 1 – корпус піролізного апарату; 2 – резервуар з низькоякісним вуглеводним паливом; 3 – резервуар з водою; 4 – озонатор; 5 – насос; 6 – насос;
- 7 – випарувач; 8 – електрод струму високої частоти; 9 – електромагніт; 10 – джерело ультразвукових коливань

Під дією озону відбувається швидке окислення гумових відходів (рис. 2) у зв'язку із руйнуванням міжмолекулярних та внутрішньо-молекулярних зв'язків [10, 14]. Тому, при наявності на поверхні гуми мікротріщин (кількість яких значна для відпрацьованих шин), насамперед починається атака озоном тих молекул, які розташовані у вершинах тріщин. Це приводить до швидкого розростання

тріщин і розпаду матеріалу на шматки з порівняно гладкими поверхнями. Ситуація схожа на низькотемпературне криогенне руйнування. Однак, у випадку озонної атаки, поверхні шматків, що утворилися, окислені, тобто на поверхнях знижується молекулярна маса й з'являються киснево-містять продукти окислювання гуми.

У ході озонного розтріскування протікає тільки одна хімічна реакція: озон реагує зі зв'язками макромолекул. В реакції беруть участь тільки зв'язки  $C=C$ , розташовані на поверхні (через велику швидкість реакції): озон попросту не встигає проникнути вглиб. Приєднання озону до подвійного зв'язку супроводжується її розривом з утворенням двох фрагментів. Передумови для виникнення тріщин створюються саме на цій стадії. Розтягнуті й нерозтягнуті елементи гумових відходів по-різному й поглинають озон. Це ілюструє рис. 2. Нерозтягнутий гумовий матеріал здатний швидко приєднати один-два еквіваленти озону (з розрахунку на зміст зв'язків  $C=C$  у поверхневому моношарі), потім швидкість поглинання озону зменшується в десятки разів. Якщо ж зразок був попередньо розтягнутий, то він при тій же швидкості реакції поглинає озону в кілька разів більше.

Реакція протікає при дуже низьких енерговитратах. Можна сказати, що озонне руйнування на частки певного розміру вимагає енерговитрат в 5-10 разів менше, ніж криогенне руйнування. Коли руйнування йде до дуже малих часток (менше 0,5-1 мм), те ефект окислювання в середньому виражений досить сильно. Якщо ж руйнування завершується утворенням часток 2-10 мм, то окислювання в середньому можна розглядати як слабе.

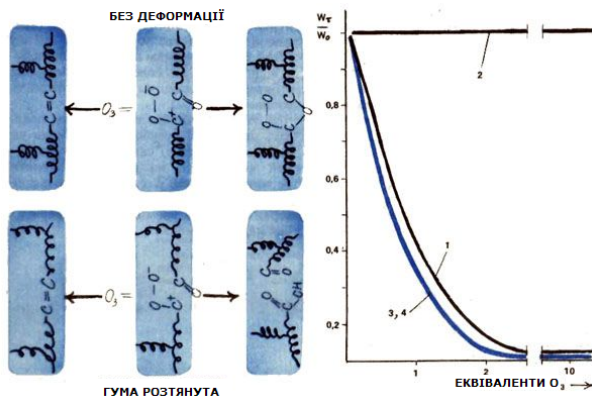


Рис. 2. Механізм реакції озону з подвійними зв'язками еластомеру – а;

б – графік, кінетики поглинання озону (в еквівалентах),  $W_0$  і  $W_1$  – швидкості поглинання озону вулканізованим еластомером:

1 – нерозтягнутий поліізопрен; 2 – поліізопрен, розтягнутий на 20 %; 3 і 4 – відповідно, розтягнутий і нерозтягнутий поліхлоропрен

Реакція протікає при дуже низьких енерговитратах. Можна сказати, що озонне руйнування на частки певного розміру вимагає енерговитрат в 5-10

разів менше, ніж криогенне руйнування. Коли руйнування йде до дуже малих часток (менше 0,5-1 мм), те ефект окислювання в середньому виражений досить сильно. Якщо ж руйнування завершується утворенням часток 2-10 мм, то окислювання в середньому можна розглядати як слабе.

Паралельно з поданням озону та ультразвуку включають по черзі електромагніти, які створюють електромагнітне поле; металевий корд (входить до складу гуми) по черзі рухається від одного магніта до іншого. Електромагніти активізують рух суміші. Таким чином досягається розчинення гуми, відділення її від металеві частини та високоефективне перемішування. На останньому етапі кризь суміш з відходів гумових виробів, низькосортного вуглеводного середовища та відпрацьованого мастила, пропускаяють водяну пару. Остання підігриває та омиває молекули суміші, на молекулярному рівні перевищує суміш у процесі борбатажу, що в свою чергу прискорює процес розчину гуми та утворення вуглеводного палива (як рідкого, так і газоподібного).

Застосування такого способу прискорює процес розчинення, переробки та сумішоутворення, підвищує якість отриманого пального.

Даним способом припускається переробляти 6 тонн на добу у відношенні 3 тонни гумових матеріалів до 3 тонн відпрацьованого мастила. Продуктивність способу за добу складає:

- по рідкому паливі – 4,2 тонни/добу;

- по газу – 0,3 тонни/добу;

- по вуглеводомістящому твердому залишку – 1,2 тонни/добу;

- по металокорду – 0,3 тонни/добу.

Вихід рідкого палива складає 70% від маси завантажених гумо-мастильної відходів, газу – 5 %; вуглеводомістящому твердому залишку – 20 %, металу – 5 %.

**Висновки.** Знайдено оптимальні умови здійснення процесів регенерації ГТВ і відпрацьованих мінеральних моторних масел у компоненти моторного палива.

Запропоновано ефективний каталізатор деструкції ГТВ у відпрацьованих оліях. Розроблено комплексний двохстадійний спосіб переробки відходів ГТВ в компоненти моторного палива, що включає їх деструкцію з каталізатором і гідрування рідких продуктів деструкції з отриманням компонентів моторних палив, що відповідають основним показникам ГОСТ.

Проведено фізико-хімічні дослідження закономірностей протікання процесу термодеструкції ГТВ в присутності каталізаторів.

Виконані експериментальні дослідження лягли в основу технології переробки відпрацьованих масел з використанням каталізаторів СВЧ, ЕМ поля. Результати експериментальних досліджень діелектричних і реологічних властивостей ВМ є необхідною базою для встановлення оптимальних параметрів впливу. Запропоновано спосіб зневоднення водонафтових емульсій впливом електромагнітного поля. Ре-

зультати дослідно-промислових випробувань показали високу ефективність запропонованої технології.

Запропонований спосіб реновації відпрацьованих накладок пантографів дозволяє повторно використовувати до 60 % вихідного матеріалу.

Запропоновано спосіб збільшення (в 2 рази) життєвого циклу накладок пантографу. Розроблена конструкція інструменту для подрібнення гумових підрейковий підкладок.

З локального охолодження зони обробки запропонувати ефективні каталізатори – для регенерації олії, прискорений деструкції ГТВ в олії.

