

**МАТЕРІАЛИ
Всеукраїнської
науково-методичної конференції**

**ПРОБЛЕМИ
МАТЕМАТИЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ**

Кам'янське
27-28 травня 2025 р.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський державний технічний університет
Інститут чорної металургії НАН України

ПРОБЛЕМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції
(27 - 28 травня 2025 року, м. Кам'янське)

Кам'янське

ДДТУ

2025

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова організаційного комітету:

Віталій ГУЛЯЄВ, д.т.н., професор, ректор ДДТУ

Заступники голови організаційного комітету:

Іван КАРІМОВ, к. ф.-м. н., доцент, завідувач кафедри математичного моделювання та системного аналізу ДДТУ

Сергій САМОХВАЛОВ, д.т.н., професор, старший науковий співробітник ІЧМ НАНУ

Учений секретар:

Наталія ВОЛОСОВА к.т.н., доцент, доцент кафедри математичного моделювання та системного аналізу ДДТУ

Члени організаційного комітету:

Анатолій ПАСІЧНИК, д. ф.-м. н., професор, професор кафедри математичного моделювання та системного аналізу ДДТУ

Вікторія СТРОЄВА, к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедри математичного моделювання та системного аналізу ДДТУ

Тетяна НАДРИГАЙЛО, к. т. н., доцент, доцент кафедри математичного моделювання та системного аналізу ДДТУ

Жанна ХУДА, к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедри математичного моделювання та системного аналізу ДДТУ

Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф., 27-28 травня 2025 р. Кам'янське: ДДТУ, 2025. 253 с.

У збірнику надруковано матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції, яка відбулася 27-28 травня 2025 р. у Дніпровському державному технічному університеті.

Для студентів, аспірантів, викладачів, вчених ЗВО та наукових закладів.

Секція 1

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ І МОДЕЛІ

Здоб. освіти Божко В.О., к. техн. н. Мацуга О.М.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІНДЕКСІВ ЯКОСТІ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ КЛАСТЕРІВ

В умовах стрімкого зростання обсягів даних у різних галузях – від медицини до соціальних мереж – задача кластеризації набуває особливої актуальності, оскільки дає змогу виявляти приховані закономірності без використання маркованих даних. Алгоритми кластеризації дозволяють ефективно структурувати інформацію та розв’язувати прикладні задачі, зокрема задачі сегментації даних та виявлення аномалій. Водночас проблемою залишається об’єктивне оцінювання якості кластеризації та вибір оптимальної кількості кластерів, оскільки універсальні еталони відсутні, а типові засоби, такі як бібліотека *scikit-learn* у Python, пропонують обмежений набір внутрішніх метрик і недостатню гнучкість для нестандартних випадків.

З метою розширення можливостей внутрішнього оцінювання якості кластеризації в середовищі Python було розроблено власну бібліотеку *ClusterValid*, яка реалізує 30 внутрішніх індексів [1, 2] для глибшого аналізу результатів кластеризації. Однак постає питання: які з цих індексів найкраще підходять для визначення оптимальної кількості кластерів? Для відповіді на це питання було проведено експериментальне дослідження.

Експерименти були спрямовані на визначення того, які індекси з бібліотеки *ClusterValid* здатні коректно визначити кількість кластерів, закладену під час генерації даних. Було проведено два експерименти, в яких генерувалися набори двовимірних даних з різною кількістю кластерів. Усі

кластери генерувалися з нормальним розподілом навколо центрів, при цьому кожен кластер мав однаковий розкид вздовж кожної осі. У першому експерименті було згенеровано 40 штучних наборів даних – по п'ять наборів з двома, трьома, чотирма та п'ятьма кластерами. У цих наборах кластери були чітко відокремлені в просторі ознак. У другому експерименті також згенерували 40 наборів даних із такою самою кількістю кластерів, однак кластери в них були розташовані ближче один до одного. Подекуди окремі пари кластерів були дуже близькі й водночас чітко відокремлені від інших, що створювало додаткові труднощі для їхнього розділення.

Для кожного набору даних застосовувався алгоритм кластеризації *k-means* із бібліотеки *scikit-learn* з параметром `n_init = 10` (тобто алгоритм запускався 10 разів із різними початковими центрами кластерів). Кластеризація проводилася для кількості кластерів у діапазоні від 2 до 10. Для кожного отриманого розбиття обчислювалися значення всіх індексів з бібліотеки *ClusterValid*, після чого визначалась оптимальна кількість кластерів згідно з критерієм, прийнятим для кожного індексу. Відповідні критерії наведено в таблиці 1.

За результатами обох експериментів було підраховано, скільки разів кожен індекс правильно визначив кількість кластерів, закладену під час генерації. На основі цих підрахунків була сформована підсумкова таблиця 1 з результатами. Слід зауважити, що в таблиці 1 під SF1 мається на увазі *score function* з роботи Saitta et al. (2007), під SF1c – власна модифікація SF1, а під SF2 – *score function* з роботи Saitta et al. (2008).

Результати дослідження показали, що серед 30 індексів, реалізованих у бібліотеці *ClusterValid*, найвищу точність продемонстрували індекси Calinski-Narabasz та PBM, які правильно визначили кількість кластерів у 40 або 39 випадках в обох експериментах. Високу ефективність показали також індекси SF1c, Silhouette, Xie-Beni, SF1 та Davies-Bouldin, хоча їхня надійність знижувалася у випадках з близько розташованими кластерами. Індекси Scott-

Symons2, TrcovW, Frey та Hartigan продемонстрували найнижчу ефективність для визначення оптимальної кількості кластерів у контексті даного дослідження.

Таблиця 1. Кількість влучань в обох експериментах

Індекс	Критерій вибору оптимальної кількості кластерів	Експеримент 1	Експеримент 2
Calinski-Harabasz	Перший максимум	40	39
PBM	Максимум	40	39
SF1c	Максимум	40	19
Silhouette	Максимум	40	18
Xie_Beni	Мінімум	40	14
SF1	Максимум	40	13
Davies_Bouldin	Мінімум	39	13
C-index	Мінімум	37	18
Gamma	Максимум	37	18
Gplus	Мінімум	37	17
SD	Мінімум	33	14
Dunn	Максимум	31	14
CCC	Максимум	30	30
Friedman-Rubin1	Мінімум других різниць логарифмів	30	23
S_Dbw	Мінімум	27	20
Dindex	Максимум других різниць приросту	26	18
McClain-Rao	Максимум других різниць	25	19
Point-biserial	Максимум	24	11
Mariott	Максимум других різниць	17	14
TraceW	Максимум других різниць	16	12
Ratkowsky-Lance	Максимум	15	12
Tau	Максимум	14	13
Ball-Hall	Максимум перших різниць	10	10
Krzanowski-Lai	Максимум	10	10
SF2	Максимум	10	10
Friedman-Rubin2	Максимум перших різниць	9	9
Scott-Symons2	Максимум перших різниць	4	8
TrCovW	Максимум перших різниць	3	7
Frey	Останній поділ, де значення < 1.0	3	3
Hartigan	Максимум перших різниць	0	0

Подальші дослідження будуть спрямовані на організацію ширшого експерименту з метою виявлення найефективнішого внутрішнього індексу якості кластеризації для визначення оптимальної кількості кластерів.

Список використаних джерел

1. Charrad M., Ghazzali N., Boiteau V., Niknafs A. NbClust: An R package for determining the relevant number of clusters in a data set. *Journal of Statistical Software*. 2014. Vol. 61, no. 6. P. 1–36. DOI: 10.18637/jss.v061.i06.
2. Todeschini R., Ballabio D., Termopoli V., Consonni V. Extended multivariate comparison of 68 cluster validity indices. A review. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2024. Vol. 251. 105117. DOI: 10.1016/j.chemolab.2024.105117.

Здоб. освіти Гавриленко М.О., к. техн. н. Мацуга О.М.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ-ОБГОРТОК ДЛЯ ВІДБОРУ ОЗНАК У ЗАДАЧІ ПРОГНОЗУВАННЯ ОФТАЛЬМОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Реальні медичні дані часто характеризуються великою кількістю ознак, що становить значний виклик для побудови ефективних моделей машинного навчання. Висока розмірність даних може призводити до перенавчання моделі, зростання обчислювальної складності та зниження інтерпретованості моделі. Тому відбір найбільш інформативних ознак є критично важливим етапом, адже дозволяє зменшити розмірність даних, підвищити якість і продуктивність моделей машинного навчання, а також виділити ключові фактори, що впливають на результат прогнозування.

Одним з ефективних підходів до відбору ознак є використання методів-обгортки (wrapper methods), які враховують вплив підмножини ознак на якість побудованої моделі [1, 2]. У даній роботі проведено порівняльний аналіз таких

методів для задачі прогнозування максимально корегованої гостроти зору вдалину за результатами офтальмологічного обстеження.

Метою дослідження є оцінка ефективності різних методів-обгорток щодо зменшення розмірності ознакового простору та збереження (або покращення) якості прогнозування.

У дослідженні використано набір даних офтальмологічного обстеження 400 очей 200 пацієнтів. Ці дані включають вимірювання морфометричних показників органа зору, зокрема рефракції, кривизни та товщини рогівки, параметрів передньої камери ока тощо. Крім того, наявна інформація про вік і стать пацієнтів.

Процес підготовки даних включав такі етапи:

1. Об'єднання даних. Таблиці з результатами офтальмологічного обстеження очей та з демографічними характеристиками пацієнтів були об'єднані за унікальним ідентифікатором (ID).

2. Очищення даних. Ознаки з понад 50% пропущених значень були вилучені з аналізу. Пропущені значення в інших ознаках було замінено на медіанні значення відповідних ознак. Стовпці з ID пацієнта та порядковим номером обстеження видалено як неінформативні. Також з набору незалежних ознак було вилучено ознаки, які отримані в ході того самого обстеження, що і цільова змінна, щоб запобігти інформаційному витоку.

3. Трансформація даних. Категоріальну ознаку «Око» закодовано числом: 0 – ліве око, 1 – праве. Числові ознаки приведено до єдиного масштабу шляхом нормалізації.

4. Формування вибірок. Після випадкового перемішування дані розділено на навчальну і тестову вибірки у пропорції 80:20. Тим самим, отримано навчальну і тестову вибірки з 320 і 80 прикладів відповідно. Кожен приклад містив 130 ознак.

Для відбору ознак при побудові моделі багатовимірної лінійної регресії застосовано 4 методи-обгортки: прямий відбір (forward selection), зворотне вилучення (backward elimination), рекурсивне вилучення ознак (recursive feature elimination, RFE) та покрокову регресію (stepwise regression) [1, 2].

Процедура дослідження полягала в наступному. За допомогою методу прямого відбору, використовуючи тестову вибірку, проводився поетапний відбір від 1 до 80 ознак. На кожному етапі будувалася модель багатовимірної лінійної регресії на знайденому наборі інформативних ознак, після чого обчислювались метрики якості (R^2 та MSE) як на навчальній, так і на тестовій вибірках. Оцінювання здійснювалося із використанням k -кратної перехресної перевірки (k -fold cross-validation). За результатами будувався графік залежності метрик якості від кількості ознак. Оптимальною вважалась така кількість ознак, за якої модель демонструвала високу якість на тестовій вибірці без ознак перенавчання. Аналогічні процедури застосовано до методів зворотного та рекурсивного вилучення ознак. У випадку покрокової регресії оптимальна кількість ознак визначалася автоматично в процесі роботи алгоритму.

Усі розрахунки проводились у Google Colaboratory. Для обробки даних, побудови моделей і відбору ознак використовувалися бібліотеки Python: scikit-learn, pandas і numpy. Для покрокової регресії була реалізована власна функція, де додавання й вилучення ознак здійснювалося на основі аналізу R^2 , отриманого за допомогою крос-валідації.

Результати порівняння ефективності методів-обгортки подано в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати порівняння методів відбору ознак

Метод	Кількість відібраних ознак	Значення R^2 на тестовій вибірці	Час, який займала процедура відбору
Прямий відбір	38	0.4615	4-5 годин
Покрокова регресія	19	0.4479	1 хвилина
Зворотне вилучення	13	0.4327	8-10 годин
RFE	31	0.4151	4 хвилин

Результати показали, що використання методу прямого відбору дозволило отримати модель регресії з найвищим значенням R^2 , але він виділив найбільшу кількість ознак – 38, що вимагало значного часу. Метод покрокової регресії посів друге місце: метод виділив 19 ознак з дуже хорошою якістю ($R^2 = 0.4479$) і виявився найшвидшим. Метод зворотного відбору посів третє місце: він виділив 13 ознак, на яких якість моделі була досить непоганою, однак процес відбору зайняв найбільше часу. Метод RFE, що посів останнє місце, виділив 31 ознаку з низькою якістю моделі, проте був також досить швидким. Отже, метод покрокової регресії продемонстрував оптимальні результати за кількістю відібраних ознак і точністю моделі, а також був найшвидшим за часом.

У роботі проведено експериментальне порівняння методів-обгортки для задачі регресійного прогнозування на медичних даних. Результати дозволили визначити метод, який забезпечує найкращий компроміс між кількістю ознак, якістю прогнозування та обчислювальними витратами.

Список використаних джерел

1. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis. Wiley-Interscience, 1998. 736 p.
2. Kuhn M., Johnson K. Applied Predictive Modeling. Springer, 2013. 613 p.

К. фіз.-мат. н. Гнатів Л.Б., к. фіз.-мат. н. Гнатів Б.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

ПОБУДОВА L-СТІЙКИХ МЕТОДІВ ТИПУ РОЗЕНБРОКА

У багатьох задачах керування, фізичної та хімічної кінетики виникає проблема розв'язання задачі Коші для жорстких систем звичайних диференціальних рівнянь. Врахування великого числа факторів при побудові математичних моделей приводить до розширення класу задач, описуваних жорсткими системами. Основні тенденції при побудові чисельних методів пов'язанні з розв'язанням систем великої розмірності. Для чисельного розв'язання жорстких задач зазвичай застосовуються L-стійкі методи. При

реалізації таких чисельних схем на кожному кроці розв'язується лінійна система алгебраїчних рівнянь із застосуванням LU-факторизації деякої матриці, розмірність якої співпадає із розмірністю вектора розв'язку. Суть явища жорсткості полягає в тому, що розв'язок, який потрібно обчислити, змінюється повільно, однак існують швидкі згасаючі компоненти розв'язку, які перешкоджають знаходженню чисельного розв'язку, який повільно змінюється.

Розглядається задача Коші для автономних систем звичайних диференціальних рівнянь:

$$y' = f(y), \quad y(t_0) = y_0, \quad t_0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

Класичний метод Розенброка задається формулами [1]:

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^s p_i k_i, \quad \left(E - \alpha_i \mathcal{F}'_n \left(y_n + \tau \sum_{j=1}^{i-1} \gamma_{ij} k_j \right) \right) k_i = f \left(y_n + \tau \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ij} k_j \right), \quad (2)$$

де τ - крок інтегрування; E – одинична матриця; $f'_n = \frac{\partial f(y_n)}{\partial y}$ – матриця

Якобі системи (1.1); $\alpha_i, p_i, \gamma_{ij}, \beta_{ij}, 1 \leq i \leq s, 1 \leq j \leq i-1$ - числові коефіцієнти, які визначають властивості точності і стійкості схеми.

Найменш затратні і найбільш ефективні реалізації методів (2) виникають при $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = \alpha$ і $\gamma_{ij} = 0, 1 \leq i \leq s, 1 \leq j \leq i-1$. Відповідні числові схеми мають вигляд

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^s p_i k_i, \quad (E - \alpha \mathcal{F}'_n(y_n)) k_i = f \left(y_n + \tau \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ij} k_j \right) \quad (3)$$

В цьому випадку на кожному кроці потрібне обертання матриці $E - \alpha \mathcal{F}'_n(y_n)$ розмірності N . Замість обертання матриці зазвичай розв'язується лінійна система алгебраїчних рівнянь із застосуванням LU-факторизації матриці $E - \alpha \mathcal{F}'_n(y_n)$.

Розглянемо побудову методів типу Розенброка вищих порядків, де методи m - того порядку можна представити у вигляді

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^m p_i k_i, \quad D_n = E - \alpha \mathcal{f}'_n, \quad D_n k_1 = \mathcal{f}(y_n), \quad (4)$$

$$D_n k_2 = \mathcal{f}(y_n + \beta_{21} k_1) + \alpha_{21} k_1, \dots, D_n k_i = k_{i-1} + \alpha_{i1} k_1, \quad 3 \leq i \leq m.$$

Зазначимо також, що в однокрокових методах для опису обчислювальних затрат на кроці інтегрування достатньо одної константи m – кількості етапів.

Дослідимо стійкість схеми (4) за допомогою лінійного скалярного рівняння при $m = 3$:

$$y' = \lambda y, \quad y(0) = y_0, \quad \operatorname{Re}(\lambda) \leq 0, \quad t \geq 0. \quad (5)$$

Підставимо розклад в ряд Тейлора для k_1 , k_2 і k_3 в першу формулу (4). Припускаючи, що $y_n = y(t_n)$ і порівнюючи розвирення для точного і наближеного y_{n+1} розв'язків до членів з τ^3 включно, отримаємо умови третього порядку точності схеми (4), тобто

- 1) $p_1 + (1 + \alpha_{21})p_2 + (1 + \alpha_{21} + \alpha_{31})p_3 = 1;$
- 2) $\alpha p_1 + (\alpha + \beta_{21} + 2\alpha\alpha_{21})p_2 + (2\alpha + \beta_{21} + 3\alpha\alpha_{21} + 3\alpha\alpha_{31})p_3 = 0,5;$
- 3) $\alpha^2 p_1 + (\alpha^2 + 2\alpha\beta_{21} + 3\alpha^2\alpha_{21})p_2 + (3\alpha^2 + 3\alpha\beta_{21} + 6\alpha^2\alpha_{21} + 3\alpha^2\alpha_{31})p_3 = 1/6;$
- 4) $3\beta_{21}^2(p_2 + p_3) = 1.$

Застосовуючи (4) для розв'язування (5), отримуємо умову L-стійкості

$$\alpha(p_2 + p_3) - \alpha^2 - \beta_{21}^2 p_2 = 0. \quad (7)$$

З рівнянь (6) та (7) знаходимо:

$\alpha=2,405115,$	$\alpha_{21}=1,$	$\alpha_{31}=4,678948,$	$\beta_{21}=1,$
$p_1=2,083894,$	$p_2=-0,099651,$	$p_3=0,432980.$	

Дослідимо схему (4) при $m=4$

$$y_{n+1} = y_n + \sum_{i=1}^m p_i k_i, \quad D_n = E - \alpha \mathcal{f}'_n, \quad D_n k_1 = \mathcal{f}(y_n), \quad D_n k_2 = k_2, \quad (8)$$

$$D_n k_3 = \mathcal{f}(y_n + \beta_{31} k_1 + \beta_{32} k_2) + \alpha_{32} k_2, \quad D_n k_4 = k_3 + \alpha_{42} k_2.$$

Умова L- стійкості, матиме вигляд $24\alpha^4 - 96\alpha^3 + 72\alpha^2 - 16\alpha + 1 = 0$,

Враховуючи умови, накладені на порядок методу та умови L-стійкості (Коефіцієнт α визначається із умови L-стійкості) отримуємо:

$\alpha=0.572817$	$p_1=1,278371,$	$p_2=9,807423,$	$p_3=0,926554,$
$p_4=-0,333961,$	$\alpha_{32}=-2,18548,$	$\alpha_{42}=-295,808,$	$\beta_{31}=1,009005,$
$\beta_{32}=-0,25901.$			

Висновок. В роботі наведений клас L-стійких методів третього та четвертого порядків точності $m = 3$ та 4 , побудованих на основі методів типу Розенброка, які на кожному кроці інтегрування вимагають лише двох звертань до правих частин системи диференціальних рівнянь і задовільняють умови як абсолютної так і жорскої стійкості.

К. ф.-м. н. Давидчик О.М.

Відокремлений структурний підрозділ «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки Державного вищого навчального закладу «Українського державного університету науки і технологій»

ДЕЯКІ СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ ДОДАТНИХ ОПЕРАТОРІВ

Позначимо через z_n множину лінійних додатних операторів виду

$$U_n(f; x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+1)z_n(t)dt,$$

$$z_n(t) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \rho_k^n \cos kt, \quad z_n(t) \geq 0.$$

Припустимо, що $\delta > 0$, $r = 0, 1, 2, \dots$

$$L_r(U_n, \delta) = \sup_{f^{(r)} \in C/R} \frac{\|f - U_n(t)\|}{\omega(f^{(r)}, \delta)}.$$

де $\omega(f^{(r)}, \delta)$ – модуль безперервності функції $f(x)$.

Якщо розглянути оператора Валле-Пуссена з ядром $V_n(t) = \frac{2^{2n-2}}{C_{2n-2}^{n-1}} \cos^{2n-2} \frac{t}{2}$,

$$\text{то } L_{1,n}(V_n, \frac{\gamma}{\sqrt{n}}) = 1 + I(\gamma) + o(\frac{1}{n}), \text{ де } I(\gamma) = \sum_{k=1}^{\infty} F(\frac{k\gamma}{2}) ;$$

$$F(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-t^2} dt .$$

К. техн. н. Дерещ О.Л., д. техн. н. Садовой О.В., магістр. Коваль Ю.Р.

Дніпровський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ СИНТЕЗУ РЕЛЕЙНИХ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ

Математична модель асинхронного електродвигуна (АД) в нерухомих відносно статора осях координат $x = \alpha, y = \beta$ виводиться з моделі узагальненої електричної машини [1] і має вигляд системи диференціальних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{s\alpha} &= U_{s\alpha} - I_{s\alpha}R_s, & p\Psi_{s\beta} &= U_{s\beta} - I_{s\beta}R_s \\ p\Psi_{r\alpha} &= -I_{r\alpha}R_r - \omega\Psi_{r\beta}, & p\Psi_{r\beta} &= -I_{r\beta}R_r + \omega\Psi_{r\alpha} \\ p\omega &= \frac{M - M_c}{J} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де p – оператор диференціювання, ω – кутова швидкість ротора, U_s – вектор напруги статора, I_s, I_r, Ψ_s, Ψ_r – вектори струмів і потокозчеплень статора й ротора, M – електромагнітний момент, R_s, R_r – активні опори обмоток статора й ротора.

Струми статора й ротора виражаються з потокозчеплень за формулами

$$\begin{aligned}
I_{s\alpha} &= \frac{L_r \Psi_{s\alpha} - L_m \Psi_{r\alpha}}{L_s L_r - L_m^2}, & I_{s\beta} &= \frac{L_r \Psi_{s\beta} - L_m \Psi_{r\beta}}{L_s L_r - L_m^2}, \\
I_{r\alpha} &= \frac{L_s \Psi_{r\alpha} - L_m \Psi_{s\alpha}}{L_s L_r - L_m^2}, & I_{r\beta} &= \frac{L_s \Psi_{r\beta} - L_m \Psi_{s\beta}}{L_s L_r - L_m^2},
\end{aligned} \tag{2}$$

де z_p – число пар полюсів машини, m – число фаз, L_m – взаємна індуктивність обмоток ротора й статора, L_s, L_r – індуктивності обмоток статора й ротора.

Формула для розрахунку електромагнітного моменту має вигляд

$$M = \frac{m z_p L_m}{2 L_r} (I_{s\beta} \Psi_{r\alpha} - I_{s\alpha} \Psi_{r\beta}), \tag{3}$$

де z_p – число пар полюсів машини, m – число фаз.

Необхідною умовою електромеханічного перетворення енергії є наявність магнітного потоку в магнітному колі машини. Потік формується складовою вектора струму статора, яка збігається з ним за напрямком, тобто так звану потокоутворюючу складовою вектора \mathbf{I}_s . Отже керування величиною потоку зводиться до регулювання модуля вектора потокозчеплення, обраного в якості базового, шляхом впливу на співвісну йому складову вектора струму статора.

Для реалізації принципу векторного полеорієнтованого керування необхідно зорієнтувати систему координат, у якій представлені рівняння (1)–(3), за базовим вектором потокозчеплення Ψ_o . Позначивши осі такої системи u і v , будемо вважати вісь u співпадаючою за напрямком з Ψ_o , а вісь v – випереджальною до неї. Тоді $|\Psi_o| = \Psi_o = \Psi_{ou}$, а потокоутворюючою складовою струму статора буде I_{su} . Електромагнітний момент асинхронного двигуна M може бути визначений як векторний добуток вектора Ψ_o й вектора \mathbf{I}_s

$$M = K_m [\Psi_o, \mathbf{I}_s], \tag{4}$$

де K_m – коефіцієнт, що залежить від параметрів та вибору базового вектора.

Тому при стабілізації модуля потокозчеплення момент пропорційний тільки перпендикулярній вектору Ψ_o складовій вектора струму статора, яку

називають моментоутворюючою. У системі координат u, v моментоутворююча складова I_s співпадатиме з I_{sv} , а формула (4) набуде вигляду $M = K_m \Psi_o I_{sv}$.

Керування електромагнітним моментом АД здійснюється шляхом цілеспрямованої зміни величини моментоутворюючої складової вектора струму статора при підтриманні незмінним модуля вектора потокозчеплення за допомогою впливу на потокоутворюючу складову I_s . Ідея полеорієнтованого керування АД полягає у незалежному формуванні магнітного потоку та частоти обертання ротора, для його обґрунтування необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь (1) відносно похідних регульованих координат – швидкості ω й модуля орієнтуючого вектора потокозчеплення Ψ_o , а також моментоутворюючої I_{sv} і потокоутворюючої I_{su} складових струму статора.

Розглянемо випадок орієнтації за потоком ротора, коли $\Psi_o = \Psi_r$. Із системи (1) необхідно виключити складові векторів $I_r, \Psi_s, p\Psi_s$. При виконанні умов орієнтації координатної системи x, y за вектором Ψ_r

$$x = u, y = v, \Psi_{rx} = \Psi_{ru} = \Psi_o, p\Psi_{ry} = p\Psi_{rv} = 0, \Psi_{ry} = \Psi_{rv} = 0$$

отримаємо скорочену (зі зниженням порядку на одиницю) математичну модель

АД в системі координат, що обертається зі швидкістю $\omega_k = \frac{R_r L_m}{L_r \Psi_o} I_{sv} + \omega$:

$$\left. \begin{aligned} pI_{su} &= \frac{L_m R_r}{L_r^2 L'_s} \Psi_o - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{L_r^2 L'_s} I_{su} + \frac{1}{L'_s} U_{su} + I_{sv} \omega_k \\ p\Psi_o &= -\frac{R_r}{L_r} \Psi_o + \frac{R_r L_m}{L_r} I_{su} \\ pI_{sv} &= -\frac{L_m}{L_r L'_s} \Psi_o \omega - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{L_r^2 L'_s} I_{sv} + \frac{1}{L'_s} U_{sv} - I_{su} \omega_k \\ p\omega &= \frac{3z_p L_m}{2J L_r} I_{sv} \Psi_o - \frac{M_c}{J} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Перше та друге рівняння в (5) утворюють опис динаміки підсистеми керування полем, а третє та четверте рівняння – підсистеми керування швидкістю. Останні доданки першого й третього рівнянь являють собою сигнали перехресних зв'язків між цими підсистемами. Але релейні системи мають структурну властивість здійснювати придушення зовнішніх сигналів, що діють в точці прикладення керуючих впливів. Отже, розглядаючи внутрішні перехресні зв'язки АД як збурюючі дії, при синтезі систем розривного керування можемо вважати підсистеми рівнянь динаміки магнітного потоку та частоти обертання взаємно незалежними.

Список використаних джерел

1 Садовой О. В. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем : навчальний посібник / О. В. Садовой, О.Л. Дерещь. – Дніпродзержинськ : ДДТУ. – 2014. – 206 с.

К. ф.-м. н. Єлісєєв В.І., к. техн.н. Кисляков В.Г.,

к. техн.н. Руденко О.Л.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

РОЗРАХУНКОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТА РОЗЧИНЕННЯ ПАРОМАГНІЄВИХ БУЛЬБАШОК У РОЗПЛАВІ ЧАВУНУ

Процес десульфурації чавуну магнієм охоплює кілька ланок: утворення паромагнієвих бульбашок, розчинення магнію, хімічна взаємодія магнію з сіркою, евакуація продуктів реакції та інше. Ефективність десульфурації визначається повнотою засвоєння парів магнію з міхура. Для максимально можливого використання магнію тривалість спливання бульбашки має бути достатньою для завершення масообмінних процесів, що протікають у системі газова фаза бульбашки - розплав чавуну.

На основі розробленої раніше [1] моделі дифузійного розчинення паромангнієвої бульбашки створено повнішу математичну модель, яка враховує, що зменшення парів магнію з бульбашки відбувається не тільки за рахунок дифузії магнію, а й за рахунок хімічної взаємодії магнію з сіркою розплаву.

Розроблена модель включає: систему рівнянь, що описує рух великих бульбашок у рідкому малов'язкому середовищі; рівняння дифузійного масопереносу основних компонентів процесу (магнію, сірки та азоту як газу-носія); термодинамічні умови рівноваги на фазовому кордоні бульбашки з урахуванням блокуючої дії сірки як поверхнево-активного компонента; кінетичні рівняння, що описують хімічну реакцію взаємодії розчиненого магнію з сіркою в розплавленому чавуні з урахуванням активностей компонентів.

Для розрахунків застосовано математичний апарат теорії примежового шару, який дає можливість розгляду складних динамічних задач з урахуванням різних фізико-хімічних особливостей процесу. Отримана система складається з рівнянь звичайного типу та рівнянь у частинних похідних, що належать до рівнянь примежового шару. Рівняння переводяться в скінченнорізницеvu систему першого порядку за часом, у результаті чого можуть бути інтегровані. Нестационарні скінченнорізницеvu рівняння примежового шару розв'язуються методом прогонки за відповідних граничних умов, що враховують фізичні особливості процесу.

Під час складання математичної моделі прийнято низку припущень. Основною є умова, що швидкість адсорбції значно вища за швидкості складових ланок процесу (термодинамічна квазірівновага на поверхні мішура). Оцінки швидкості адсорбції простих молекул металами, наведені в [2], дають змогу використовувати цю умову навіть у разі протікання хімічних реакцій. Математичні постановки розчинення газів з урахуванням хімічних реакцій,

наведені в [3], також містять у собі термодинамічні умови рівноваги на фазових поверхнях.

Оскільки товщина дифузійного примежового шару значно менша як за радіус міхура, так і за динамічний примежовий шар, нехтуємо кривизною поверхні бульбашки і розглядаємо дифузійний примежовий шар на пластині. Приймаємо, що міхур має кулясту форму. Випаровування частинок магнію відбувається практично миттєво [4]. Так само прийнято, що процес перемішування газу в бульбашці йде зі швидкістю, що перевищує дифузійний процес у металі. І, нарешті, враховуючи, що парціальний тиск парів сірки значно менший за парціальний тиск парів магнію, десорбцією сірки з поверхні металу нехтуємо.

Отримано систему рівнянь, що визначає дифузійно-кінетичний процес десульфурзації металу магнієм в околі бульбашки, систему рівнянь, що описує масообмін у дифузійному примежовому шарі, а також рівняння, що описують рух бульбашки в розплавленому металі.

За розробленою математичною моделлю руху та дифузійно-кінетичного масообміну паромагнієвої бульбашки з розплавом чавуну з урахуванням хімічної взаємодії магнію з сіркою виконано розрахунки значень таких параметрів: тривалість перебування бульбашки в розплаві; час відходу парів магнію з бульбашки; глибина ванни розплаву, на якій закінчується розчинення парів магнію; зміна розміру бульбашки і її швидкості під час спливання з розплаву; характеристики руху та масообміну паромагнієвої бульбашки залежно від вмісту сірки; характеристики руху та масообміну паромагнієвої бульбашки залежно від вмісту сірки.

Висновки. Розроблено розрахункову модель руху і фізико-хімічної взаємодії газомагнієвих бульбашок з розплавом чавуну. Проведені розрахунки показали, що в реальних умовах рафінування чавуну за вмісту сірки в розплаві

аж до 0,040%, початкового радіусу бульбашки аж до 6,5 мм і глибини розплаву 2,5 м і більше відбувається повне засвоєння парів магнію чавуном.

Список використаних джерел

1. Дослідження впливу умов інжектування магнійвмісних реагентів у рідкий чавун на механізм взаємодії магнію з розплавом і одержання особливо чистого за сіркою чавуну (0,001-0,003%) під час десульфурації в заливальних ковшах. Звіт ІЧМ. № держреєстрації 0103U007231. // Дніпропетровськ, 2005. 253 с.
2. Данквертс П.В. Газо-рідинні реакції. // М.: Хімія, 1973. 296 с.
3. Шлихтинг Г. Теорія прикордонного шару. // М.: Наука, 1969. 742 с.
4. Ключник М.Н., Воронова Н.А. Поведінка частинок магнію в розплаві під час позадоменної десульфурації чавуну // Изв. Вузов. Чорна металургія. 1975. № 10. С. 132–136.

Здоб. освіти Завертайло М.В., к. техн. н. Мацуга О.М.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ІНДЕКСІВ ЯКОСТІ ДЛЯ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ КОРЕЛЮЮЧИХ ОЗНАК ЗА РІЗНИХ ПРЕДСТАВЛЕНЬ ВХІДНИХ ДАНИХ

Реальні набори даних часто містять велику кількість ознак, серед яких можуть зустрічатися групи пов'язаних між собою. Виявлення таких груп дозволяє зменшити розмірність даних, спростити попередній аналіз великих даних, а також побудувати якісніші моделі машинного навчання за рахунок зменшення надлишкової інформації.