Одержані науково-практичні результати свідчать про те, що відпрацьовані матеріали відходів ГТВ, гальмівних колодок, накладок пантографу, олій, мастил, вуглевмісних полімерних матеріалів, які раніше складувалися на полігонах або спалювалися, після науково-технологічної активізації відновили початкові якості, а деякі перетворені в альтернативні вуглеводні палива, що дозволить компенсувати зі значним прибутком витрачені на дослідження кошти.

Ці досягнення мають важливе значення для вітчизняної та світової науки та техніки і можуть використовуватися у різних галузях промисловості. Галузеві підприємства можуть використовувати наступні результати роботи:

1. Процеси термічної деструкції ГТВ і олій залізничного транспорту, що забезпечують 90-95% вихід рідких вуглеводнів.

2. Новий ефективний каталізатор для переробки відходів полімерних матеріалів на основі в рідкі вуглеводні.

3. Добавка вуглеводомістящого залишку деструкції ГТВ у кількості до 10% від ваги, в процесі окислення гудронів до бітуму, значно прискорює процес отримання бітумів різних марок.

4. Відпрацьовані частини електропровідних накладок пантографа електровоза застосовувати для повторного використання в якості вихідної сировини, що збільшить їх працездатність у 2 рази.

### Л і т е р а т у р а

1. Закон України «Про відходи» від 05.03.1998 р. № 187/98-ВР // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 16.12.2022)
2. Краснянский М.Е. Утилизация и рекуперация отходов: Учебное пособие. Харків: Бурун Книга, 2007. – 265 с.
3. Крашні європейські практики управління відходами (посібник) / А. Войціховська, О. Кравченко, О. Мелень-Забрамна, М. Панькевич // Львів: Видавництво «Компанія «Манускрипт»», 2019. – 64 с.
4. Ferrão P., Ribeiro P., Silvab P. A management system for end-of-life tyres: A Portuguese case study. Waste Management. Volume 28, Issue 3, 2008. – P. 604-614.
5. Рубан Е.В. Технологічні основи утилізації та рекуперції твердих промислових та побутових відходів: навчальний посібник / Е.В. Рубан, М.В. Островка, Н.Б. Куцька, Н.М. Соколенко, О.І. Будрик; під заг. ред.

проф. Попова Є.В. – Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2018. – 312 с.

6. Наркевич И.П. Утилизация и ликвидация отходов в технологии неорганических веществ / И.П. Наркевич, В.В. Печковский. М.: Химия, 1984. – 240 с.
7. Никуличев Ю.В. Управление отходами. Опыт Европейского союза. Аналит. Обзор. М.: РАН. ИНИОН. Центр науч.-информ.исслед. глобальной безоп. и регионал. пробл. Отд. проб. европ. безопасности., 2017. – 55 с.
8. Касимов А.М. Современные проблемы и решения в системе управления опасными отходами / А.М. Касимов, В.Т. Семенов, Н.Г. Щербань, В.В. Мясоедов. Харьков: ХНАГХ, 2008. – 510 с.
9. Nor H.M., Ebdon J.R. Ozonolysis of natural rubber in chloroform solution. Part 1. A study by GPS and FTIR spectroscopy// Polymer. 2000, V.41, P. 23-59.
10. Державний класифікатор України. Класифікатор відходів ДК 005-96 // База даних «Закони України» / Глявний правовий портал України. URL:[http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/FIN7371.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/FIN7371.html) (дата звернення:12.12.2022).
11. Патент України №3380 на корисну модель Спосіб одержання рідкого та газоподібного вуглеводного палива з відходів гумо мастильних матеріалів транспортних засобів / Могила В.І., Горбунов М.І., Аптекарь М.Д., Попова Н.В., Попов С.В., Малохатко А.О.; заявник і власник СНУ ім. В.Даля. – u20040402882; заявл. 20.04.2004; опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1. – 2 с.
12. Патент України №4303 на корисну модель Спосіб одержання рідкого та газоподібного вуглеводного палива з відходів гумо мастильних матеріалів транспортних засобів / Могила В.І., Горбунов М.І., Аптекарь М.Д., Басов Г.Г., Попова Н.В., Попов С.В., Малохатко А.О.; заявник і власник СНУ ім. В.Даля. – u2004020820; заявл. 05.02.2004; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11. – 2 с.
13. Патент України №66004 на корисну модель Спосіб одержання рідкого вуглеводного палива з відходів гумо-мастильних матеріалів транспортних засобів МПК (2006.01) C10G 1/10 / Горбунов М.І., Кравченко К.О., Шишковська Г.Ю., Горбунов М.М., Ноженко О.С., Шижко В.С., Ковтанець М.В., Скорняк С.С.; заявник і власник СНУ ім. В.Даля. – u201105051; заявл. 20.04.2011; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24. – 3 с.
14. Патент України №97701 на винахід Спосіб одержання рідкого та газоподібного вуглеводного палива з відходів гумомастильних матеріалів транспортних засобів МПК (2006.01) C10G 1/10 / Горбунов М.І., Могила В.І., Арапов О.А., Кравченко К.О., Скліфус Я.К., Горбунов М.М., Ноженко В.С., Ковтанець М.В.; заявник і власник СНУ ім. В.Даля. – u201006520; заявл. 28.05.2010; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5. – 2 с.

### References

1. Zakon Ukrayini «Pro vidhodi» vid 05.03.1998 r. № 187/98-VR // Baza danih «Zakonodavstvo Ukrayini» / VR Ukrayini. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80> (data zvernennya: 16.12.2022)
2. Krasnyanskiy M.E. Utilizaciya i rekuperaciya othodov: Uchebnoe posobie. Harkiv: Burun Kniga, 2007. – 265 s.
3. Krashi yevropejski praktiki upravlinnya vidhodami (posibnik) / A. Vojciovskaya, O. Kravchenko, O. Melen-Zabramna, M. Pankevich // Lviv: Vidavnicтво «Kompaniya «Manuskript»», 2019. – 64 s.