У цій роботі розглянуто два підходи до кластеризації ознак [1]:

1. В рамках першого підходу вхідними даними виступала матриця кореляцій ознак. Кластеризації підлягали рядки цієї матриці, які відповідали ознакам. При цьому як метрика відстані використовувалася евклідова метрика.

2. У межах другого підходу вхідними даними була сама матриця даних, яка транспонувалася так, щоб у рядках були ознаки, а у стовпцях –

об'єкти. У цьому випадку в якості метрики подібності використовувався коефіцієнт кореляції Пірсона.

В обох підходах проводилася агломеративна ієрархічна кластеризація вхідних даних. В роботі розглядалися наступні види зв'язків між кластерами: одиночний, повний, середній міжгруповий, центроїдний та Уорда.

Важливим аспектом є визначення оптимальної кількості кластерів ознак. У роботі для цього використовувалися три внутрішні індекси якості кластеризації: Silhouette, Calinski-Harabasz та Davies-Bouldin [2]. На їх основі оцінювалася якість розбиття ознак на різну кількість кластерів, і оптимальною вважалася така кількість, за якою забезпечувалося найкраще значення відповідного індексу. Слід зауважити, що різні індекси можуть вказувати на різну кількість кластерів, не даючи узгодженої між собою відповіді, тому на практиці результати кластеризації доцільно інтерпретувати з урахуванням експертної оцінки.

Для проведення кластеризації ознак у наборах даних було розроблене програмне забезпечення мовою Python, яку обрано завдяки наявності широкого набору бібліотек для кластеризації, оцінювання її якості та візуалізації даних. Розроблена програма приймає на вхід набір даних і формує звіт з результатами кластеризації ознак. Зокрема, вона видає значення індексів якості для розбиттів на різну кількість кластерів, дендрограму та теплові мапи.

Використовуючи розроблену програму, було проведено порівняльний аналіз ефективності індексів якості для визначення оптимальної кількості кластерів в межах обох підходів до кластеризації ознак. Аналіз виконувався на синтетичних наборах даних, які містили помірну кількість ознак, згрупованих у кілька чітко виражених груп із однаковим рівнем кореляції всередині кожної групи. Дані генерувалися відповідно до багатовимірного нормального розподілу з нульовим математичним сподіванням, одиничною дисперсією для всіх ознак та заданою кореляційною матрицею, у якій попередньо задавалися кластери ознак. Набори даних, в яких кількість ознак була менша чи

дорівнювала трьом, не розглядалися через особливості обчислення індексів якості.

Всього було згенеровано 10 наборів даних. Використовуючи спочатку перший підхід, потім другий, в кожному наборі даних ознаки розбивалися на кількість кластерів від 2 до 10 за допомогою ієрархічної кластеризації з різними варіантами міри зв'язку. Після цього оцінювалася оптимальна кількість кластерів на основі трьох індексів, і було підраховано в скількох випадках на основі кожного індексу було визначено правильну кількість кластерів.

В рамках першого підходу на 10 наборах за 5 різних видів зв'язку між кластерами індекси Calinski-Harabasz та Silhouette правильно визначили кількість кластерів в ознаках 35 разів (70%), а індекс Davies-Bouldin – 30 разів (60%). При використанні другого підходу за результатами 50 тестів індекси Calinski-Harabasz та Silhouette визначили правильну кількість кластерів також в 35 випадках (70%), а індекс Davies-Bouldin – в 31 випадку (62%).

Отже, на невеликих наборах даних з чітко визначеними кластерами індекси Silhouette та Calinski-Harabasz показали себе дещо краще у визначенні оптимальної кількості кластерів, ніж індекс Davies-Bouldin. При цьому форма вхідних даних (матриця кореляції між ознаками або транспонована матриця даних) майже не вплинула на результати кластеризації та визначення оптимальної кількості кластерів.

Після цього була здійснена апробації обох підходів на реальному медичному наборі даних, який містив 400 об'єктів та близько 170 ознак. У даному випадку ієрархічна кластеризації проводилася виключно зі зв'язком Уорда. Під час визначення оптимальної кількості кластерів верхню межу кількості кластерів було встановлено в 40.

Індекс Calinski-Harabasz за обох підходів до кластеризації ознак визначив оптимальну кількість кластерів як 4. Індекс Silhouette при кластеризації кореляційної матриці також віддав перевагу 4 кластерам, а під час кластеризації транспонованої матриці початкових даних схилився до 11 кластерів. Індекс Davies-Bouldin, який в межах даного дослідження виявився менш точним, визначив оптимальну кількість кластерів як 3 та 2 відповідно. З фізичної точки зору розбиття на 4 кластери є прийнятним, але один з кластерів очевидно містить маленькі підкластери, тому кращим варіантом буде 11 кластерів.

У роботі проведено порівняльний аналіз ефективності трьох індексів для визначення оптимальної кількості кластерів корелюючих ознак при використанні матриці кореляцій та транспонованих даних як вхідних даних. Встановлено, що на синтетичних даних індекси Silhouette та Calinski-Harabasz демонструють дещо вищу точність порівняно з індексом Davies-Bouldin, а форма представлення вхідних даних мало впливає на результати. Апробація на реальних даних показала різну узгодженість між індексами залежно від підходу до кластеризації.

Список використаних джерел

1. Kuzudisli C., Bakir-Gungor B., Bulut N., Qaqish B., Yousef M. Review of feature selection approaches based on grouping of features. *PeerJ*. 2023.11:e15666. DOI: 10.7717/peerj.15666.
2. Zaki M.J., Meira Jr. W. Data Mining and Analysis. Fundamental Concepts and Algorithms. Cambridge University Press, 2014. 593 p.

**Асп. Загребасв М. С., асп. Звонецький М. С.,
асп. Ящук О.О., д. т. н. проф. С'янов О. М.**

Дніпровський державний технічний університет

МОДЕЛЬ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ - АСИНХРОННИЙ ДВИГУН ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

Метою роботи є дослідження характеристик АД при живленні від ТРН з застосуванням інтегрованої Ansys Simplorer-Maxwell2D та Simulink. Результати спрямовані на оптимізацію пускових режимів, зменшення пускових струмів і підвищення енергоефективності системи.

Дослідження пускових характеристик АД з ТРН зосереджено на аналізі впливу обмеження пускового струму на електромагнітні та механічні характеристики двигуна. Для дослідження режимів пуску ТРН-АД в програмному середовищі Ansys Simplorer [4] створено електричну схему

взаємодії (рис. 1) моделі системи керування (рис. 1, MDL1), та польової моделі АД (рис. 1, FEA1) яка враховує насичення магнітопроводу, розсіювання поля в пазах статора, витіснення струму в пазах ротора, скос пазів, короткозамкнуті кільця. Система імпульсно-фазового керування тиристорами (рис. 2, Matlab Simulink) забезпечує по експоненціальному закону зменшення кута відкриття від 90° до 0° , що дозволяє регулювати пусковий струм.

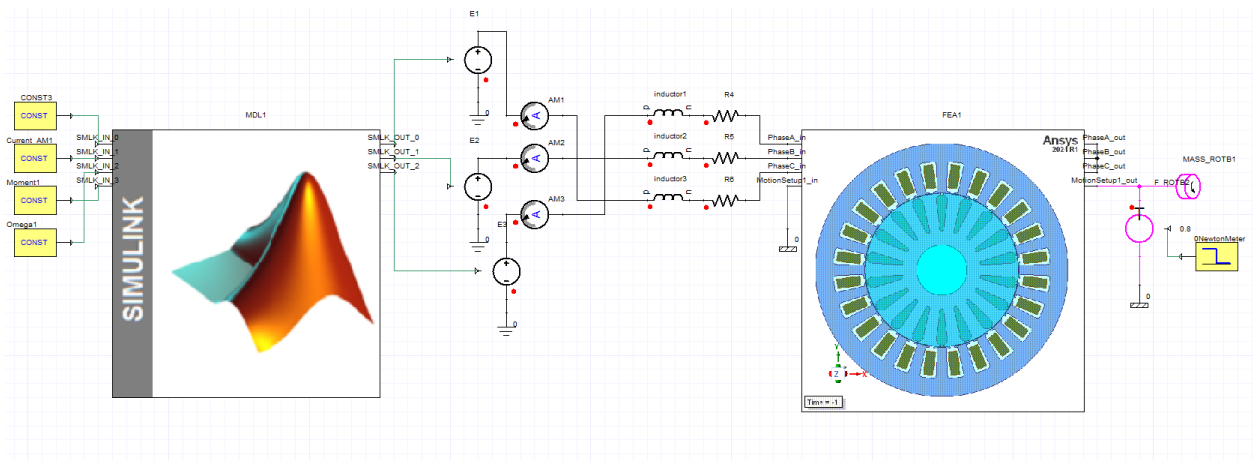


Рис. 1. Структурна схема моделі системи керування ТРН-АД та польової моделі АД (FEA1) в середовищі (програмі) Ansys Simplorer

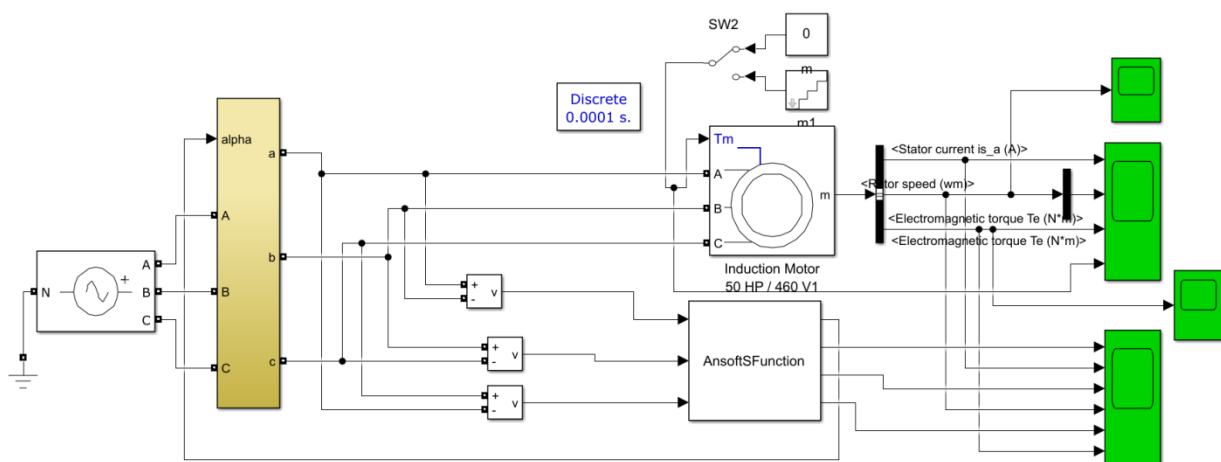


Рис. 2. Модель системи керування ТРН-АД в Simulink з застосуванням модуля взаємного моделювання AnsoftSFunction

В дослідженні основна увага приділена порівнянню пускових характеристик від часу, таких як струм, електромагнітний момент і швидкість обертання ротора, в режимі прямого пуску та з обмеженням струму, що різняться тривалістю керування кутом відкриття тиристорів. При дослідженні

використовувався АД типорозміру 4AA63A4У3 [1], потужністю 250 Вт та швидкістю 1500 об/хв.

При пуску від мережі [2] амплітудне значення струму більше в 4,5 разів від номінального. Зі зміною кута обертання ротора на електромагнітний момент накладаються просторові гармоніки створені зубцевою структурою статора та ротора. Такий пуск забезпечує найшвидший вихід на номінальну швидкість, але створює значні теплові та механічні навантаження.

Введення обмеження струму протягом двох періодів за допомогою ТРН дозволило знизити максимальний струм до $3,5I_n$. На початку пуску електромагнітний момент знизився і на його форму наклались часові гармоніки які утворилися від несинусоїдальною форми напруги ТРН. При цьому час пуску зріс на 6%.

Режим пуску ТРН-АД з обмеженням струму протягом перших чотирьох періодів показано на рис. 3. В даному режимі амплітуда струму зменшилась до $2,8 I_n$, зросла амплітуда гармоніки в формі електромагнітного моменту, зумовлена додатковим накладанням просторових гармонік.

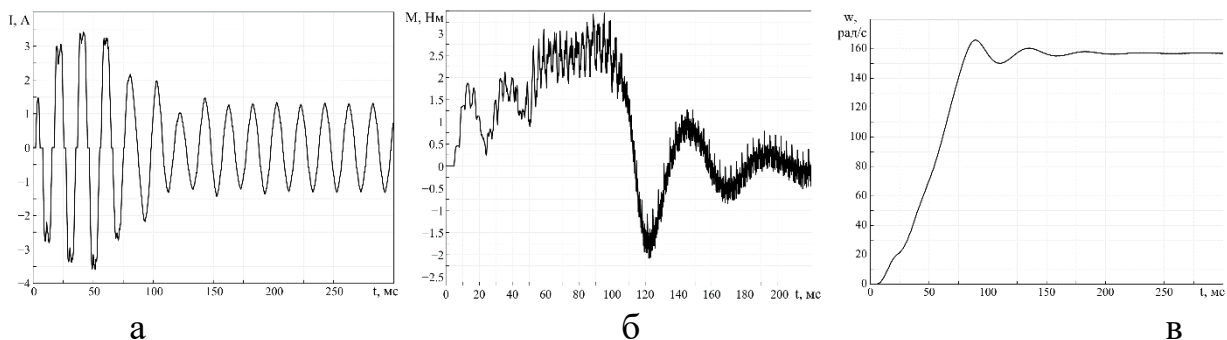


Рис. 3. Перехідні характеристики пуску АД від ТРН, з обмеженням струму на чотирьох періодах, де, а – пусковий струм, б – електромагнітний момент, в – швидкість

Найбільш ефективним із досліджених режимів є пуск із обмеженням струму протягом перших чотирьох періодів, який значно знижує теплові та механічні навантаження, зберігаючи прийнятну тривалість пуску. Результати дослідження показали, що при зменшенні пускового струму зменшується пусковий момент на початку пуску, що обмежує використання ТРН-АД для

механізмів насоса та вентилятора. Отримана модель може бути використана для оптимізації пускових режимів роботи АД.

Список використаних джерел

1. Zahrebaiev Mykhailo, Zvonetskiy Mykhailo, S'yanov Oleksandr. (2024). Mathematical modeling of transient processes in a squirrel-cage induction motor using a field-based approach. *Mathematical Modeling*. DSTU. № 2(51) 2024. 66-76
2. Загребасв М.С., Звонецький М.С., Рязанцев О.В., С'янов О.М. Вплив електромагнітних параметрів асинхронного двигуна з короткозамкнутою кліткою на перехідні процеси. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). Кам'янське, ДДТУ, 2024. №2 (45), 216 с., 136-145
3. Finite Elements Model Co-Simulation of an Induction Motor Drive for Traction Application /RefreeDrive Project. – URL: https://www.refreedrive.eu/wp-content/downloads/Finite_element_model_co-simulation_of_an_induction_motor_drive_for_traction_application_aiecon2019_RFDa.pdf
4. Simulation of Direct Torque Control of Induction Motor Using Simulink, Simplorer, and Maxwell Software / A. K. Singh, P. Kumar, C. U. Reddy, K. Prabhakar. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/302479453>

Здобувач Зеря С. Ю., д. техн. н. Коряшкіна Л.С.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ОПТИМАЛЬНЕ РОЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРІВ НА ГРАФІ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

У сучасному світі задачі оптимізації є невід'ємною складовою багатьох прикладних сфер: логістика, урбаністика, виробництво, енергетика тощо. Однією з найпоширеніших і водночас складних задач у цій галузі є задача оптимального розміщення об'єктів. Її суть полягає в такому розташуванні об'єктів у просторі або системі, яке дозволяє досягти найкращого результату згідно з заданими критеріями (мінімізація витрат, часу, відстані; максимізація продуктивності тощо). Класичні методи розв'язання таких задач часто стикаються з обмеженнями в гнучкості, масштабованості або швидкодії, особливо у випадках великих вхідних даних.

Розглядається задача розміщення центрів в транспортній мережі: визначити найкращих позицій для цих об'єктів з урахуванням обмежень і

цільових критеріїв, таких як мінімізація витрат, скорочення часу доставки або покриття максимальної кількості споживачів. Вибір оптимальних точок для розташування об'єктів у транспортній інфраструктурі потрібно здійснити, враховуючи географічне розташування (відстані між вузлами мережі та їх зв'язність) і велику розмірність мережі (може містити сотні або тисячі вузлів).

Сформульована задача є NP-складною, для пошуку її точного розв'язку не існує поліноміальних алгоритмів. У таких умовах все більшої актуальності набувають евристичні та метаевристичні підходи.

Метою дослідження є розробка і реалізація ефективного генетичного алгоритму для розв'язання задачі оптимального розміщення об'єктів на мережі, виявлення ключових параметрів, що впливають на якість та швидкодію алгоритму.

Актуальність роботи полягає у пошуку інноваційних підходів до оптимізації складних систем, що може знайти застосування в різних галузях, зокрема в управлінні складськими запасами, плануванні містобудівних проєктів та автоматизації дизайну.

Генетичний алгоритм (ГА) – метод оптимізації, натхненний принципами природної еволюції: відбір найкращих особин, схрещування та мутація. Завдяки цим принципам ГА дозволяє ефективно досліджувати великий простір можливих рішень і знаходити субоптимальні, але практично прийнятні варіанти за порівняно короткий час. Генетичний алгоритм працює за наступною схемою:

1. Генерація популяції розв'язків (випадково або на основі евристик).
2. Оцінка розв'язків за допомогою функції придатності.
3. Селекція – вибір кращих особин для подальшого схрещування.
4. Схрещування – комбінування пар розв'язків для створення нових особин.
5. Мутація – випадкові зміни для підтримання різноманіття у популяції.
6. Замінювання частини або всієї популяції та повторення циклу.

Для реалізації генетичного алгоритму розміщення об'єктів у мережі обрано мову програмування Python, яка пропонує широкий спектр інструментів, що дозволяють ефективно працювати з математичними моделями та візуалізувати результати досліджень. В якості основного середовища розробки використовувався Spyder – спеціалізоване інтегроване середовище для наукових обчислень. Для роботи з графовими структурами застосована бібліотека NetworkX. Вона надає потужні інструменти для створення, маніпулювання та аналізу складних мережевих структур. Завдяки NetworkX можна легко задавати топологію мережі, визначати параметри вузлів та зв'язків між ними (рис. 1).

Візуалізація результатів реалізована за допомогою бібліотеки Matplotlib, яка є стандартним інструментом для побудови наукових графіків у Python. Вона дозволяє створювати зрозумілі та інформативні діаграми, що відображають як початковий стан системи, так і результати роботи генетичного алгоритму.

У ході дослідження розроблено модель ГА, адаптовану під задачу розміщення центрів на графах, проведено експерименти з різними налаштуваннями алгоритму та проаналізовано отримані результати. Виконано порівняльний аналіз результатів з іншими методами (жадібні алгоритми, повний перебір, локальні пошуки).

У якості тестових прикладів використано початкові дані з сайту Лондонського університету Брунеля в розділі OR-library – файли rmed1.txt і rmed2.txt. На рис. 1 наведений результат роботи ГА за наступних вхідних параметрах: 200 поколінь, розмір популяції 50 особин, рівень кросоверу 0.7, рівень мутації 0.2, змагальний селектор і двоточковий кросовер. Графік еволюції рішень наведений на рис. 2.

Результати серії експериментів із варіаціями розміру популяції, ймовірності мутації, кількості поколінь, селекторів та інших параметрів ГА показали, що за вдалою комбінацією параметрів можна досягти стабільного та швидкого процесу пошуку оптимального рішення.

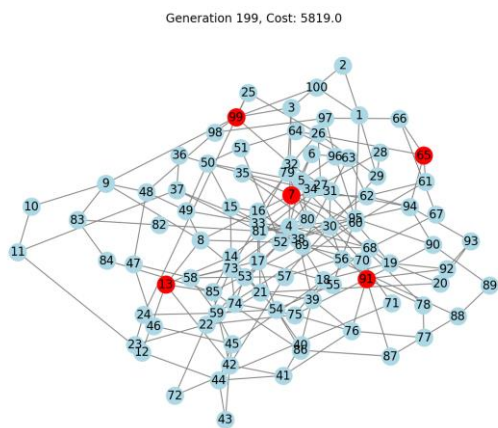


Рис. 1. Оптимальне розташування п'яти центрів (вхідні дані pmed1.txt)

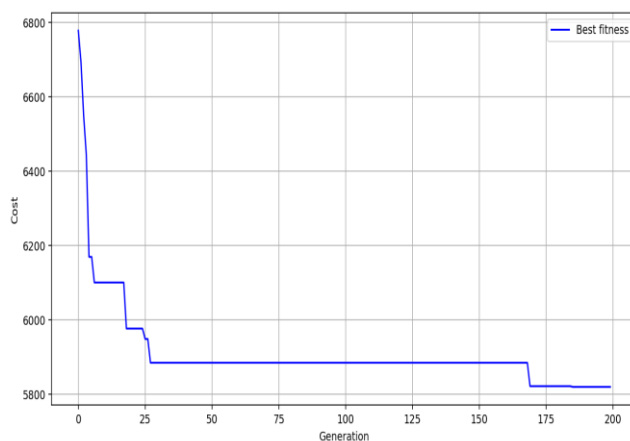


Рис. 2. Еволюція рішення для задачі розташування п'яти центрів

Висновки: Генетичний алгоритм є ефективним інструментом для задач оптимального розміщення об'єктів у випадках, коли класичні підходи є занадто повільними або непридатними через складність простору рішень. Він забезпечує гнучкість у виборі стратегій пошуку, легко адаптується до різних прикладних задач. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на гібридизації ГА з іншими методами (наприклад, локальними пошуками) або на оптимізації параметрів алгоритму в режимі реального часу. Результати дослідження можуть бути корисними для планування логістичних мереж, проектування міської інфраструктури та оптимізації розподілу об'єктів у транспортній галузі.

К.техн.н. Косухіна О.С., Авакімян А.С.

ВСП «Технологічний фаховий коледж

Дніпровського державного технічного університету»

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ ЗАДАЧІ ПРО ЛІТАЮЧІ ТАРІЛКИ

Завдяки відкриттям останнього століття сучасній науці відомі всі основні механізми еволюції, пов'язані з генетичним успадкуванням. Ці механізми досить прості за своєю ідеєю, але досить ефективні. Дивно, але просте моделювання еволюційного процесу на комп'ютері дозволяє отримати вирішення багатьох практичних завдань.

В даній роботі на прикладі задачі про літаючі тарілки розглянуто застосування генетичного програмування. Проводиться змагання між двома командами літаючих тарілок. Метою змагань є те, щоб одна з тарілок команди перемістилася на максимальну відстань від лінії старту. Змагання проходить на трасі, що представляє собою смугу заданої ширини нескінченну в одну сторону. Припускається двовимірна постановка задачі (маневри, пов'язані із зміною висоти польоту, не допускаються).

Кожна команда має N тарілок (агентів). Для кожного агента задаються початкова швидкість і напрямок руху. Агенти в процесі польоту можуть повертати, тим самим, заважаючи руху інших агентів. Кожен агент має певний запас палива, що витрачається в процесі руху. За командою «Старт» всі агенти починають рух з метою максимально віддалитися від лінії старту. Агенти в процесі польоту можуть змінювати швидкість свого руху за рахунок зміни витрати палива.

Система управління командою літаючих тарілок складається з двох систем (рис.1): зі штучної нейронної мережі (рис.2) і кінцевого автомата. При цьому нейронна мережа використовується для класифікації значень речових

вхідних змінних і вироблення вхідних змінних для автомата, а автомат - для вироблення вихідних впливів на літаючу тарілку.



Рис. 1. Загальна схема керуючої системи

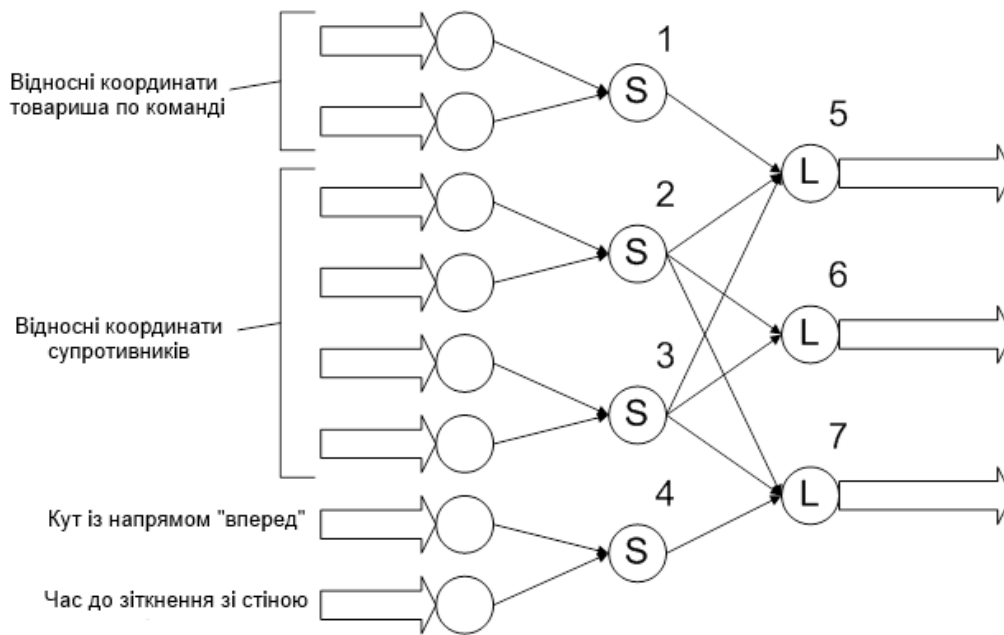


Рис. 2. Нейронна мережа

Символами S на рис. 2 позначені штучні нейрони з сигмоїдальної функцією активації, символом L – нейрони з пороговою функцією активації. Поруч з нейронами вказані їх номери (вони використовуються при описі операції схрещування нейронних мереж). На кожен з трьох виходів нейронної мережі надходить число рівне 0 або 1. Таким чином, існує вісім варіантів комбінацій вихідних сигналів нейронної мережі (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111).

На основі побудованої математичної моделі розроблено програму розв'язку задачі «про літаючі тарілки». При тестуванні в якості суперників використовувалися дві стратегії. Одна з них («проста») полягала в тому, що всі

агенти рухалися строго вперед. Друга («агресивна») - в тому, що всі агенти, крім одного, рухаються в бік агентів «нашої» команди з метою виштовхнути їх за межі траси або збити. Агент, що залишився рухається строго вперед.

Для того, щоб побудована за допомогою генетичного програмування система управління літаючими тарілками могла працювати в цьому випадку, на перші два входи нейронної мережі подавалися відносні координати найближчої тарілки з «своєї» команди, а на входи з третього по шостий подавалися координати двох найближчих тарілок з обох команд. При цьому літаючі тарілки з непарними номерами керувалися системою, побудованою для першої тарілки, а з парними номерами - побудованою для другої тарілки. Результати роботи представлені у табл. 1, де використані позначення: N_{ok} - кількість агентів «нашої» команди, успішно завершили змагання; R_{our} - результат «нашої» команди; R_{op} - результат суперника; $\Delta = R_{our} - R_{op}$.

Таблиця 1. Результати змагання проти «простої» стратегії

	N_{ok}	R_{our}	R_{op}	Δ
Максимум	8	241,69	207,49	34,20
Мінімум	4	203,84	181,56	22,28
Середнє	7.14	222,98	195,05	27,93

Результати змагання проти «агресивної» стратегії

	N_{ok}	R_{our}	R_{op}	Δ
Максимум	7	232,45	225,64	6,810
Мінімум	1	197,43	195,56	1,87
Середнє	7.14	211,37	207,05	4,32

Аналізуючи одержані результати було визначено напрямки подальшого дослідження: застосування замість штучних нейронних мереж інших класів автоматичних класифікаторів (байєсовські мережі довіри, дерева прийняття рішень, Support VectorMachines тощо); застосування функцій пристосованості, що враховують не тільки загальний результат, а й поведінку агентів протягом змагання; застосування імовірнісних автоматів замість детермінованих кінцевих автоматів.

Асп. Лубенець Д. Є., д. техн. н. Коряшкіна Л.С.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**ОПТИМІЗАЦІЯ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ В ІЄРАРХІЧНИХ
ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ ІЗ РОЗМІЩЕННЯМ
ПРОМІЖНИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЦЕНТРІВ**

Об'єктом дослідження є двоетапні процеси розподілу матеріальних потоків, що виникають у транспортно-логістичних системах, до складу яких входять центри збору ресурсу на певній території (центри першого етапу), і центри кінцевої його доставки (другого етапу). У таких системах за кожним центром першого етапу закріплюється його сервісна зона. В роботі [1] представлені математичні моделі двоетапних задач розміщення-розподілу, за яких зони не перекриваються. Однак на практиці може виникнути така ситуація, коли з технічних або організаційних причин певний центр не зможе забезпечити збір ресурсу на усій своїй території. У такому випадку ресурс перевозять через інші, найближчі центри. У даній роботі розглянуто задачі пошуку місць розміщення проміжних центрів та зон їх обслуговування, а також подальшого розподілу і доставки зібраного ресурсу до центрів кінцевого призначення за критерієм мінімізації транспортних і організаційних витрат. При цьому сервісні зони центрів першого етапу можуть перекриватися кратно. Такі задачі виникають під час організації раціонального збору сільськогосподарських культур їх доставки спочатку до зерносховищ, а далі на переробні підприємства; або формування мережі сучасних сміттєзбиральних та сміттесортувальних станцій з метою скорочення питомих витрат на вивіз відходів. Приміром описаних двоетапних логістичних процесів є евакуація населення з території, постраждалої від надзвичайної ситуації (НС).

Моделі описаних вище процесів побудовані за наступних припущень щодо вихідних даних.

1) Проміжні логістичні центри виконують функції збору і розподілу ресурсів на закріпленій за ним території. Будівництво та витрати на утримання кожного проміжного логістичного центру вважаються відомими та залишаються постійними протягом розглянутого періоду.

2) Вартість облаштування центрів другого етапу вважається відомою для всіх центрів.

3) Відстань від кожного проміжного логістичного центру до кожного пункту попиту на транспортування вважається відомою та не змінюється з часом.

4) Кожен логістичний центр, який є центром кінцевого збору ресурсу, може його накопичувати з кількох проміжних пунктів. А за кожним останнім закріплюється певна зона постраждалої від НС території для її обслуговування, при цьому передбачається, що ресурс з певної точки території може бути доставлений до центру кінцевого призначення через будь-який з k найближчих проміжних центрів, що забезпечує гнучкий та надійний ланцюг постачання.

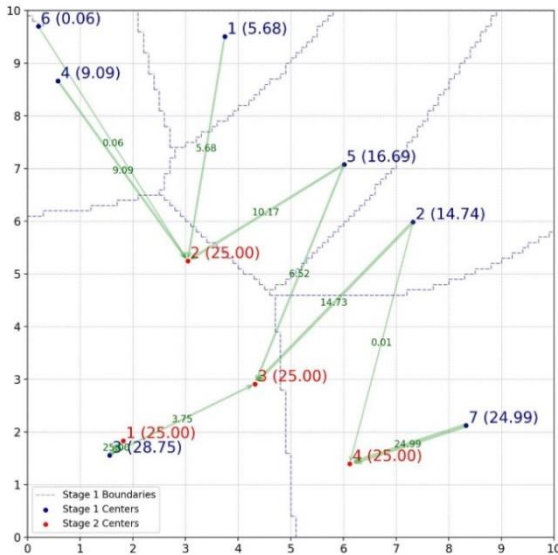
5) Ресурс розповсюджений на території, що розглядається, і його розподіл може бути описаний аналітичною функцією.

6) Весь ресурс, що накопичується у проміжному розподільчому центрі, має бути доставлений до кінцевого адресату.

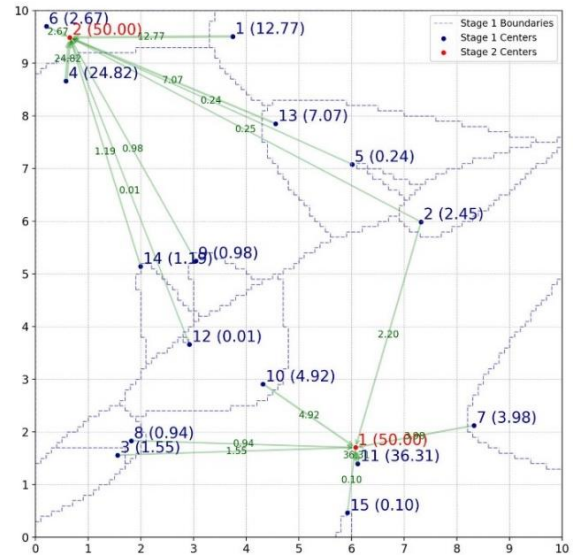
Відтак, передбачено: 1) побудова оптимального мультиплексного розбиття території, тобто перекриття зон на той випадок, коли найближчий центр не зможе забезпечити клієнта ресурсом [2]; 2) двоетапний характер розподілу ресурсів; 3) оптимальне розміщення проміжних розподільчих центрів.