4. Ferraoa P., Ribeiroa P., Silvab P. A management system for end-of-life tyres: A Portuguese case study. *Waste Management*. Volume 28, Issue 3, 2008. – P. 604-614.
5. Ruban E.V. Tehnologichni osnovi utilizaciyi ta rekuperaciyi tverdih promislovih ta pobutovih vidhodiv: navchalnij posibnik / E.V. Ruban, M.V. Ostrovka, N.B. Kucka, N.M. Sokolenko, O.I. Budrik; pid zagal. red. prof. Popova Ye.V. – Syevyerodoneck: vid-vo SNU im. V. Dalya, 2018. – 312 s.
6. Narkevich I.P. Utilizaciya i likvidaciya othodov v tehnologii neorganicheskikh veshstv / I.P. Narkevich, V.V. Pechkovskij. M.: Himiya, 1984. – 240 s.
7. Nikulichev Yu.V. Upravlenie othodami. Opyt Evropejskogo soyuza. Analit. Obzor. M.: RAN. INION. Centr nauch.-inform.issled. globalnoj bezop. i regional. probl. Otd. prob. evrop. bezopasnosti., 2017. – 55 s.
8. Kasimov A.M. Sovremennye problemy i resheniya v sisteme upravleniya opasnymi othodami / A.M. Kasimov, V.T. Semenov, N.G. Sherban, V.V. Myasoedov. Harkov: HNAGH, 2008. – 510 s.
9. Nor H.M., Ebdon J.R. Ozonolysis of natural rubber in chloroform solution. Part 1. A study by GPS and FTIR spectroscopy// *Polymer*. 2000, V.41, P. 23-59.
10. Derzhavnij klasifikator Ukraini. Klasifikator vidhodiv DK 005-96 // Baza danih «Zakoni Ukraini» / Glavnyj pravovoj portal Ukrainy. URL:[http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/FIN7371.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/FIN7371.html) (data zvernennya: 12.12.2022).
11. Patent Ukraini №3380 na korisnu model Sposib oderzhannya ridkogo ta gazopodibnogo vuglevodnogo paliva z vidhodiv gumo mastilnih materialiv transportnih zasobiv / Mogila V.I., Gorbunov M.I., Aptekar M.D., Popova N.V., Popov S.V., Malohatko A.O.; zayavnik i vlasnik SNU im. V.Dalya. – u20040402882; zayavl. 20.04.2004; opubl. 17.01.2005, Byul. № 1. – 2 s.
12. Patent Ukraini №4303 na korisnu model Sposib oderzhannya ridkogo ta gazopodibnogo vuglevodnogo paliva z vidhodiv gumo mastilnih materialiv transportnih zasobiv / Mogila V.I., Gorbunov M.I., Aptekar M.D., Basov G.G., Popova N.V., Popov S.V., Malohatko A.O.; zayavnik i vlasnik SNU im. V.Dalya. – u2004020820; zayavl. 05.02.2004; opubl. 15.11.2004, Byul. № 11. – 2 s.
13. Patent Ukraini №66004 na korisnu model Sposib oderzhannya ridkogo vuglevodnogo paliva z vidhodiv gumo-mastilnih materialiv transportnih zasobiv MPK (2006.01) C10G 1/10 / Gorbunov M.I., Kravchenko K.O., Shishkovska G.Yu., Gorbunov M.M., Nozhenko O.S., Nozhenko V.S., Kovtanec M.V., Skornyakov S.S.; zayavnik i vlasnik SNU im. V.Dalya. – u201105051; zayavl. 20.04.2011; opubl. 26.12.2011, Byul. № 24. – 3 s.
14. Patent Ukraini №97701 na vinahid Sposib oderzhannya ridkogo ta gazopodibnogo vuglevodnogo paliva z vidhodiv gumomastilnih materialiv transportnih zasobiv MPK (2006.01) C10G 1/10 / Gorbunov M.I., Mogila V.I., Arapov O.A., Kravchenko K.O., Sklifus Ya.K., Gorbunov M.M., Nozhenko V.S., Kovtanec M.V.; zayavnik i vlasnik SNU im. V.Dalya. – u201006520; zayavl. 28.05.2010; opubl. 12.03.2012, Byul. № 5. – 2 s.

**Mogila V.I., Kovtanec M.V., Morneva M.O., Kovtanec T.M. Concept and implementation of complex renovation and regeneration of rubber products, oils and composites of railway transport with obtaining new qualities of materials**

*The work is devoted to the creation of a scientific theory of the concept and laws related to the processing of industrial waste of the railway industry – REP (rubber engineering*

*products), oil and lubricants, pantograph linings, brake pads, substantiation of their ecological danger and the development of complex methods of renovation, regeneration, disposal to minimize anthropogenic impact on the environment. Analysis of the current state of application of technologies of renovation, regeneration of REP, oils of carbon-containing polymers, theoretical and experimental research of the properties of waste materials, temperature, water content and other parameters, the effect of local cooling of high-frequency (HF) and over-high-frequency (OHF) electromagnetic fields of waste materials, use of ozone for the intensification of the destruction of rubber-technical products, which will allow to the destruction of rubber-technical products, which will allow to develop environmentally safe methods of regeneration, renovation and utilization of REP of different composition and shelf life.*

*A method of obtaining liquid and gaseous fuel from waste rubber-lubricant materials is proposed, in which the final block of innovative technical solutions, namely: the excitation of ultrasonic vibrations for the destruction of rubber waste; heating of metal cords by introducing a high-frequency current; excitation of electromagnetic vibrations of the cord; ozone in the pyrolysis chamber to improve the rubber solution and form a homogeneous mixture. It was established that rapid oxidation of rubber waste occurs due to the destruction of intermolecular and intramolecular bonds under the influence of ozone. Therefore, in the presence of microcracks on the surface of the rubber (the number of which is significant for used tires), ozone first begins to attack those molecules located at the tops of the cracks, which leads to the rapid growth of cracks and the disintegration of the material into pieces with relatively smooth surfaces. In the case of ozone attack, the surfaces of the formed pieces are oxidized, that is, the molecular weight decreases on the surfaces and oxygen-containing products of rubber oxidation appear. In parallel with the introduction of ozone and ultrasound, turn on electromagnets that create an electromagnetic field; the metal cord (included in the rubber) alternately moves from one magnet to another. Electromagnets activate the movement of the mixture. In this way, the dissolution of the rubber, its separation from the metal part and highly effective mixing are achieved.*

**Keywords:** *rubber engineering products, utilization, renovation, regeneration.*

**Могіла Валентин Іванович** – к.т.н., професор ка-федри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [vmogila@ukr.net](mailto:vmogila@ukr.net)  
**Ковтанець Максим Володимирович** – к.т.н., доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [kovtanetsm@gmail.com](mailto:kovtanetsm@gmail.com)  
**Морнева Марина Олегівна** – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, [morneva@snu.edu.ua](mailto:morneva@snu.edu.ua)  
**Ковтанець Тетяна Миколаївна** – молодший науковий співробітник кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; [kovtanec@gmail.com](mailto:kovtanec@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-65-71>

УДК 625.031;625.033

## ВИБІР МОДЕЛІ ЗЧЕПЛЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЛОКОМОТИВІВ

Ковтанець М.В., Цигановський І.О., Сергієнко О.В., Ноженко В.С., Ковтанець Т.М.

### CHOICE OF A COUPLING MODEL FOR SIMULATING THE DYNAMIC BEHAVIOR OF LOCOMOTIVES

Kovtanets M.V., Tsyganovskiy I.O., Sergienko O.V. Nozhenko V.S., Kovtanets T.M.

У статті проведено огляд основних моделей, що застосовуються у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки рейкових екіпажів. Детально розглянуто, що обчислення дотичних сил у контакті «колесо-рейка» при моделюванні динаміки рейкових екіпажів може здійснюватися трьома способами: «швидкі» алгоритми, апроксимація аналітичних рішень, чисельних експериментів чи експериментальних даних, використання розрахованих наперед довідкових таблиць. Авторами було розроблено програму VDEUNU CONTACT, оскільки обчислення у даній програмі є досить трудомісткими, програма використовується для упорядкування довідкових таблиць. Проведено дослідження методів розв'язання тангенціальної задачі у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки рейкових екіпажів та побудована інформаційна таблиця. Побудовані криві зчеплення, розраховані за допомогою різних методик для одних і тих самих умов контактування. Значення критичного ковзання, отриманого з допомогою програм FASTSIM, дорівнює приблизно 0.03%, тоді як експериментально отримане значення становить близько 2,5%. Після зриву в буксування коефіцієнт зчеплення у всіх теоріях, крім Мінова і VDEUNU CONTACT вважається константою, тоді як у реальних умовах спостерігається падіння коефіцієнта зчеплення. Проаналізовано можливість застосування різних моделей зчеплення для моделювання динаміки руху складу в режимах вибігу та тяги, порівняння моделей проводилося для нових профілів колеса та рейки при нульовому бічному віднесенні колісної пари. Отримані під час використання довідкових таблиць результати, сформовані за допомогою програми VDEUNU CONTACT, порівнювалися з результатами, отриманими під час використання алгоритму FASTSIM, свідчать про те, що незважаючи на незначні кількісні відмінності, можна говорити, що якісно отримані результати збігаються. Також у роботі розглядався рух локомотива в режимі тяги на прямій ділянці шляху довжиною 1200 м з різним фрикційним станом рейок (сухі і вологі). По результатам моделювання видно, що за відсутності обурень з боку траєкторії руху колісної пари при моделюванні за допомогою алгоритму FASTSIM практично збігаються за різних фрикційних умов, і спостерігається стійкий рух ло-

комотива. У той же час при моделюванні за допомогою програми VDEUNU CONTACT рух є нестійким і характер взаємодії колісної пари зі шляхом суттєво відрізняється при сухих та вологих рейках.

**Ключові слова:** залізничний транспорт, контакт «колесо-рейка», коефіцієнт зчеплення, ковзання, тяга, динаміка.

**Актуальність дослідження.** У переважній більшості робіт, присвячених дослідженню контакту «колесо-рейка» коефіцієнт тертя ковзання вважається константою і змінюється у широкому діапазоні. Таким чином, результати моделювання безпосередньо залежать від обраного дослідником значення. Проте згідно з сучасними дослідженнями в області трибології коефіцієнт тертя залежить від багатьох факторів фрикційної взаємодії. Найбільш значимими з них є вертикальне навантаження і температура в області контакту. На даний момент у трибології немає адекватної теоретичної моделі, що описує залежність коефіцієнта тертя від наведених вище факторів.

#### Теоретичний аналіз дослідження.

Важливим елементом комп'ютерного моделювання динамічних характеристик залізничних транспортних засобів є модель взаємодія у системі «колесо-рейка». Розроблено велику кількість моделей зчеплення, огляд яких можна знайти у роботі [1].

**Мета статті.** Стаття присвячена огляду основних моделей, що застосовуються у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки рейкових екіпажів (PE).

#### Основна частина.

Насправді обчислення дотичних сил у контакті «колесо-рейка» при моделюванні динаміки рейкових екіпажів може здійснюватися трьома способами (рис.1).



Рис. 1. Способи обчислення тангенціальних сил у контактї «колесо-рейка»

*«Швидкі» алгоритми.* В цьому випадку тангенціальні сили у контактї «колесо - рейка» обчислюються на кожному етапі інтегрування для всіх контактів. Це має сенс при використанні алгоритмів, що мають високу обчислювальну швидкість. Такі алгоритми отримали назву «швидких» [2, 4, 5, 6, 7 та ін.].

Найбільшого поширення набув чисельний алгоритм та комп'ютерна програма FASTSIM, розроблені Калкером (J. J. Kalker) [2] на основі спрощеної теорії [3]. В даний час FASTSIM є фактичним стандартом моделі фрикційної взаємодії тіла, що котиться (колеса) з основою (рейкою). Враховуючи велику популярність, сама спрощена теорія та програма FASTSIM зазнавали численних модифікацій з метою: прискорення роботи [4]; уточнення закону тертя [5]; забезпечення можливості дослідження нееліптичного контакту [6].

О.Полах (O.Polach) розробив інше рішення задачі визначення сили зчеплення [7] та його програмну реалізацію ADH. На прикладі моделювання руху чотиривісного локомотива в програмному комплексі ADAMS/Rail, автор [7] провів порівняння результатів, отриманих під час використання підпрограми ADH з результатами, отриманими з використанням алгоритму FASTSIM. Показано, що ADH значно перевищує FASTSIM за швидкодією, що не дивно, оскільки ADH реалізує аналітичне рішення, а FASTSIM – чисельне.

Моделі [2, 4, 5, 6, 7] дозволяють моделювати тільки висхідну гілку характеристики зчеплення, що обмежує сферу її застосування. Зокрема, не можна моделювати рух рухомого складу в режимі тяги чи гальмування.

*Апроксимація аналітичних рішень, чисельних експериментів чи експериментальних даних.* Деякими авторами [8, 10, 11, 12] були побудовані апроксимуючі вирази для розрахунку сили зчеплення. Значення сил зчеплення у даних розрахунках може залежати від кількох змінних, головними з яких є ковзання, лінійна швидкість руху та вертикальне навантаження.

У 1926 р. Картер розглянув плоску задачу ковчання нескінченного циліндра по товстій пластині. В основі його теорії лежить припущення про те, що поздовжні та поперечні тангенціальні сили пропорційні відносним швидкостям ковчання. В результаті Картер отримав вираз для коефіцієнта зчеплення в залежності від значення ковчання, пружних власти-

востей матеріалу, коефіцієнта тертя та максимального контактного тиску. Так званий метод Мюллера [8] є апроксимацією аналітичного рішення Картера.

На основі експериментальної залежності між ковзанням та силою зчеплення колісних пар, отриманої в експлуатаційних умовах [9], Міновим [10] побудовано її аналітичну апроксимацію. Характеристика зчеплення ділилася на три ділянки [8]: пружного пропорційного ковчання ( $0 \leq \varepsilon \leq 0.0014$ ), пружного ковчання  $0.0014 < \varepsilon < 0.025$  і ділянка буксування або юза ( $\varepsilon > 0.025$ ) (термінологія по [8]). Для кожної ділянки знайдено свою апроксимуючу залежність.

Для надання можливості моделювання тяги О. Полах у роботі [11] запропонував поєднати модель [7] з моделлю, яка описує залежність коефіцієнта тертя ковчання від швидкості ковчання. На думку О. Полаха, комбінація залежності коефіцієнта тертя ковчання від швидкості ковчання між колесом і рейкою і зменшення коефіцієнтів Калкера  $C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{23}$ , що використовуються в моделі [7], дозволяє побудувати всю характеристику зчеплення як залежність коефіцієнта зчеплення від відносного ковчання, вираженого у відсотках. При цьому забезпечується задовільний збіг з експериментально отриманими залежностями.

У роботі [12] проведено чисельний експеримент, за результатами якого отримано вираз для сили зчеплення, яка залежить від фрикційного стану поверхонь, ковчання, вертикального навантаження, швидкості руху, поперечного зміщення колеса щодо рейки та кута набігання колісної пари.