Чисельний алгоритм розв'язання задачі оптимального двоетапного розподілу ресурсів в транспортно-логістичній системі з визначенням місць розміщення проміжних центрів ґрунтується на такій схемі. Сформульована задача оптимального мультиплексного розбиття множини з додатковими зв'язками записується в термінах характеристичних функцій підмножин, що

складають мультиплексне розбиття. З використанням теорії двоїстості знаходять аналітичні вирази характеристичних функцій оптимального розбиття, при цьому ці вирази залежать від певної кількості параметрів, які є розв'язком допоміжної задачі скінченновимірної оптимізації негладкої функції. Остання розв'язується за допомогою r -алгоритму Шора. Визначивши характеристичні функції підмножин, які складають оптимальне мультиплексне розбиття множини, за кожним центром першого етапу закріплюється зона його обслуговування з урахуванням перекриття зон до k разів. Далі за допомогою методу потенціалів розв'язується транспортна задача та обчислюються оптимальні величини потоків ресурсу між центрами першого і другого етапів. На рис. 1 наведено візуалізацію результатів оптимального двоетапного розподілу ресурсу, рівномірно розподіленого по квадратній території між N проміжними центрами (що збирають ресурс) і M центрами кінцевого призначення з указівкою обсягу зібраного ресурсу і величини потоку, що прямує до центрів другого етапу.



а) $N = 10, M = 4$



б) $N = 15, M = 2$

Рис. 1. Візуалізація результатів оптимального розподілу потоків ресурсу з N проміжними центрами і M центрами другого етапу

Висновки: Аналіз результатів обчислювальних експериментів дозволив виявити напрямок подальших досліджень, а саме: удосконалення алгоритму може бути здійснено за рахунок виключення з розгляду тих проміжних центрів, потужності яких виявилися меншими за певну малу величину і перерозподілом їхнього ресурсу між найближчими до них центрами (див. рис. 1, б, 12-й центр). Таке удосконалення є практично обґрунтованим.

Список використаних джерел

1. Станіна О.Д. Моделі та методи розв'язання задач оптимального розміщення двоетапного виробництва з неперервно розподіленим ресурсом: монограф. / О.Д. Станіна, С.А. Ус, Л.С. Коряшкіна / Дніпро, вид-ць «Свідлер А.Л.», 2021. 200 с
2. Коряшкіна Л.С. Математичні моделі та методи мультиплексного розбиття і багатократного покриття множин для задач розміщення-розподілу / Л. Коряшкіна, Д. Лубенець // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. 2023. № 4. С. 12 – 25

Асп. Молчанов А.О.

Дніпровський національний університет ім. О. Гончара

ВИКОРИСТАННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ПОДВІЙНОГО ШАРУ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ НАБЛИЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛЬНИХ ПОЛІВ З РОЗРИВНИМИ УМОВАМИ НА ГРАНИЦІ

Розглядається спосіб відновлення потенціальних фізичних полів, який у світовій англійській літературі називається method of fundamental solutions (MFS). Основна ідея методу полягає в тому, що гармонічна функція, яка описує потенціальне поле, апроксимується комбінацією лінійно незалежних розв'язків рівняння Лапласа:

$$\tilde{u}(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \Phi_i(x), \quad (1)$$

де $\Phi_i(x) = \Phi(x - y_i)$, з точками сингулярності y_i , обраними навколо тої області, в якій потрібно відновити поле. Для 2D випадку $\Phi(x) = -\frac{1}{2\pi} \ln|x|$. Для

визначення невідомих коефіцієнтів $\alpha = (\alpha_0, \dots, \alpha_m)$ у рівняння (1) підставляємо n відомих значень поля, що визначені (вимірні) в граничних вузлах $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Отриману систему $n \times (m+1)$ лінійних рівнянь розв'язуємо в сенсі мінімізації суми квадратів відхилень. Така система є некоректною за Адамаром й для отримання адекватного розв'язку вимагає певного методу регуляризації.

У випадку, коли маємо задачу з розривними умовами на границі:

$$\begin{cases} \Delta u = 0, x \in \Omega \\ u = g_0(x), x \in \Gamma_0, \\ u = g_1(x), x \in \Gamma_1 \end{cases} \quad (2)$$

де $\Gamma = \Gamma_0 \cup \Gamma_1$ - границя області Ω , й на кінцях цих сегментів маємо розриви, вищезгаданий метод не є підходящим, оскільки в (1) всі функції $\Phi_i(x)$ є аналітичними (в заданій області) й погано пристосовані для задач з неаналітичними граничними умовами. Для подолання вказаних труднощів пропонується [1] лінійну комбінацію (1) доповнити функціями спеціального виду:

$$\tilde{u}(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \Phi_i(x) + \sum_{r=0}^p \beta_r \Psi_r(x), \quad (3)$$

де остання сума – лінійна комбінація функцій, кожна з яких є потенціалом подвійного шару (double layer potential):

$$\Psi_r(x) = \int_{\Gamma_1} \partial_{v_y} \Phi(x-y) y^r ds_y, \quad (4)$$

v_y - одиничний вектор нормалі в точках $y \in \Gamma$, що вказує назовні області Ω . Такі функції є гармонічними й аналітичними всередині Ω й їх сліди (trace) на ділянці границі Γ_1 є поліноміальними функціями x^r , $r=0,1,2,\dots$. В роботі [2] значення цих функцій обчислювались за допомогою дискретизації інтеграла, виконано дослідження цього методу для значень до $p=18$ включно. Кількість p

функцій $\Psi_r, r = \overline{1, p}$ обирається, виходячи з міркувань точності обчислення на границі Γ_1 .

Проведений аналіз чисельного моделювання показує, що середньоквадратична похибка нижча на кілька порядків у порівнянні з класичним MFS. Показано, що метод дозволяє отримувати адекватні розв'язки у випадку зашумлених вхідних даних.

Список використаних джерел

1. Carlos J.S. Alves, Svilen S. Valtchev, Applied Mathematics and Computation. 320(3): 61-74 (2018).
2. Molchanov A.O. Problems of applied mathematics and mathematical modeling. Volume 24: 134-140 (2024).

К. ф.-м. н. Олійник Л.О.

Дніпровський державний технічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ОПЕРАТОРНОГО ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ФРЕДГОЛЬМА

Предмет дослідження. Операторний генетичний алгоритм і його застосування.

Мета роботи. Дослідження ефективності операторного генетичного алгоритму при застосуванні до розв'язання інтегрального рівняння Фредгольма II роду.

Актуальність роботи. Як відомо, при дослідженні певними методами граничних задач, що виникають в різних галузях наукових досліджень, виникає необхідність розв'язання інтегральних рівнянь Фредгольма II роду. Незважаючи на те, що для цих інтегральних рівнянь існує досить багато методів наближеного розв'язання, застосування еволюційних алгоритмів для наближеного розв'язання інтегральних рівнянь в останній час набуло актуальності.

В даній роботі представлено один з напрямків застосування операторного генетичного алгоритму, розробленого автором в ([1]), а саме, до наближеного розв'язання інтегральних рівнянь. Результати роботи операторного генетичного алгоритму показали досить високий рівень ефективності, достатній рівень ступеня точності, отриманого наближеного розв'язку.

Розглянемо задачу знаходження наближеного розв'язку $x_n(t)$ лінійного інтегрального рівняння Фредгольма II роду з невідродженим ядром $K(t, s)$ в області $\Omega = \{(t, s) \in R^2: a \leq t, s \leq b\}$.

$$x(t) - \lambda \int_a^b K(t, s)x(s) ds = f(t)$$

Ядро $K(t, s)$ і функція $f(t)$ відомі і визначені у Ω .

Наближений розв'язок шукаємо у вигляді лінійної комбінації функцій деякого ортогонального базису простору $L_2[a, b]$ ([2]).

$$x_n(t) = \varphi_0(t) + \sum_{k=1}^n c_k \varphi_k(t)$$

Після підставлення $x_n(t)$ до рівняння отримаємо *інтегральну нев'язку*

$$\mu(t, c_1, \dots, c_n) = \psi_0(t) + \sum_{k=1}^n c_k \psi_k(t),$$

де
$$\psi_0(t) = \varphi_0(t) - \lambda \int_a^b K(t, s)\varphi_0(s) ds - f(t)$$

$$\psi_k(t) = \varphi_k(t) - \lambda \int_a^b K(t, s)\varphi_k(s) ds, \quad k = 1, \dots, n.$$

Для точного розв'язку інтегральна нев'язка дорівнює нулю. Для визначення наближеного розв'язку необхідно знайти коефіцієнти c_1, \dots, c_n . Для цього досліджується на глобальний мінімум норма інтегральної нев'язки, тобто

$$\|\mu(t, c_1, \dots, c_n)\| \rightarrow \min.$$

Тут застосовуємо евклідову норму:

$$\|\mu(t, c_1, \dots, c_n)\|^2 = \sum_{j=1}^m \mu^2(t_j, c_1, \dots, c_n),$$

де t_1, \dots, t_m точки розбиття відрізка $[a, b]$. Зрозуміло, що точність розв'язку із зростанням параметрів n та m підвищується.

Застосування операторного генетичного алгоритму до даної задачі дає позитивні результати. Для того, щоб можна було порівняти дію ОГА з алгоритмом диференціальної еволюції ([2]), розглянемо простий приклад з цієї статті.

Розглядається рівняння

$$x(t) - \int_{-1}^1 (ts + t^2)x(s) ds = 1.$$

Точний розв'язок цього рівняння відомий: $x(t) = 1 + 6t^2$. У якості базису обираємо послідовність поліномів Лежандра. Наближений розв'язок шукаємо у вигляді

$$x_3(t) = c_1 + c_2 t + c_3 \frac{3t^2 - 1}{2}.$$

Для даної ситуації отримаємо інтегральну нев'язку вигляду:

$$\mu(t, c_1, c_2, c_3) = c_1(1 - 2t^2) + c_2 \frac{t}{3} + c_3 \frac{3t^2 - 1}{2} - 1$$

Нарешті визначимо розбиття відрізка $[-1, 1]$ при $m=13$.

Отже, задача полягає у визначенні параметрів c_1, c_2, c_3 у яких норма нев'язки досягає глобального мінімуму, який дорівнює 0.

$$\|\mu(t, c_1, c_2, c_3)\|^2 = \sum_{j=1}^{13} \mu^2(t_j, c_1, \dots, c_n),$$

Для визначення ефективності операторного генетичного алгоритму проведено обчислювальний експеримент, який склався з десяти випробувань. Кожне випробування полягало у запуску алгоритму з обмеженням на кількість ітераційних кроків (не більше 15). В кожному випробуванні допускалось не більше 15 запусків алгоритму. Запуск алгоритму вважався позитивним, якщо значення інтегральної нев'язки не перевищували 0,001. Результат обчислювального експерименту - усі випробування дали позитивний результат.

Найкращий з десяти отриманих наближених розв'язків має вигляд:

$$x_3(t) = 2,9992458 - 0,000007t + 3,99966 \frac{3t^2 - 1}{2} =$$

$$= 1,0013462 - 0,000007t + 5,998598t^2 \approx 1 + 6t^2.$$

Очевидно, що після округлення коефіцієнтів наближеного розв'язку отримуємо точний розв'язок $x(t) = 1 + 6t^2$.

Якщо розглянути середнє значення (у 10 випробуваннях) коефіцієнтів наближеного розв'язку $c_1 = 3,000879, c_2 = 0,000121, c_3 = 4,001258$, то наближений розв'язок має вигляд:

$$x_3(t) = 3,000879 + 0,000121t + 4,001258 \frac{3t^2 - 1}{2} =$$

$$= 1,00025 + 0,000121t + 6,00189t^2 \approx 1 + 6t^2,$$

Тобто після округлення коефіцієнтів також отримаємо точний розв'язок.

У порівнянні з результатами статті ([2]) приходимо до висновку, що операторний генетичний алгоритм при розбитті відрізка $[-1,1]$ тринадцятьма точками (що у 15 разів менше розбиття, яке використовувалось в ([2])), знаходить з достатнім ступенем точності наближений розв'язок інтегрального рівняння. Середня похибка для коефіцієнтів наближеного розв'язку склала 0,0106, а мінімальна похибка дорівнювала 0,0012. Крім того необхідно відзначити, що в ([2]) максимальна допустима кількість популяцій складала 60, а в операторному генетичному алгоритмі 15 ітераційних кроків (аналог створення популяції).

Висновок. Приведені результати дослідження підтвердили ефективність операторного генетичного алгоритму при застосуванні до розв'язання інтегральних рівнянь Фредгольма II роду.

Список використаних джерел

1. Л.О.Олійник Операторна модель рекомбінації в генетичних алгоритмах. Математичне моделювання. 2019. Вип.1(40). Кам'янське. ДДТУ. С 14- 21.
2. Вакал Л. П., Вакал Є. С., Довгий Б. П. Розв'язання інтегральних рівнянь Фредгольма II роду з використанням диференціальної еволюції. Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки. № 1 (2021), С. 15-21.

Д. ф.-м.н. Пасічник А. М., к. ф.-м.н. Худа Ж. В.,

здобувач Богданенко О.С.

Дніпровський державний технічний університет

**МОДИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ГІЛОК І ГРАНИЦЬ ДЛЯ ЗАДАЧІ
ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ З
УРАХУВАННЯМ ОБ'ЄМУ ВАНТАЖУ**

В умовах ринкової конкуренції, транспортні компанії мають постійно вирішувати завдання мінімізації витрат на перевезення при забезпеченні високої якості логістичних послуг. Зростання обсягів вантажних перевезень і ускладнення логістичних ланцюгів вимагає використання ефективних методів оптимізації транспортних процесів, що дозволяють зменшити витрати часу, коштів і ресурсів.

У даній роботі досліджуються задачі оптимізації маршрутів автомобільних перевезень для мінімізації сумарної транспортної роботи від логістичного центру до пунктів доставки. Йдеться про пошук замкнутого маршруту, що проходить через кожне місто один раз і мінімізує загальні витрати. Головна відмінність даного дослідження від інших полягає в тому, що воно не лише мінімізує маршрут, а й враховує обсяг вантажу, що доставляється.

В роботі запропоновано алгоритм оптимізації маршрутів автомобільних перевезень вантажів за критерієм мінімізації транспортної роботи з їх доставки, коли відстані та обсяги доставки для кожного пункту задані. Для підвищення ефективності пошуку оптимального маршруту проведено модифікацію методу гілок і границь із застосуванням динамічного визначення елементів матриці транспортної роботи доставки.

Відстані між відповідними пунктами перевезень є відомими і задані матрицею відстаней:

$$C = \|c_{ij}\| \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

c_{ij} – відстань між місцями розміщення пункту відправлення і пунктів доставки.

Обсяги доставки вантажів із транспортно-логістичного центру до кожного пункту призначення також є заданими і визначаються матрицею доставки:

$$P = \|p_i\| \quad (i = 2, 3, \dots n), \quad (2)$$

де: p_i – обсяг доставки вантажу в i -й пункт доставки; n – кількість пунктів призначення.

Загальна вага перевезень всіх вантажів q_1 із транспортно-логістичного центру до пунктів призначення визначається формулою:

$$q_1 = \sum_{i=2}^n p_i . \quad (3)$$

Поточний обсяг перевезення вантажу q_i на кожному кроці визначається рекурентною формулою:

$$q_i = q_{i-1} - p_{k_{i-1}}, \quad (4)$$

де q_{i-1} – обсяг вантажу на попередньому етапі, $p_{k_{i-1}}$ – обсяг, відвантажений в попередньому пункті доставки.

Зазначимо, що транспортна робота є комплексним показником, що відображає обсяг і відстань перевезення вантажів та визначається їх добутком і вимірюється у т·км. В даному випадку вся множина можливих варіантів перевезення вантажу описується динамічною матрицею транспортної роботи доставки

$$A_{k_s} = \|a_{ij}^{k_s}\| \quad (i=1, 2, \dots n ; j=1, 2, \dots n ; k_s=1, 2, \dots n-1), \quad (5)$$

де $a_{ij}^{k_s} = q_{k_s} \cdot c_{ij}$.

Особливість запропонованого методу полягає в тому, що елементи матриці транспортної роботи визначаються на кожному кроці динамічно, оскільки їх

значення залежить від обсягу відвантаження, яке відбулося на попередньому кроці.

Математичну модель такої задачі можна сформулювати наступним чином: цільова функція оптимізації транспортної задачі, що визначає сумарну транспортну роботу з доставки вантажів до пунктів призначення, запишеться у вигляді:

$$F = \sum_{i=1}^n q_i \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min. \quad (6)$$

У формулі (6) x_{ij} – коефіцієнт переходу із пункту з номером i в пункт із номером j . Кожна змінна x_{ij} дорівнює 0, якщо перехід від i до j не входить у розглянутий маршрут, і дорівнює 1, у випадку включення такого переходу в маршрут. Тоді умова того, щоб кожне місто розміщення пункту доставки було відвідане і залишене лише один раз, описується наступними рівняннями:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1; \quad (j = \overline{1, n}); \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; \quad (i = \overline{1, n}) . \quad (8)$$

Основна ідея методу полягає в тому, що розгалуження множини припустимих значень на дерево підмножин проводиться за алгоритмом, що базується на побудові оцінок зверху для цільової функції на деякій множині розв'язків. Такий підхід дозволяє організувати повну процедуру перебору можливих варіантів маршрутів для даної задачі.