Перевагами таких моделей є простота та швидкість обчислень. До недоліків можна віднести той факт, що вони не дають можливості отримати розподіл параметрів (нормальних та дотичних напруг, роботи сили тертя тощо) по плямі контакту. Тому область застосування моделей обмежена дослідженнями динамічної поведінки рухомого складу без можливості дослідження міцності, формозміни (зносу) коліс і рейок. Крім того, при даному підході розрахунок тангенціальних зусиль можливий тільки при одноточковому контактї колеса з рейкою, у разі двоточкового контакту слід припускати, що в зоні контакту на гребені відбувається чисте ковчання.

*Використання розрахованих наперед довідкових таблиць.* Враховуючи циклічний характер руху колісної пари, можна розрахувати із заданою дис-

кретністю тангенціальні сили в контактi «колесо – рейка» один раз перед початком моделювання та зберегти довідкові таблиці. Далі під час розрахунку динаміки дані вилучаються з таблиць та за необхідності проводиться їх інтерполяція. Таким чином, швидкість рішення залежатиме лише від розміру таблиць. Вхідними параметрами для складання довідкових таблиць, як правило, є положення колісної пари в колії, вертикальне навантаження на колесо, лінійна та кутова швидкість руху.

У роботі [13] Калкер запропонував використання при складанні довідкових таблиць програму CONTACT, засновану на точній теорії (exact theory) [14] вирішення тривимірної задачі кочення із ковзанням для еліптичного контакту та різних варіантів подання закону тертя. Табличні дані обробляються за допомогою програми USETAB, яка працює у 8 разів швидше за алгоритм FASTSIM і дає більш точні результати. Вона складається з власне довідкової таблиці з 115 000 записів, і підпрограм для зчитування та інтерполяції даних з таблиці.

Авторами [15] розроблено напівемпіричну модель контакту колеса з рейкою. Вона побудована без «традиційного» поділу контактної задачі на нормальну та тангенціальну. Це дозволяє врахувати взаємний вплив нормальних та тангенціальних напруг, що важливо у разі контакту поверхонь колеса та рейки, які мають узгоджену форму (наприклад, контакт у зоні реборди або контакт зношених профілів). Ще однією особливістю моделі зчеплення [15] є використання емпіричних залежностей коефіцієнта тертя при коченні з прослизанням від температури в контактi за різних фрикційних умов. Приклад таких залежностей можна знайти у роботі [16]. Цей підхід дозволяє моделювати контактну взаємодію при різних фрикційних станах колеса та рейки та великих значеннях їх відносного прослизання.

На основі моделі [15] авторами було розроблено програму VDEUNU CONTACT (скор. від Volodymir Dahl East Ukrainian National University Contact Model) [17, 18, 19]. Оскільки обчислення у програмі є досить трудомісткими, програма VDEUNU CONTACT використовується для упорядкування довідкових таблиць.

Вхідними параметрами програми VDEUNU CONTACT є:

- геометричні характеристики рейкової колії та колісної пари;
- їхня взаємна орієнтація;
- вертикальне та бічне навантаження на вісь;
- параметри руху колісної пари;
- фрикційний стан.

Програма VDEUNU CONTACT обчислює:

- кут бічної хитаючи;
- точки початкового дотику;
- форму плями контакту;
- радіуси кіл кочення;
- кути нахилу;

- розподіл за плямою контакту нормальних та тангенціальних напруг, температури та роботи сили тертя;
- проекції сили зчеплення.

В таблиці 1 наведено методи розв'язання тангенціальної задачі у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки РЕ.

Таблиця 1

**Методи вирішення тангенціальної задачі у сучасних програмних комплексах моделювання динаміки РЕ**

Програма	Країна розробника	Метод вирішення тангенціальної задачі
ADAMS/RAIL	Великобританія	Програми FASTSIM, ADH
CONPOL	Італія	Програма FASTSIM
CONTACT PC92	Китай	Модифікація програми CONTACT
DYNARAIL	США	Програма USETAB
GENSYS	Швеція	Програма FASTSIM
LaGer	Словачія	Програма CONTACT
OCREC	Франція	Модифікація програми FASTSIM
NUCARS	США	Довідкові таблиці розраховані за допомогою програми DUVOROL
SIMPACK	Німеччина	Програми FASTSIM, ADH
TDS CONTACT	Італія	Програма FASTSIM
VAMPIRE	США	Нелінійний, що базується на заздалегідь розрахованих довідкових таблицях Калкера
VOCOLIN	Франція	Модифікація програми FASTSIM Калкера
Універсальний механізм	Росія	Модифікація програми FASTSIM Калкера, моделі Мюллера, Мінова

Проаналізуємо можливість застосування різних моделей зчеплення для моделювання динаміки рухомого складу в режимах вибігу та тяги.

Порівняння моделей проводилося для нових профілів колеса (ДМет1) та рейки (Р65) при нульовому бічному віднесенні колісної пари. Коефіцієнт тертя в моделях прийнятий рівним 0.38. Швидкість руху дорівнює 20 м/с, вертикальне навантаження на колесо – 50 кН.

На рис. 2 наведені криві зчеплення, розраховані за допомогою різних методик для одних і тих самих умов контактування.

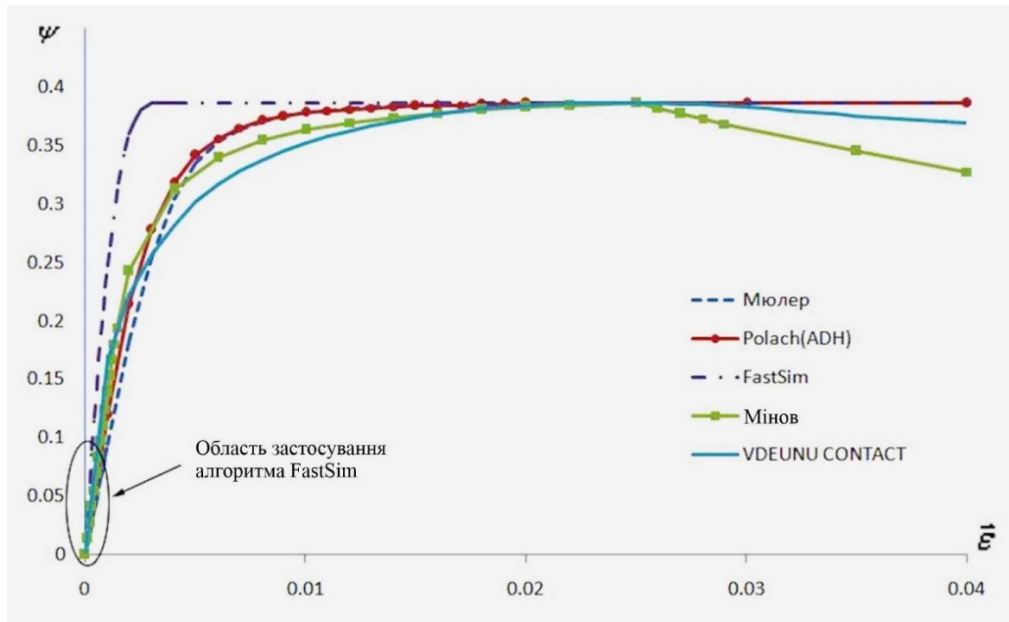


Рис. 2. Криві зчеплення для різних моделей контакту «колесо-рейка»

Значення критичного ковзання, отриманого з допомогою програм FASTSIM, дорівнює приблизно 0.03%, тоді як експериментально отримане значення становить близько 2.5 %. Після зриву в буксування коефіцієнт зчеплення у всіх теоріях, крім Мінова і VDEUNU CONTACT вважається константою, тоді як у реальних умовах спостерігається падіння коефіцієнта зчеплення. З іншого боку, у роботі [20] показано, що з погіршенням фрикційних умов значення критичного ковзання збільшується, тоді як в теоріях Калкера, навпаки, зменшується. Також на рис. 2 позначено область коректності застосування алгоритму FastSim, порівняно з кривими зчеплення, заснованими на експериментальних даних.