Аналіз результатів проведених розрахунків підтверджує ефективність запропонованого підходу і показує, що його застосування дозволяє зменшити обчислювальну складність завдяки використанню покращених стратегій відсікання нерелевантних рішень та адаптивного розгалуження. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність результатів розрахунків та

зменшити час пошуку оптимального маршруту за критерієм мінімізації транспортної роботи доставки вантажів до пунктів призначення.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розробці гібридних алгоритмів, що поєднують застосування методу гілок і границь з елементами штучного інтелекту для підвищення швидкості обчислень та адаптивності з урахуванням динаміки транспортних потоків.

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,

Associate Professor Pasichnyk V.A.

Software Engineering and Digital Transformation Company Luxoft

**STRUCTURAL MODEL OF NEURAL NETWORK
OF OPTIMIZATION OF SOFTWARE SYSTEMS “OPTIMAL_SOFT”**

In modern conditions, increasing the efficiency of information management systems software is one of the effective incentives for the successful industrial and economic development of advanced countries in the world. Software optimization allows you to significantly improve the efficiency of software with reduced use of system resources. In this regard, the problem of improving methods and technologies for optimizing information management systems software is relevant and important enough to solve applied problems.

To increase the efficiency of the process of developing and optimizing software for information control systems, it is proposed to use a two-level intelligent network system (INS) based on artificial neural networks, which have proven themselves to be quite effective in solving several applied problems in various industries, as well as in creating so-called “artificial intelligence systems”. To do this, it is planned to form a base of unified algorithms and corresponding programs for their implementation at the first level with testing of the correctness of logic and functional adequacy. In the

future, the base of algorithms and program implementations will allow us to ensure the optimization of the development of new algorithms and programs in an automated mode. At the second level of the system, it is planned to create a base of reference functional modules for their further use as unified blocks for the development of software systems.

The implementation of the proposed approach will allow us to ensure an increase in the efficiency of software development for management information systems with a significant reduction in its cost and will also open new opportunities and prospects for the creation of new technologies for automating the software development and optimization process.

Асп. Пеняк Б.О.

Національний університет «Львівська Політехніка»

БЛОКЧЕЙН В ЕЛЕКТРОННОМУ УРЯДУВАННІ: ГЛОБАЛЬНИЙ ДОСВІД ТА СТРАТЕГІЯ ДЛЯ УКРАЇНИ

1. Актуальність теми

У сучасних умовах цифрової трансформації державних послуг, блокчейн-технології виступають потужним інструментом забезпечення прозорості, безпеки та довіри громадян до уряду. Особливо актуальним є їх впровадження у виборчі процеси, державні закупівлі, цифрову ідентифікацію та ведення реєстрів.

2. Міжнародний досвід

Естонія — лідер е-урядування, хоча не використовує блокчейн для голосування, демонструє ефективність криптографічної моделі.

Швейцарія — пілотні проєкти з блокчейн-голосування показали практичність, але зустріли спротив через ризики безпеки.

США — Західна Вірджинія протестувала голосування через додаток Voatz. Хоча зростає явка, безпекові недоліки стали критичними.

ОАЕ — Дубай інтегрує блокчейн у всі держпроцеси, включно з митними, транспортними та майновими реєстрами.

Сінгапур — орієнтація на фінансові системи з використанням проєкту Ubin; можливість розширення в інші сектори.

3. Стан та перспективи в Україні

ProZorro — дієва гібридна система державних закупівель, з потенціалом інтеграції блокчейну для вищої автоматизації.

Реєстри нерухомості — централізовані, але можуть бути замінені блокчейн-архітектурою для зменшення корупції.

Платформа "Дія" — уже використовує блокчейн для фіксації часових міток.

Судові рішення — блокчейн може забезпечити їх незмінність та прозорість.

Онлайн-голосування — перспективна сфера, де Quorum + Tessera демонструє високу продуктивність до 5000 TPS у локальній мережі.

4. Обґрунтування вибору Quorum

Консорціумна модель забезпечує баланс між безпекою, масштабованістю та контролем.

Механізми консенсусу: IBFT 2.0 гарантує стійкість до візантійських відмов, Raft — швидкість при довіреному середовищі.

Tessera дозволяє реалізувати конфіденційність голосів через приватні транзакції.

Архітектура: 60 вузлів Quorum + Tessera — надійна, децентралізована, з автоматичним масштабуванням.

5. Стратегія впровадження

Створення законодавчої бази.

Пілотні проекти в сфері голосування.

Навчання держслужбовців.

Міжнародне партнерство та адаптація успішних практик.

6. Висновки

Блокчейн має потенціал трансформувати державне управління в Україні. Quorum є оптимальною платформою для виборчих систем. Реалізація повинна враховувати навантаження, безпеку, масштабованість та громадську довіру.

К. техн. н. Сасов О.О., здобувач Боць В.В.

Дніпровський державний технічний університет

МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Математичне моделювання є невід'ємною частиною технічної діагностики автомобілів. Воно дозволяє оцінювати поточний рівень зносу вузлів та агрегатів, прогнозувати можливі несправності та оптимізувати технічне обслуговування. У цій роботі розглянуто основні методи математичного моделювання, що застосовуються у діагностиці транспортних засобів:

1. Регресійний аналіз використовується для виявлення залежностей між різними параметрами автомобіля, такими як пробіг, рівень вібрації, температура олії та інші. Наприклад, регресійна модель може бути представлена рівнянням:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + \varepsilon \quad (1)$$

де: Y - прогнозований параметр (наприклад, ступінь зносу гальмівних колодок),

X_1, X_2, \dots, X_n - фактори (наприклад, пробіг, навантаження і т.д.),

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ - коефіцієнти моделі,

ε — помилка моделі.

2. Байєсовські мережі використовуються для аналізу ймовірності виникнення несправностей на основі наявних даних. Вони дозволяють враховувати невизначеність та використовувати апостеріорні ймовірності для оновлення інформації про технічний стан. Наприклад, визначення ймовірності виходу з ладу двигуна в залежності від температури рідини, що охолоджує, і тиску моторної оливи.

3. Методи кінцевих елементів широко використовуються в аналізі механічних систем автотранспортних засобів. Наприклад, вони дозволяють оцінювати напружено деформований стан деталей підвіски або рами автомобіля при різних навантаженнях або моделювання деформації гальмівного диска під час нагрівання та подальшого охолодження.

4. Штучні нейронні мережі використовуються для прогнозування технічного стану автомобіля на основі аналізу великих масивів даних, які отримують з датчиків. Наприклад, нейронна мережа, навчена на даних про вібрації двигуна, може передбачати його відмову за кілька тисяч кілометрів до фактичної поломки.

Застосування математичних моделей в автомобільній діагностиці дозволяє:

1. Оптимізувати графік технічного обслуговування, виходячи з реального стану компонентів автомобіля, а не на фіксованих інтервалах пробігу.

2. Знижувати витрати на ремонт за рахунок раннього виявлення несправностей.

3. Підвищувати безпеку експлуатації автомобілів.

4. Автоматизувати процес діагностики з використанням хмарних технологій та Інтернету речей (IoT).

Наприклад, використання регресійних моделей та нейронних мереж дозволяє передбачити, коли конкретний вузол автомобіля досягне критичного рівня зношування, що дозволяє проводити технічне обслуговування саме у

необхідний момент, а не раніше чи пізніше. Це знижує витрати та підвищує ефективність експлуатації автотранспортних засобів.

Використання регресійного аналізу, Байєсівських мереж, МКЕ та нейронних мереж дозволяє підвищити точність прогнозів та знизити експлуатаційні витрати. Подальший розвиток технологій машинного навчання та інтернету речей сприятиме вдосконаленню методів діагностики та моніторингу стану автотранспортних засобів.

Список використаних джерел

1. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006. 758p.
2. J. N. Reddy. An Introduction to the Finite Element Method. McGraw-Hill, 2005. 704 p.

Д. техн. н. Сохацький А.В.

Університет митної справи та фінансів,

Інститут транспортних систем та технологій НАН України

ДО ПРОБЛЕМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕХОДУ ЛАМІНАРНОЇ ТЕЧІЇ ДО ТУРБУЛЕНТНОЇ

Проблеми моделювання розвиненої турбулентності, що виникає за досить великих чисел Рейнольдса Re залишаються відкритими. Слід зазначити, що єдиного механізму переходу до турбулентного хаосу в різних типах гідродинамічних течій наразі ще не знайдено. На сьогодні найбільш аргументованими є чотири найпоширеніші механізми переходу ламінарної течії до турбулентної при досягненні числом Рейнольдса критичного значення Re_{cr} :

- сценарій переходу до турбулентності за Ландау і Хопфом;
- сценарій процесу хаотизації руху рідини Рюеля-Такенса.;
- перехід до турбулентного хаосу через послідовність біфуркацій подвоєння періоду;

- перехід до турбулентності через переміжуваність.

У розвиненому турбулентному потоці присутні пульсації з масштабами від найбільших до дуже малих. Такі течії характеризуються наповненими спектрами Фур'є, причому не тільки часовими, а й просторовими. Основну роль у турбулентному потоці відіграють великомасштабні пульсації, масштаб яких - порядку величини характеристичної довжини L , що визначає розмір області G , у якій відбувається турбулентний рух. Цю величину називають зовнішнім масштабом турбулентності. Великомасштабні рухи, що мають найбільші амплітуди, мають певну швидкість, за порядком величини порівнянню зі змінами середньої швидкості вздовж відстані L . Дрібномасштабні ж пульсації, що мають значно менші амплітуди, можна розглядати як дрібну детальну структуру, що накладається на основні великомасштабні турбулентні рухи. У дрібномасштабних пульсаціях укладена лише порівняно мала частина всієї кінетичної енергії рідини. Розвинена дрібномасштабна турбулентність є локально однорідною та ізотропною.

Згідно з теорією Колмогорова дрібномасштабна структура розвиненої турбулентності для ізотермічної течії (коли $\rho = const, \nu = const$) визначається каскадним характером передання енергії по спектру вихорів (турбулентних пульсацій) різних просторово-часових масштабів (рис. 1). Якісна схема каскаду Річардсона-Колмогорова полягає в наступному. Дрібні вихори отримують енергію в результаті послідовного подрібнення великих вихорів при зростанні числа Рейнольдса Re . Найбільші енергонесучі вихори утворюються внаслідок втрати стійкості вихідної ламінарної течії, і їхні розміри $\lambda_1 \equiv L_1$ (Прандтлівський шлях перемішування) значно менші за характерний масштаб L самої області течії G . Ці збурення першого порядку, через занадто велике число Рейнольдса великомасштабних пульсацій $Re_{\lambda_1} \sim \lambda_1 u'_1 / \nu$, відповідного їхньому масштабу λ_1 і відносної швидкості u'_1 ; виявляються нестійкими і, руйнуючись, породжують

збурення другого порядку ($\lambda_2 u'_2$), які, зі свого боку, з тієї самої причини спричиняють появу ще більш дрібних вихорів і т. д.

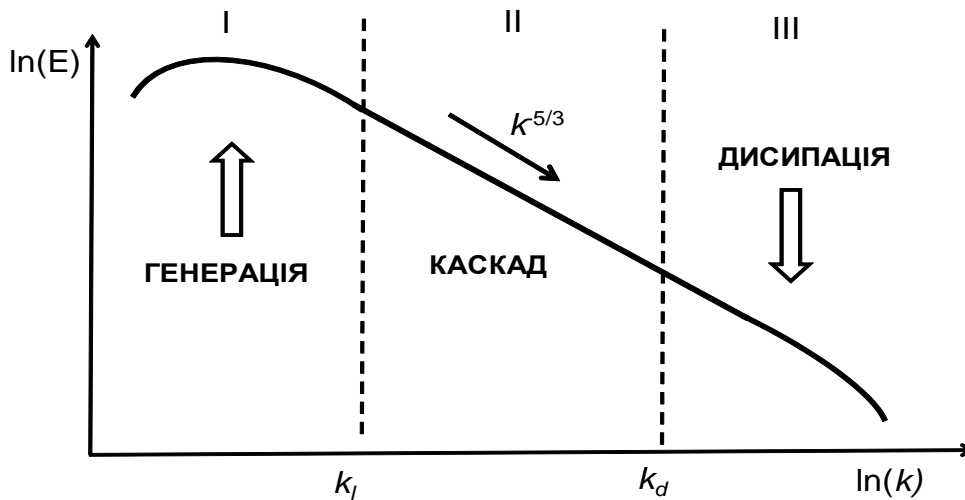


Рис. 1. Області енергетичного спектру турбулентності для високих значень числа Рейнольдса

На сьогодні дослідники турбулентних течій використовують переважно класичний підхід до моделювання зсувної турбулентності, який ґрунтується на ідеї Рейнольдса про усереднення гідродинамічних рівнянь за ансамблем тотожних течій (можливих реалізацій), або за допомогою іншої еквівалентної процедури. Отримані в такий спосіб рівняння масштабу середнього руху, внаслідок нелінійності вихідних гідродинамічних рівнянь, містять невизначені кореляційні члени (типу векторів турбулентної дифузії і тепла, або тензора турбулентних напружень Рейнольдса) і тому виявляються незамкненими. Замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь гідродинаміки суміші зазвичай проводять за допомогою тих чи інших напівемпіричних моделей турбулентності, що ґрунтуються, наприклад, на залученні послідовності диференціальних рівнянь для моментів флуктуацій. Разом з тим, важливо вже тут вказати на принциповий недолік цього підходу, який полягає в тому, що усереднення Рейнольдса здійснюється за усіма просторовими масштабами турбулентності. Тобто моделювання на основі напівемпіричних гіпотез

замикання за необхідності проводиться одночасно по всьому спектру різномасштабних вихрових структур.

Якщо врахувати те, що на відміну від практично універсального спектра дрібномасштабних пульсацій, великомасштабні вихрові структури істотно різні для різних течій (рис. 1), то стає очевидною безперспективність створення універсальних напівемпіричних моделей турбулентності, придатних для опису різнотипних турбулентних течій. З цієї причини завдання полягає головним чином у встановленні меж застосовності тієї чи іншої напівемпіричної моделі турбулентності. Проте є деякі підстави сподіватися, що залучення багатопараметричних апроксимацій, що ґрунтуються на еволюційних рівняннях переносу для старших моментів пульсуючих у потоці термогідродинамічних параметрів, що пульсують у потоці, дасть змогу певною мірою просунути на шляху побудови універсальних моделей турбулентності з ускладненими властивостями, що описують досить велику кількість різноманітних турбулізованих природних середовищ.

Слід зазначити, що наявні на сьогодні дослідження не дозволяють зробити остаточного вибору механізму турбулентної течії, оскільки в експериментах, як правило, присутні риси різних механізмів.

Асп. Сугаль Є.О. асп. Ящук О.О.

Дніпровський державний технічний університет

**РОЗРОБКА СИСТЕМИ МІНІМІЗАЦІЇ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ
АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ В УМОВАХ ЖИВЛЕННЯ
НЕСИМЕТРИЧНОЮ НАПРУГОЮ**

В даний час асинхронний двигун є найбільш поширеним типом електричного приводу у світі і є одним із головних споживачів електричної енергії. У той самий час нормативні показники якості цієї енергії у

промисловості завжди відповідають необхідним, що визначає можливість роботи асинхронних двигунів, наприклад за умов несиметрії джерела живлення. Також виникнення несиметричних режимів роботи трифазних асинхронних двигунів може бути обумовлено і несиметрією опорів в ланцюгах статора або ротора.

Несиметричні режими роботи дуже негативно впливають на робочі показники асинхронних двигунів. При несиметрії напруги в електричних машинах виникають магнітні поля, що обертаються із синхронною швидкістю у напрямку обертання ротора, а й у протилежному напрямі.

В результаті виникає гальмівний електромагнітний момент та коливальна складова електромагнітного моменту з частотою коливання сто герц. Виникає додаткове нагрівання активних частин асинхронних двигунів, насамперед статора з допомогою перевищення фазних струмів номінального значення. При характері несиметрії напруги з одночасним його зниженням навантаження по фазах обмоток асинхронних двигунів розподіляється нерівномірно, що призводить до перегріву обмоток навіть при моментах навантаження значно менших від номінального.

Для забезпечення нормальних умов роботи асинхронних двигунів при живленні від джерела з несиметричною напругою необхідно завищувати номінальну потужність, передбачати спеціальні заходи щодо симетрування напруги джерела живлення або застосовувати інші конструктивні рішення.

У цій роботі було проведено дослідження щодо тривалої роботи асинхронного двигуна на штучних регульовальних характеристиках у галузі номінального ковзання з енергетичними показниками кращими, ніж на робочій ділянці природної механічної характеристики.

Заздалегідь розраховувалася штучна регульовальна характеристика електроприводу, що відповідає режиму мінімізації втрат потужності, з вирішення завдання екстремального управління. В рамках дослідження було виконано математичний опис режимів роботи електроприводу «Тиристорний перетворювач напруги-асинхронний двигун», у яких можливе зменшення втрат

потужності. Також було виконано розробку функціональної схеми системи автоматичної мінімізації втрат потужності.