Для оцінки впливу вибору моделі зчеплення на динамічну поведінку вагонів у режимі вибігу програма VDEUNU CONTACT була інтегрована як підмодель зчеплення до програмного комплексу «Універсальний механізм 7.0». Дослідження проводилося для умов манчестерських тестів динаміки [21], визнаних «еталонними» для верифікації програмних пакетів, що моделюють динаміку РЕ. У тестах розглядаються рухи двох моделей транспортного засобу (ТЗ) - пасажирський вагон з двома візками (ТМ1) та двовісний вантажний вагон (ТЗ2) – за чотирма моделями колії. Більш детальний опис тесту можна знайти у роботі [21].

Результати, отримані під час використання довідкових таблиць, сформованих з допомогою програми VDEUNU CONTACT, порівнювалися з результатами, отриманими під час використання алгоритму FASTSIM. На рис. 3 лінією без маркера позначені результати, отримані за допомогою FASTSIM, а лінією з маркером – за допомогою VDEUNU CONTACT. Незважаючи на незначні кількісні відмінності, можна говорити, що якісно отримані результати збігаються.

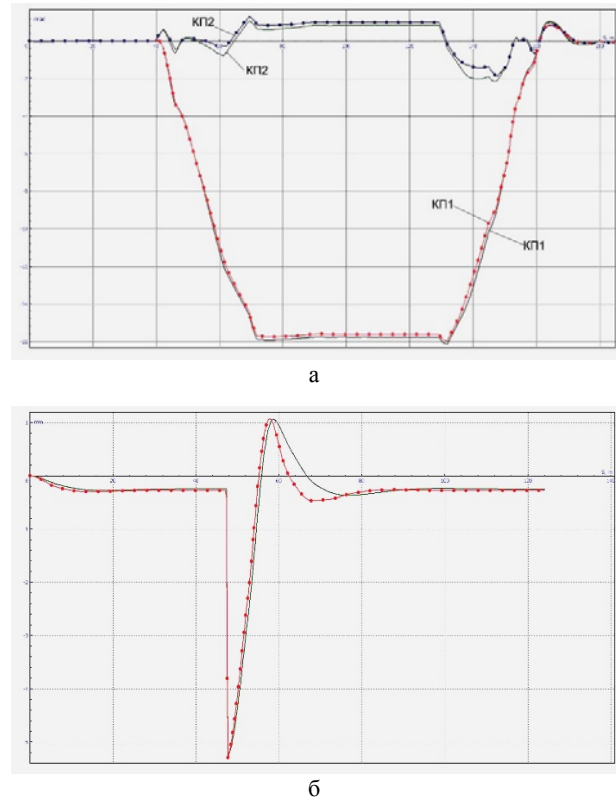


Рис. 3. Результати Манчестерського тесту динаміки:  
а – бічне віднесення першої та другої колісної пари (TC1, модель шляху 1);  
б – поперечний зсув кузова (TC2, модель шляху 2)

Для оцінки впливу вибору моделі зчеплення на динамічну поведінку локомотива в режимі тяги програма VDEUNU CONTACT та алгоритм FASTSIM були інтегровані як підмодель зчеплення у модель руху шестивісного локомотива TE – 116 [22], розроблену на кафедрі залізничного транспорту ЧНУ ім. В. Даля.

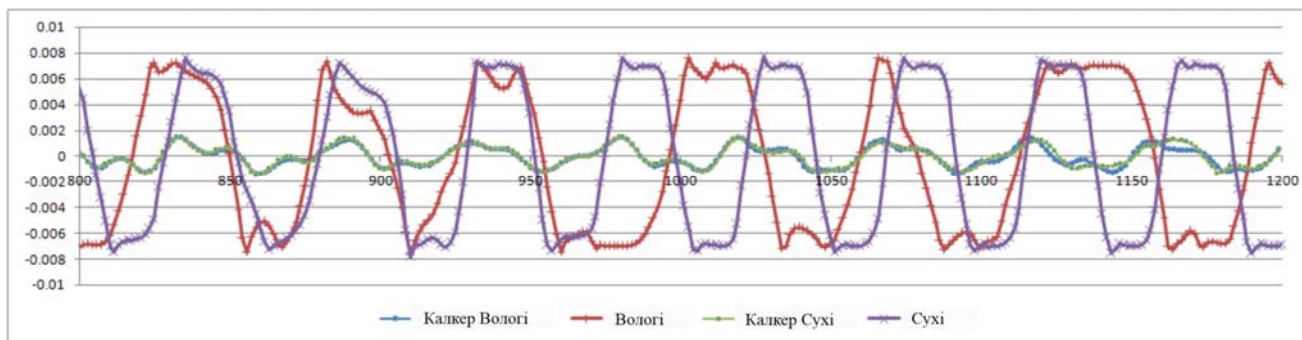


Рис. 4. Траєкторія руху першої колісної пари для різних фрикційних умов

Розглядався рух локомотива в режимі тяги на прямій ділянці шляху довжиною 1200 м з різним фрикційним станом рейок (сухі і вологі). Швидкість руху дорівнює 30 м/с, зазор у колії становить  $\pm 7$  мм, рейка вважається гладкою (вертикальні та горизонтальні нерівності відсутні).

Результати моделювання наведено на рис. 4. Як видно з рисунка, за відсутності обурень з боку траєкторії руху колісної пари при моделюванні за допомогою алгоритму FASTSIM практично збігаються за різних фрикційних умов, і спостерігається стійкий рух локомотива. У той же час при моделюванні за допомогою програми VDEUNU CONTACT рух є нестійким і характер взаємодії колісної пари зі шляхом суттєво відрізняється при сухих та вологих рейках.

### Висновки.

Аналіз отриманих результатів показав, що:

1. При моделюванні динаміки вагонів, а також локомотивів у режимі вибігу вибір моделі зчеплення практично не впливає на динамічну поведінку транспортного засобу.

2. Використання поширеного алгоритму FASTSIM під час моделювання руху локомотива в режимі тяги (гальмування) є некоректним.