Поставлена в роботі мета, в умовах живлення електроприводу від джерела з несиметричною напругою, була досягнута за допомогою трьох каналів управління і трьох каналів зворотного зв'язку. Логіка дії зворотного зв'язку полягала у зменшенні вихідної напруги тиристорного перетворювача та струмів двигуна при зменшенні навантаження на валу асинхронного двигуна.

Внаслідок цього з'явилася можливість підтримувати рівність кутів навантаження всіх фаз асинхронного двигуна згідно з оптимальним значенням. Це дозволило вирішити проблему мінімізації втрат потужності асинхронного двигуна за рахунок рівності кутів навантаження оптимального значення та проблему симетрування за рахунок рівності кутів навантаження по фазах двигуна.

При цьому кути вмикання вентилів тиристорного перетворювача напруги принципово не симетричні. Застосування тиристорного перетворювача напруги дало можливість реалізації керованих перехідних пуско-гальмівних режимів.

Найбільш суттєвим результатом роботи є розроблена автоматизована система симетрування, яка ефективна не тільки при несиметрії напруги джерела живлення, але і при несиметрії параметрів самого асинхронного двигуна. Запропонована функціональна схема мікропроцесорного управління та алгоритм управління розширили можливості системи автоматичної мінімізації втрат. Структура і складність алгоритму управління можуть змінюватись в залежності від функціональних можливостей елементів електроприводу.

Таким чином був розроблений метод і алгоритм розрахунку режимів і статичних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, які живляться від трифазної мережі з несиметричною системою напруг. Поставлена мета була досягнута за рахунок розробки методу, де в математичній моделі двигуна враховувалося насичення магнітопроводу та витіснення струму в стрижнях короткозамкнутого ротора.

К. техн. н. Топилко П.І., асп. Данканич А.О.

Національний університет “Львівська політехніка”

ПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗТАШУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Зростання урбанізації створює нові виклики для впровадження відновлюваних джерел енергії в міському середовищі. Зокрема, ефективне використання сонячної енергії у великих містах часто ускладнюється складною геометрією забудови, обмеженою доступністю площини дахів, значним затіненням від висотних будівель, а також необхідністю дотримання технічних вимог до встановлення сонячних панелей. Такі умови формують багатофакторну задачу просторової оптимізації, яка потребує застосування сучасних методів математичного моделювання [1].

Одним з перспективних підходів до вирішення цієї задачі є використання генетичних алгоритмів — методів еволюційного обчислення, які дозволяють здійснювати ефективний пошук у великому та складному просторі можливих рішень [2]. Завдяки імітації механізмів природного добору, схрещування та мутації, генетичні алгоритми здатні знаходити глобальні оптимуми навіть у присутності локальних екстремумів, що часто трапляються в задачах з великою кількістю обмежень.

У даній роботі розглянуто математичну модель оптимального розташування сонячних панелей на дахах міських будівель, яка враховує геометричні та технічні обмеження, вплив навколишньої забудови на інсоляцію, а також взаємне затінення панелей. Основна мета моделі полягає у максимізації загальної ефективності поглинання сонячного випромінювання, що досягається шляхом оптимального вибору координат та орієнтації кожної панелі в межах доступної площі дахів.

Формалізація задачі здійснюється за допомогою векторного подання рішень, де кожна компонента описує просторове положення та орієнтацію окремої панелі. Функція пристосованості, що використовується у генетичному алгоритмі, включає декілька складових: коефіцієнт інсоляції залежно від орієнтації панелі, штрафи за розміщення поза доступною зоною даху, за недотримання мінімальних відстаней між панелями, а також зниження ефективності у разі потрапляння панелі в тінь від інших об'єктів [3].

Для кожної будівлі будується модель її геометрії та орієнтації, а тіньові області розраховуються з урахуванням положення сонця протягом доби та висоти навколишніх споруд. Сонячні панелі моделюються у вигляді прямокутних елементів сталої геометрії, які обертаються та позиціонуються в межах площини даху. У разі часткового перекриття або виходу за межі доступної зони функція пристосованості зменшується відповідно до визначених штрафних коефіцієнтів.

Ініціалізація популяції здійснюється випадковим чином із дотриманням геометричних обмежень. У процесі еволюції застосовуються оператори турнірного відбору, одноточкового схрещування та гаусівської мутації для створення нових поколінь рішень. Критерієм зупинки обрано стабілізацію значення функції пристосованості протягом визначеної кількості поколінь.

Результати числових експериментів демонструють ефективність запропонованого підходу: оптимізовані конфігурації розміщення панелей суттєво перевершують випадкові розташування за критерієм сумарного сонячного потенціалу. Побудовано візуалізації дахів, тіньових зон та розміщення панелей до та після оптимізації, що ілюструє покращення використання доступної площі та зменшення втрат від затінення.

Окрім основного застосування, запропонована модель може бути розширена для використання в умовах динамічної зміни забудови, що притаманна сучасним містам. У таких випадках виникає потреба в

періодичному оновленні параметрів розташування панелей відповідно до нових умов. Крім того, перспективним є поєднання даної моделі з геоінформаційними системами, що дозволить автоматизувати збір даних про висоту будівель, орієнтацію дахів та ступінь затінення, а також підвищити точність розрахунків при проектуванні дахових сонячних електростанцій.

Список використаних джерел

1. Kalogirou, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2nd ed. Oxford : Academic Press, 2013. 840 p.
2. Haupt, R. L., Haupt, S. E. *Practical Genetic Algorithms*. 2nd ed. Hoboken : Wiley-Interscience, 2004. 256 p.
3. Deb, K. *Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples*. New Delhi : PHI Learning Pvt. Ltd., 2012. 300 p.

Асп. Фунтиков М.К., к. техн. н. Мацуга О.М.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ОЗНАК У МЕДИЧНОМУ НАБОРІ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ

Дослідження структури ознак є важливим етапом у процесі аналізу даних та побудови моделей машинного навчання. Під структурою ознак розуміють сукупність статистичних зв'язків, подібностей та функціональних залежностей між змінними, що описують об'єкти дослідження. Їх виявлення дозволяє зменшити надмірність у даних, покращити інтерпретацію результатів і підвищити ефективність подальших етапів аналізу та моделювання.

Одним із підходів до вивчення структури ознак є їх кластеризація. У цій роботі досліджено різні підходи до кластеризації ознак на прикладі реального медичного набору даних, що є результатом офтальмологічного обстеження 400 очей 200 пацієнтів. Після попередньої обробки, що включала видалення нерепрезентативних ознак та ознак з великою кількістю пропусків, для подальшого аналізу було відібрано 140 ознак.

У дослідженні було розглянуто три підходи до кластеризації ознак [1]:

1. Безпосередня кластеризація векторів значень ознак.
2. Кластеризація матриці модулів парних кореляцій між ознаками.

3. Кластеризація ознак за матрицею навантажень, отриманою за допомогою методу головних компонент або факторного аналізу. При цьому застосовувався факторний аналіз як без обертання, так і з варімакс-обертанням.

Для перших двох підходів були використані класичні алгоритми кластеризації – алгоритм k-середніх та ієрархічна кластеризація з різними методами зв'язку: одиночний, повний, середньогруповий та Уорда. Крім того, ці підходи вимагали визначення оптимальної кількості кластерів. Для її оцінювання були використані внутрішні індекси якості кластеризації, зокрема індекси силуету, Девіса–Болдіна, Калінського–Харабаша, Дана, Dunn_diff, CH_diff [2].

Використовуючи перші два підходи, була визначена оптимальна кількість кластерів для кожного методу кластеризації згідно кожного індексу якості. Після цього здійснено кластеризацію ознак на відповідну кількість кластерів. У рамках третього підходу ознаки були розбиті на кількість кластерів, яка визначалася автоматично шляхом аналізу матриці навантажень. Для всіх трьох підходів проведено інтерпретацію отриманих кластерів з метою оцінки змістовності та обґрунтованості виявлених груп ознак. Додатково, для порівняння подібності кластерних розбиттів, отриманих різними методами, були використані зовнішні індекси, зокрема індекс Фаулкса–Меллоуза та скоригований індекс Ренда [2].

Під час безпосередньої кластеризації векторів значень ознак було виявлено, що майже всі внутрішні індекси, незалежно від алгоритму кластеризації, вказували на 2 кластери як оптимальну кількість. Виняток становили індекси Dunn_diff та CH_diff, які не застосовні на розбитті на менш ніж 3 кластери. Наступним кроком стало порівняння розбиттів на 2 кластери,

отриманих різними алгоритмами кластеризації. Обидва зовнішні індекси вказали на їхню повну ідентичність. Отримане розбиття включало такі 2 кластери: перший кластер – 30 ознак з дуже високою попарною кореляцією (0.78 у середньому) та дуже слабким зв'язком з рештою ознак (0.08 у середньому); другий кластер – 110 ознак, серед яких спостерігалася наявність кількох чітко виражених внутрішніх підгруп.

Кластеризація матриці модулів попарних кореляцій надала такі результати. Незалежно від обраного алгоритму кластеризації, майже всі індекси вказували на 3 кластери як оптимальну кількість. Порівняння трьохкластерних розбиттів, отриманих різними методами агломеративної кластеризації, за допомогою зовнішніх індексів вказало на їх ідентичність. Розбиття, сформоване алгоритмом k-середніх, відрізнялося від них лише за однією ознакою. В цілому, усі алгоритми виділили такі кластери: перший кластер – 70 ознак з дуже високою попарною кореляцією (0.78 у середньому) та дуже низькою кореляцією з ознаками інших кластерів (0.08 у середньому); другий кластер – 30 ознак також із високою внутрішньою кореляцією (0.82 у середньому) і низькою зовнішньою (0.08 у середньому), він відрізняється від першого кластеру в попередньому підході лише за двома ознаками; третій кластер – 40 ознак з низькою середньою внутрішньою кореляцією (0.13), хоча 95-й перцентиль усіх внутрішніх кореляцій у кластері дорівнює 0.6. За візуальною оцінкою в третьому кластері були виявлені групи з 2–5 ознак зі значущою попарною кореляцією, що могли б утворити менші кластери. Слід зауважити, що під час кластеризації кореляційної матриці критично важливо свідомо обрати, чи враховувати знак кореляції, оскільки кластеризація за модулями дозволяє виявити групи зі схожою силою зв'язку незалежно від його напрямку, як це зроблено в цій роботі

У межах третього підходу оптимальна кількість кластерів визначалася автоматично. Метод головних компонент виділив 17 кластерів (розмірами 69,

30, 10, 8, 7, 4, 2, та 10 одиничних), факторний аналіз без обертання – 13 кластерів (розмірами 69, 31, 12, 11, 8, 2 та 7 одиничних), а з варімакс-обертанням – 17 кластерів (розмірами 69, 31, 7, 5, 5, 5, 4, 4, 2 та 8 одиничних). Зовнішні індекси вказали на дуже високу схожість між цими розбиттями, незважаючи на різну кількість кластерів. Перші два кластери у кожному розбитті майже ідентичні першим двом кластерам у другому підході. Для всіх трьох розбиттів кластери мають високу внутрішню кореляцію (0.36–0.81) та низьку зовнішню (0.02–0.14). Отже, цей підхід дозволяє виявити кластери різних розмірів, ознаки яких сильно корелюють між собою та слабко – з ознаками з інших кластерів.

У досліджуваному наборі даних виявлено кластери ознак різного розміру: два великі кластери з 70 та 30 ознак та кілька менших розміром по 1–5 ознак. Застосовані індекси якості кластеризації в перших двох підходах не змогли коректно визначити оптимальну кількість кластерів через неоднорідність розмірів груп. Найбільш змістовні та фізично обґрунтовані результати отримані з використанням методу головних компонент і факторного аналізу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на виявлення підходящого індексу для визначення оптимальної кількості кластерів ознак в перших двох підходах.

Список використаних джерел

1. Kuzudisli C., Bakir-Gungor B., Bulut N., Qaqish B., Yousef M. Review of feature selection approaches based on grouping of features. *PeerJ*. 2023.11:e15666. DOI: 10.7717/peerj.15666.
2. Zaki M.J., Meira Jr. W. *Data Mining and Analysis. Fundamental Concepts and Algorithms*. Cambridge University Press, 2014. 593 p.

Здоб. освіти Юр'єв М.В., к. техн. н. Мацуга О.М.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна

МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ТА РОЗТАШУВАННЯ ВУЗЛІВ КУСКОВО-ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ

Кускова регресія (англ. *piecewise regression* або *segmented regression*) є ефективним підходом до моделювання залежностей, форма яких змінюються на різних інтервалах значень незалежної змінної. Значення незалежної змінної, у яких структура зв'язку між змінними істотно змінюється, називаються вузлами (точками зламу). У кусково-лінійній регресії зв'язок між змінними на кожному інтервалі описується лінійною функцією. Це робить модель більш інтерпретованою порівняно з іншими типами нелінійних моделей, такими як поліноміальні чи експоненціальні. Крім того, вона може забезпечувати вищу точність, оскільки здатна адаптуватися до локальних закономірностей без необхідності побудови складних глобальних кривих.

Однак застосування кускової регресії супроводжується серйозною математичною і практичною проблемою – необхідністю визначення кількості вузлів (точок зламу) та їх розташування. Невдалий вибір цих параметрів може призвести до суттєвого погіршення якості моделі. Якщо вузлів занадто мало, модель не відобразить істинної складності процесу, а якщо занадто багато – виникне перенавчання. Неправильно обране положення вузлів може порушити припущення про лінійність всередині сегментів і привести до зміщення оцінок параметрів.

Традиційний підхід до визначення положення вузлів – це пошук по сітці. Його суттєвий недолік – висока обчислювальна складність. За його допомогою можна визначати і кількість вузлів, але зазвичай її задають вручну.

До методів, які дозволяють одночасно знаходити і кількість, і розташування вузлів, відносяться наступні: метод, запропонований Muggeo;

методи, запропоновані Stadnik; метод на основі перестановочного тесту (permutation test); байєсівські методи MCMC та RJMCMC; метод на основі техніки LASSO, який зводить задачу пошуку вузлів до задачі вибору змінних, в рамках якої відновлюється регресія з l_1 регуляризацією; метод PELT. В останні роки для визначення вузлів кускової регресії почали застосовувати методи машинного навчання, зокрема дерева рішень, алгоритм k-середніх та методи навчання з підкріплення.

Як попередній крок для виявлення потенційних точок, що можуть відповідати вузлам кускової регресії, можна використовувати алгоритм CUSUM, тести Чоу або Петтітт. Вони орієнтовані на виявлення одного вузла, але можуть бути застосовані ітераційно для знаходження кількох точок зміни.

Варто зауважити, що деякі з перелічених методів (PELT, алгоритм CUSUM, тест Петтітт) запропоновані для задачі виявлення точок розладнання в часових рядах, але враховуючи спільні риси обох задач, можуть бути розглянуті і для задачі ідентифікації вузлів кускової регресії.

З метою проаналізувати і порівняти роботу окремих методів визначення кількості і розташування вузлів кусково-лінійної регресії, в роботі було розроблено програмне забезпечення мовою C# у середовищі Visual Studio. Застосунок дозволяє оцінювати кусково-лінійну регресію, автоматично визначаючи кількість і розташування вузлів за допомогою таких алгоритмів:

- SLRAuto – власна розробка, яка поєднує алгоритм додавання вузлів для максимального приросту якості апроксимації з процедурою оптимізації їх кількості на основі скоригованого коефіцієнта детермінації; результат роботи алгоритму представлено на рисунку 1;

- SLRThorough-Stadnik та SLRFast-Stadnik – алгоритми з роботи [1];

- SLRPermutation – реалізація алгоритму з роботи [2].

Застосунок має зручний графічний інтерфейс, який забезпечує наочне відображення результатів: графік із апроксимованою регресією та довірчими

інтервалами, а також таблиці із оціненими параметрами регресії, вузлами та метриками якості моделі (R^2 , RMSE).