3. В алгоритмі FASTSIM з погіршенням фрикційних умов значення критичного ковзання зменшується, тоді як згідно з експериментальними даними воно має збільшуватися.

### Література

1. Костюкевич А.И. Обзор моделей фрикционного взаимодействия колес с рельсами [электронный ресурс] / А.И. Костюкевич, И.А. Цыгановский // Наукові вісті Даліського університету: зб. наук. праць. – Луганськ, 2012. – № 8. – Режим доступу до журн. [http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012\\_8/z12kaiksr.htm](http://archive.nbu.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012_8/z12kaiksr.htm)
2. Kalker J.J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact (FASTSIM program) / J.J. Kalker // Vehicle Systems Dynamics, 1982. – Vol. 11. – P. 1-13.
3. Kalker J.J. Simplified Theory of Rolling Contact / Kalker J.J. // Delft Progress Report. University of Technology. The Netherlands. – Vol. 1. 1973. – P. 1-10.
4. Погорелов Д.Ю. Модификация алгоритма FastSim решения задачи контакта колеса и рельса / Д.Ю. Погорелов, В.Н. Языков // Брянск, Вестник БГТУ, №2 (2). 2004. – С. 103-109.
5. Piotrowski J. Kalker's algorithm FastSim solves tangential contact problems with slip-dependent friction and friction anisotropy / J. Piotrowski // Vehicle System Dynamics, 48:7. 2010. – P. 869-889.
6. Piotrowski J. A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations / J. Piotrowski, W. Kik // Vehicle System Dynamics, 46: 1-2, 2008. – P. 27-48.
7. Polach O. A fast wheel-rail forces calculation computer code / O. Polach // Vehicle Syst. Dyn. Suppl. 33. 1999. – P. 728-739.
8. Моделирование динамики ж/д экипажей. Руководство пользователя ПО Универсальный механизм [электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/08\\_um\\_loco.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/08_um_loco.pdf)
9. Меншутин Н.Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях / Н.Н. Меншутин // Тр. ВНИИЖТ, 1960, вып. 188. – С. 113-132.
10. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей / Д.К. Минов // М.: Транспорт, 1965. – 268 с.
11. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail / O. Polach // Vehicle Dynamics Supplement, 35. 2001. – P. 7-22.
12. Кашура А.Л. Оценка тягово-сцепных качеств локомотивов на стадии проектирования и модернизации с учетом динамических особенностей их движения по рельсовому пути: дисс. ... канд. техн. наук :05.22.07 / Кашура А.Л. – Луганск, 1995. – 207 с
13. Kalker J.J. Three Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact / J.J. Kalker //Dordrecht. London.: Kluwer Academic Publishers, 1990. – 314 p.
14. Kalker J.J. The Principle of Virtual Work and Its Dual for Contact Problems / J.J. Kalker //Ingenieur-Archiv 56, 1986. – P. 453-467.
15. Голубенко А.Л. Модель фрикционного контакта «колесо-рельс» / А.Л. Голубенко, А.И. Костюкевич, И.А. Цыгановский // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2012. – № 5 (176). – С. 7-12.
16. Костюкевич А.И. Экспериментальное исследование характеристик сцепления в контакте «колесо-рельс» при наличии промежуточной среды / А.И. Костюкевич, И.А. Таран, М.В. Ковтанец, В.С. Ноженко // «Автомобіле та тракторобудування». Вісник НТУ «ХП», 56, 2011. – С. 56-62.
17. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49477 від 03.06.2013 (заявка № 49798 від 01.04.2013) «Комп'ютерна програма VDEUNU CONTACT» / Го-

- лубенко О.Л., Горбунов М.І., Костюкевич О.І., Цигановський І.О., Ноженко О.С., Просвірова О.В.
18. Горбунов Н.И. Энергетическое воздействие двухфазного потока на зону контакта движущего колеса с рельсом – метод управления сцепными характеристиками локомотива: Монография. / Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, Т.Н. Ковтанец – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2019. – 181 с.
  19. Горбунов М.І. Обґрунтування концепції вдосконалення об'єктів залізничної техніки на підставі теорії прийняття рішень: Монографія. / М.І. Горбунов, М.В. Ковтанець, О.В. Сергієнко, Т.М. Ковтанець – Одеса: КУПРИЄНКО СВ, 2020. – 98 с.
  20. Костюкевич А.И. Численная и экспериментальная идентификация процесса сцепления колес локомотива с рельсами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Костюкевич А.И. – Луганск, 1991. – 230 с.
  21. Iwnicki S. Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation / S. Iwnicki // Vehicle System Dynamics, 30:3-4, 1998. – P. 295-313.
  22. Горбунов Н.И. Прогнозирование тяговых и динамических качеств локомотивов методом имитационного моделирования [Текст]: монография / Н.И. Горбунов, А.Л. Голубенко, А.И. Костюкевич, А.Л. Кашура; Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля. – Луганск, 2002. – 103 с.