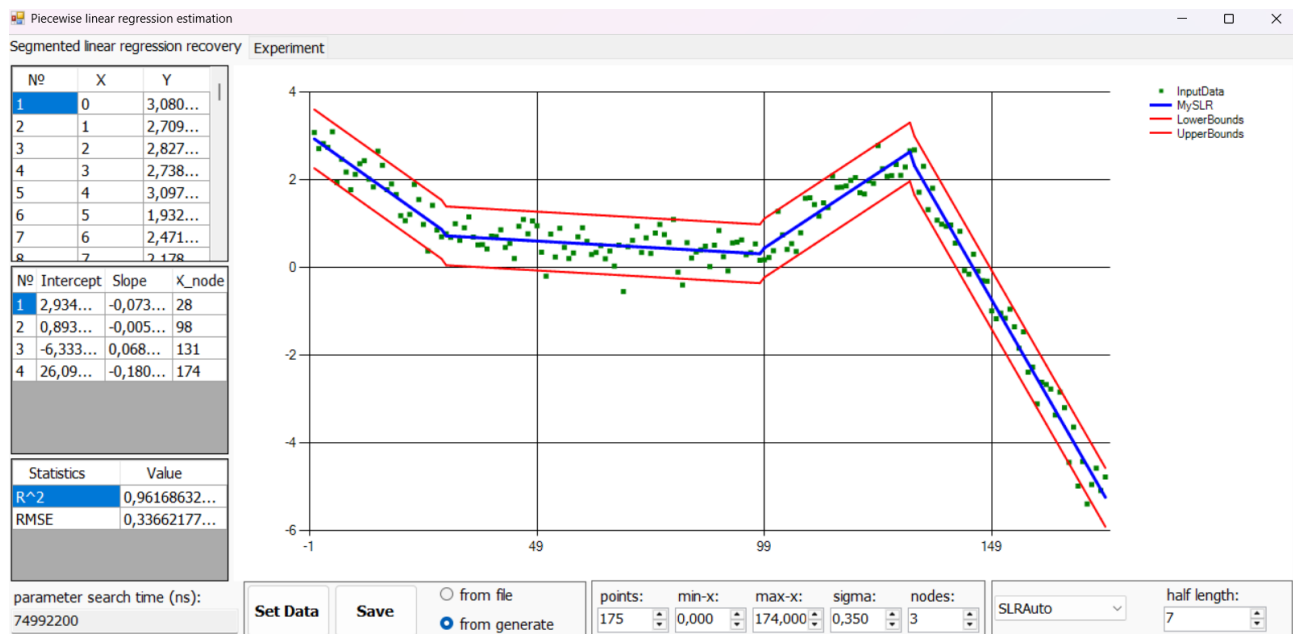


Рис. 1. Результат апроксимації алгоритмом SLRAuto кусково-лінійної регресії з трьома вузлами з параметрами $A_1=3$, $B_1=-0.08$, $B_2=-0.005$, $B_3=0.08$, $B_4=-0.18$, $v_1=29$, $v_2=100$, $v_3=130$

Аналіз роботи реалізованих підходів показав, що алгоритм SLRAuto є ефективним у виявленні трендових змін, але має схильність до переоцінки кількості вузлів у присутності шуму, що вказує на необхідність покращення критерію оптимізації. Алгоритми SLRThorough-Stadnik та SLRFast-Stadnik демонструють хорошу продуктивність, але відчутно залежать від обраного порогового значення похибки та ширини вікна згладжування, що впливає на якість результатів. Алгоритм SLRPermutation є надійним у статистичному сенсі, однак має високу обчислювальну складність та потребує задання максимальної кількості вузлів заздалегідь, що обмежує його гнучкість.

У підсумку було проведено огляд і порівняння методів кусково-лінійної регресії, розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє зручно тестувати різні підходи, та проводити порівняльний аналіз їхньої ефективності, що створює основу для подальших досліджень та вдосконалення підходів для кускової апроксимації даних.

Список використаних джерел

1. Stadnik V. Segmented Linear Regression. URL: <https://www.codeproject.com/Articles/5282014/Segmented-Linear-%20Regression#segmented> (дата звернення: 12.05.2025).
2. Kim H. J., Fay M. P., Feuer E. J., Midthune D. N. Permutation tests for joinpoint regression with applications to cancer rates. *Statistics in medicine*. 2000. Vol. 19(3). P. 335–351. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0258\(20000215\)19:3<335::aid-sim336>3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0258(20000215)19:3<335::aid-sim336>3.0.co;2-z)

К. техн. н. Ялова К.М., асп. Ісмаїлов В.В.

Дніпровський державний технічний університет

АНАЛІЗ АДРЕСНИХ ДАНИХ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ НЕЧІТКОГО СПІВСТАВЛЕННЯ

Існування проблеми уніфікації та нормалізації значень у базах даних є типовою ситуацією для багатьох організацій, які працюють з великими обсягами інформації, що накопичувалась упродовж тривалого часу. Особливо гостро ця проблема постає в інформаційних системах, де відсутня єдина форма зберігання інформації та відбувається ручне введення даних без перевірки або обмежень, що призводить до неоднозначностей і ускладнює подальшу обробку. При роботі з адресними даними кожна частина адреси (область, район, населений пункт, вулиця, номер будівлі) може бути подана в різний спосіб або вміщена в одне поле, що ускладнює не лише пошук та сортування інформації, але й впливає на подальший аналіз, обробку та інтеграцію з іншими системами. Пошук ефективних підходів до виявлення варіацій, альтернативних представлень, дублювання та помилок введення залишається актуальним як у теоретичному, так і практичному аспектах.

Аналіз адресних даних в умовах невизначеності потребує застосування алгоритмів і підходів, які здатні враховувати синтаксичні відмінності, орфографічні помилки, перестановки слів, граматичні варіації, обробляти відмінювання слів та мають акцент на малі фрагменти тексту. Ефективним

інструментом для таких завдань є алгоритми нечіткого співставлення рядів даних – (АНСР – fuzzy string matching або approximate string matching), які дозволяють порівнювати текстові значення з урахуванням їх подібності, а не лише точного збігу. Основними класами АНСР є:

1. Алгоритми на основі відстані редагування (Edit distance), які обчислюють мінімальну кількість операцій, що знадобляться для перетворення одного рядка в інший. До прикладу, відстань Левенштейна (Levenshtein distance) та відстань Дамерау-Левенштейна (Damerau-Levenshtein distance).

2. Алгоритми символного порівняння, які оцінюють подібність рядків, враховуючи кількість спільних символів чи збігів, наприклад: метрики Джаро (Jaro distance) та Джаро-Вінклера (Jaro-Winkler distance).

В контексті завдання аналізу адресних даних, коли вхідні рядки можуть виглядати як:

- м. Київ, вул. Лесі Українки, 25
- Київ, Лесі Українки 25
- м. Київ, Українки Лесі вулиця, б. 25

традиційні методи порівняння покажуть відмінність, тоді як нечіткі алгоритми виявлять схожість між цими записами. Одними з найефективніших алгоритмів у такому контексті є Jaro-Winkler та Damerau-Levenshtein.

Damerau-Levenshtein вимірює мінімальну кількість редагувань, потрібну для перетворення вхідного рядка $s=s_1, \dots, s_m$ до вхідного рядка $t=t_1, \dots, t_n$, включаючи чотири типи операцій: вставка, видалення, заміна та транспозиція (обмін місцями сусідніх символів). Рекурсивне визначення Damerau-Levenshtein здійснюється як:

$$d(i, j) = \min \begin{cases} d(i-1, j) + 1 \\ d(i, j-1) + 1 \\ d(i-1, j-1) + cost \\ d(i-2, j-2) + 1 \end{cases} \quad (1)$$

де $d(i,j)$ – мінімальна вартість перетворення перших i символів рядка s у перші j символів рядка t , $cost$ – це умовна вартість операції заміни символу, яка використовується для визначення чи потрібно виконувати заміну символу при співставленні.

Вихідними даними є відстань між рядками, представлена значенням мінімальною кількістю редагування. Перевагою Damerau-Levenshtein є здатність точно враховувати локальні орфографічні помилки та перестановки символів, що робить його особливо корисним у випадках, коли відбувається спотворення даних на рівні окремих букв. Проте Damerau-Levenshtein нечутливий до граматичного порядку слів і морфологічних варіацій, що знижує його ефективність при порівнянні граматично правильних, але синтаксично різних форм, наприклад: «Лесі Українки» та «Українки Лесі».

Алгоритм Jaro-Winkler враховує кількість спільних символів, їх порядок та довжину загального префіксу для двох вхідних рядків $s=s_1,\dots,s_m$ та $t=t_1,\dots,t_n$. Він є особливо ефективним у випадку обробки адрес із скороченнями на кшталт «пр-т Лесі Українки» та «проспект Лесі Українки». Результуючими даними алгоритму є коефіцієнт подібності – десяткове число від 0 до 1, яке демонструє наскільки s є подібним до t . Математично Jaro-Winkler визначається як:

$$JW = J + (l \cdot p \cdot (1 - J)), \quad (2)$$

де l – довжина загального префіксу на початку рядка максимальне значення якого до 4 символів, тобто якщо рядок починається однаково, то збільшується вихідне значення, p – вага префіксу, J – метрика Jaro, яка визначається як:

$$J = \frac{1}{3} \left(\frac{m}{|s_1|} + \frac{m}{|s_2|} + \frac{m-t}{m} \right), \quad (3)$$

де s_1, s_2 – це рядки значень, $|s_1|, |s_2|$ – довжина відповідного рядка, m – кількість співпадінь символів, t – кількість транспозицій, коли символи містяться в рядках, але розміщені в різному порядку.

Слабкою стороною Jaro-Winkler distance є його низька стійкість до перестановки слів і сильна залежність від порядку символів. Проте в задачах, де пріоритетом є швидкий відбір потенційно збіжних рядків, алгоритм виявляється досить продуктивним і ефективним з точки зору обчислювальних ресурсів.

Алгоритми нечіткого співставлення є потужним інструментом аналізу текстових даних в умовах невизначеності. Вони дозволяють суттєво підвищити якість порівняння адресних записів, уникаючи проблем дублювання, неоднозначності та помилок введення. Поєднання кількох алгоритмів дозволяє досягати кращої точності у складних завданнях нормалізації адресної інформації.

К. техн. н. Ялова К.М., асп. Шелюг К.Ю.

Дніпровський державний технічний університет

ВИРІВНЮВАННЯ МОВНИХ СИГНАЛІВ ЗАСОБАМИ АЛГОРИТМУ ДИНАМІЧНОГО ТРАНСФОРМУВАННЯ ЧАСУ

Під розпізнанням мовлення розуміють процес трансформації мовленнєвого сигналу в цифрову інформацію. Загальна схема процесу розпізнавання мовленнєвого сигналу наступна: отримання акустичного сигналу, який надходить з мікрофону користувача, оцифрування звукового сигналу, виділення його характеристик та порівняння вектору ознак вхідного сигналу з шаблонами. У процесі розпізнавання мовлення найскладнішим завданням є

виконання процедури порівняння двох мовних елементів, які можуть мати різну довжину або відрізнятися за часом.

Алгоритм динамічного трасформування часу (Dynamic Time Warping, DTW) – це алгоритм визначення оптимальної послідовності трансформацій (вирівнювань) часу між двома часовими рядами шляхом обчислень значень деформації між ними. У задачі розпізнавання мовлення DTW забезпечує можливість знайти оптимальне вирівнювання між еталонним та вхідним мовленнєвим сигналом, незважаючи на відмінності у швидкості вимови диктора. Вхідними даними для алгоритму слугують дві числові послідовності. Алгоритм DTW передбачає виконання таких кроків:

1. Обчислення матриці відстаней.
2. Обчислення значень матриці кумулятивної вартості.
3. Визначення оптимального шляху в заданій матриці, розрахованого у зворотному порядку.

Алгоритм DTW демонструє високу ефективність у задачах шаблонного розпізнавання слів або фраз і працює без попереднього навчання моделей, що робить його придатним для невеликих систем автоматичного розпізнавання мовлення з обмеженою кількістю еталонних даних. Попри високу обчислювальну складність $O(N \times M)$, основними перевагами використання DTW є стійкість до варіацій у швидкості мовлення та простота його реалізації.

Секція 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ТЕХНІЧНИХ НАУКАХ

К. техн. н. Авер'янов В.С., здоб. освіти Шрам Є.С.

Дніпровський державний технічний університет

МОДЕЛЬ РАЦІОНАЛЬНОГО ВАРІАНТУ АВТОБУСНОЇ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖІ

Для моделювання раціонального варіанту маршрутної мережі необхідно мати повні дані про пасажиропотоки між окремими транспортними районами міста. Маршрутна мережа повинна відповідати пасажиропотокам як по величині, так і по напрямам. Також при проектуванні маршрутної мережі можуть враховуватися задані обмеження: в систему маршрутів включені раніше задані маршрути; довжина маршруту знаходиться в певних межах, обсяг перевезень на кожному маршруті не менш заданого; відсутність кінцевих пунктів у мікрорайонах де вони заперечені.

Моделюють маршрутні мережі методом порівняння варіантів по різним техніко-економічним критеріям оптимізації. Порівняння декількох варіантів маршрутної мережі відтворюється на підставі розрахунку сумарних витрат часу на очікування, поїздки і пересадки.

У процесі рішення поставленої задачі необхідно мінімізувати функціонал

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (t_{ij} + t_{n_{ij}}) \cdot \Pi_{ij} + \sum_{k=1}^K t_{o_k} \cdot \Pi_k + \\ + \sum_{l=1}^L t_{o_l} \cdot \Pi_l + \sum_{p=1}^s t_{x_p} \cdot \Pi_p \rightarrow \min , \quad (1)$$

де i – кількість пунктів початку пересування; j – кількість пунктів закінчення пересування; n – кількість мікрорайонів; k – кількість автобусних

маршрутів; L – кількість сумісних ділянок маршрутної мережі; t_{ij} і $t_{n_{ij}}$ – витрати часу на поїздку і пересадку одного пасажера між мікрорайонами i і j , год; P_{ij} – кількість пересувань між пунктами i і j ; t_{o_k} – час очікування автобуса пасажиром при поїзді по маршруту k , год; P_k – кількість пасажирів, які користуються тільки маршрутом k , пас; t_{o_1} – час очікування автобуса пасажиром при поїзді в межах сумісної ділянки l , год; P_l – кількість пасажирів, що проїжджають у межах сумісної ділянки l , пас; t_{x_p} – витрати часу на підхід до найближчої зупинки автобусної мережі від найбільш видаленого району S , год; P_p – кількість пасажирів, які проживають у районі S , який не обслуговується автобусами, пас.

Час на поїздку пасажера між мікрорайонами визначається по формулі

$$t_{ij} = \frac{l_{ij}}{V_c}, \quad (2)$$

де l_{ij} – довжина поїздки між мікрорайонами i і j , км; V_c – середня швидкість сполучення, км/год.

Час на пересадку пасажера в транспортному вузлі визначається по формулі

$$t_{n_{ij}} = \frac{L_{\text{підх}}^{\text{пер}}}{v_{\text{піш}}} + t_{\text{оч}}, \quad (3)$$

де $L_{\text{під}}^{\text{пер}}$ – відстань переходу від одного зупиночного пункту до іншого, $L_{\text{підх}}^{\text{пер}} = 0,5$ км; $v_{\text{піш}}$ – середня швидкість пішоходу, $v_{\text{піш}} = 4$ км/год; $t_{\text{оч}}$ – час очікування транспорту, год.

Теоретично час очікування автобуса дорівнює 0,6 інтервалу мережі руху автобусів і визначається по формулі.

$$t_{\text{оч}} \approx 0,6I_m, \quad (4)$$

де I_m – мережевий інтервал, хв.

$$I_M = \frac{2 \cdot 60 \cdot L_{MM}}{v_e \cdot A_M}, \quad (5)$$

де L_{MM} – відстань маршрутної мережі міста, км; v_e – експлуатаційна швидкість руху, км/год; A_M – кількість автобусів, працюючих на маршруті, од.

Витрати часу одного пасажирів на пересадку включають час на підхід до зупиночного пункту пересадки і час очікування транспорту.

При розрахунку другого члену функціоналу враховується, що пасажирів користуються маршрутом лише у випадку, коли він поєднує пункти відправлень і призначення по найкоротшій відстані. В іншому випадку виникає вірогідність поїздки пасажирів з пересадками по іншим маршрутам. Середній інтервал руху на сумісній ділянці маршрутної мережі, по котрій проходять одночасно декілька маршрутів, можна визначити по формулі

$$I_1 = \frac{1}{\sum_{k=1}^m \frac{1}{I_k}}, \quad (6)$$

де m – кількість маршрутів, які проходять на сумісній ділянці l .

Для розрахунку першої складової математичної моделі (1) необхідно визначити витрати часу на поїздку між пунктами маршрутної мережі за найкоротшою відстанню і кількістю пересаджень. Витрати часу на поїздку визначаються як сума часу поїздки по кожній окремій ділянці між відповідними пунктами, після чого розраховується час на пересадку пасажирів в транспортному вузлі і час очікування транспорту по формулам (3) і (4).

Список використаних джерел

1. Шматко Д.З., Коробочка О.М., Авер'янов В.С. Вдосконалення та організація транспортної мережі автобусних міських перевезень. Наукове видання. – Кам'янське: ДДТУ, 2018. – 155 с.
2. Босняк М.Г. Пасажирські автомобільні перевезення. Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім „Слово”, 2013. – 386 с.
3. Олісевич М.І. Організація автомобільних перевезень. Частина 1. Пасажирські перевезення. – Львів: Львівська політехніка, 2017. – 336 с.

К. техн. н. Бейгул В.О., к. техн. н. Часов Д.П.,

здоб. освіти Лінник М.С.

Дніпровський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДУ КАЛІБРУВАННЯ КРУГОВИХ ШПАНГОУТІВ ТА ЦИЛІНДРОВИХ ОБОЛОНОК