### References

1. Kostyukevich A.I. Obzor modelej frikcionnogo vzaimodejstviya koles s relsami [elektronnyj resurs] / A.I. Kostyukevich, I.A. Cyganovskij // Naukovi visti Dalivskogo universitetu: zb. nauk. prac. – Lugansk, 2012. – № 8. – Rezhim dostupu do zhurn. [http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012\\_8/z12kaiksr.htm](http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/Nvdu/2012_8/z12kaiksr.htm)
2. Kalker J.J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact (FASTSIM program) / J.J. Kalker // Vehicle Systems Dynamics, 1982. – Vol. 11. – P. 1-13.
3. Kalker J.J. Simplified Theory of Rolling Contact / Kalker J.J. // Delft Progress Report. University of Technology. The Netherlands. – Vol. 1. 1973. – P. 1-10.
4. Pogorelov D.Yu. Modifikaciya algoritma FastSim resheniya zadachi kontakta kolesa i relsa / D.Yu. Pogorelov, V.N. Yazykov // Bryansk, Vestnik BGTU, №2 (2). 2004. – S. 103-109.
5. Piotrowski J. Kalker's algorithm Fastsim solves tangential contact problems with slip-dependent friction and friction anisotropy / J. Piotrowski // Vehicle System Dynamics, 48:7. 2010. – P. 869-889.
6. Piotrowski J. A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations / J. Piotrowski, W. Kik // Vehicle System Dynamics, 46: 1-2, 2008. – P. 27-48.
7. Polach O. A fast wheel–rail forces calculation computer code / O. Polach // Vehicle Syst. Dyn. Suppl. 33. 1999. – P. 728-739.
8. Modelirovanie dinamiki zh/d ekipazhej. Rukovodstvo polzovatelya PO Universalnyj mehanizm [elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: URL: [http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/08\\_um\\_loco.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/70/rus/08_um_loco.pdf)
9. Menshutina N.N. Issledovanie skolzheniya kolesnoj pary elektrovoza pri realizacii sily tyagi v ekspluatacionnyh usloviyah / N.N. Menshutina // Tr. VNIIZhT, 1960, vyp. 188. – S. 113-132.
10. Minov D.K. Povyshenie tyagovyh svojstv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoj peredachej / D.K. Minov // M.: Transport, 1965. – 268 s.
11. Polach O. Influence of locomotive tractive effort on the forces between wheel and rail / O. Polach // Vehicle System Dynamics Supplement, 35. 2001. – P. 7-22.
12. Kashura A.L. Ocenka tyagovo-scepnnyh kachestv lokomotivov na stadii proektirovaniya i modernizacii s uchetom dinamicheskikh osobennostej ih dvizheniya po re-lsovomu puti: diss. ... kand. tehn. nauk :05.22.07 / Ka-shura A.L. – Lugansk, 1995. – 207 s
13. Kalker J.J. Three Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact / J.J. Kalker //Dordrecht. London.: Kluwer Academic Publishers, 1990. – 314 p.
14. Kalker J.J. The Principle of Virtual Work and Its Dual for Contact Problems / J.J. Kalker //Ingenieur-Archiv 56, 1986. – R. 453-467.
15. Golubenko A.L. Model frikcionnogo kontakta «kole-sorels» / A.L. Golubenko, A.I. Kostyukevich, I.A. Cyganovskij // Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu im. V. Dalya. – 2012. – № 5 (176). – S. 7-12.
16. Kostyukevich A.I. Eksperimentalnoe issledovanie harakteristik scepneniya v kontakte «koleso-rels» pri nalichii promezhutochnoj sredy / A.I. Kostyukevich, I.A. Taran, M.V. Kovtanec, V.S. Nozhenko // «Avtomobile ta traktorobuduvannya». Visnik NTU «HPI», 56, 2011. – S. 56-62.
17. Svidoctvo pro reyestraciju avtorskogo prava na tvir № 49477 vid 03.06.2013 (zayavka № 49798 vid 01.04.2013) «Komp'yuterna programa VDEUNU CONTACT» / Golubenko O.L., Gorbunov M.I., Kostyukevich O.I., Ciganovskij I.O., Nozhenko O.S., Prosvirova O.V.
18. Gorbunov N.I. Energeticheskoe vozdejstvie dvuhfaznogo potoka na zonu kontakta dvizhushego kolesa s relsom – metod upravleniya scepnyimi harakteristikami lokomotiva: Monografiya. / N.I. Gorbunov, M.V. Kov-tanec, T.N. Kovtanec – Odessa: KUPRIENKO SV, 2019. – 181 s.
19. Gorbunov M.I. Obgruntuvannya koncepciji vdoskonalennya ob'ektiv zaliznichnoyi tehniki na pidstavi teorii priinyattya rishen: Monografiya. / M.I. Gorbunov, M.V. Kovtanec, O.V. Sergiyenko, T.M. Kovtanec – Odessa: KUPRIYENKO SV, 2020. – 98 s.
20. Kostyukevich A.I. Chislennaya i eksperimentalnaya identifikaciya processa scepneniya koles lokomotiva s relsami: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.22.07 / Kostyukevich A.I. – Lugansk, 1991. – 230 s.
21. Iwnicki S. Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation / S. Iwnicki // Vehicle System Dynamics, 30:3-4, 1998. – P. 295-313.
22. Gorbunov N.I. Prognozirovanie tyagovyh i dinamicheskikh kachestv lokomotivov metodom imitacionnogo modelirovaniya [Tekst]: monografiya / N.I. Gorbunov, A.L. Golubenko, A.I. Kostyukevich, A.L. Kashura; Vostochnoukr. nac. un-t im. V. Dalya. – Lugansk, 2002. – 103 s.

### **Kovtanets M. V., Tsyganovskiy I.O., Sergienko O.V. Nozhenko V.S., Kovtanets T.M. Choice of a coupling model for simulating the dynamic behavior of locomotives**

*The article reviews the main models used in modern software complexes for modeling the dynamics of railcars. It is considered in detail that the calculation of tangential forces in the "wheel-rail" contact when simulating the dynamics of rail crews can be carried out in three ways: "fast" algorithms, approximation of analytical solutions, numerical experiments or experimental data, use of pre-calculated reference tables. The VDEUNU CONTACT program was developed by the*

authors, since the calculations in this program are quite time-consuming, the program is used to organize reference tables. Methods of solving the tangential problem in modern software complexes for modeling the dynamics of rail crews were studied and an information table was constructed. Coupling curves calculated using different techniques for the same contact conditions are constructed. The value of critical slip obtained with the help of FASTSIM programs is approximately 0.03%, while the experimentally obtained value is about 2.5%. After stalling in skidding, the coefficient of adhesion in all theories, except Minov and VDEUNU CONTACT, is considered constant, while in real conditions, a drop in the coefficient of adhesion is observed. The possibility of using different clutch models to simulate the dynamics of the rolling stock in coasting and traction modes was analyzed, the comparison of models was carried out for new wheel and rail profiles with zero lateral displacement of the wheel pair. The results obtained when using the reference tables, generated using the VDEUNU CONTACT program, were compared with the results obtained when using the FASTSIM algorithm, indicating that, despite minor quantitative differences, it can be said that the qualitatively obtained results coincide.

The work also considered the movement of the locomotive in the traction mode on a straight section of the track 1200 m long with different frictional conditions of the rails (dry and wet). According to the simulation results, it can be seen that in the absence of disturbances from the side of the trajectory of the wheel pair, when simulating with the help of the FASTSIM algorithm, they practically coincide under different friction conditions, and a steady movement of the locomotive is observed. At the same time, when modeling

using the VDEUNU CONTACT program, the movement is unstable and the nature of the interaction of the wheel pair with the road is significantly different for dry and wet rails.

**Keywords:** railway transport, «wheel-rail» contact, coupling coefficient, sliding, traction, dynamics.

**Ковтанець Максим Володимирович** – доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; [kovtanetsm@gmail.com](mailto:kovtanetsm@gmail.com)

**Цигановський Ілля Олександрович** – молодший науковий співробітник кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; [vaduha2011@gmail.com](mailto:vaduha2011@gmail.com)

**Сергієнко Оксана Вікторівна** – доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; [sergienko.o.v@gmail.com](mailto:sergienko.o.v@gmail.com)

**Ноженко Володимир Сергійович** – проректор з навчальної роботи Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського; [vladymyrnozhenko@gmail.com](mailto:vladymyrnozhenko@gmail.com)

**Ковтанець Тетяна Миколаївна** – молодший науковий співробітник кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; [kovtanect@gmail.com](mailto:kovtanect@gmail.com)

Стаття подана 20.10.2022 .

**ВІСНИК  
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ  
№ 5 (275) 2022**

**Науковий журнал**

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

**Статті надруковано в авторській редакції**

Підписано до друку 10.12.2022 р.  
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.  
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 8,7. Обл.-вид. арк. 10,2.  
Наклад 50 прим. Вид. № 3358. Замов № \_\_. Ціна вільна.

Видавництво  
Східноукраїнського національного університету  
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

**Адреса університета:** вул. Іоанна Павла II, 17,  
м. Київ, 01042, Україна  
**E-mail:** [vidavnictvoSNU.ua@gmail.com](mailto:vidavnictvoSNU.ua@gmail.com)

Надруковано: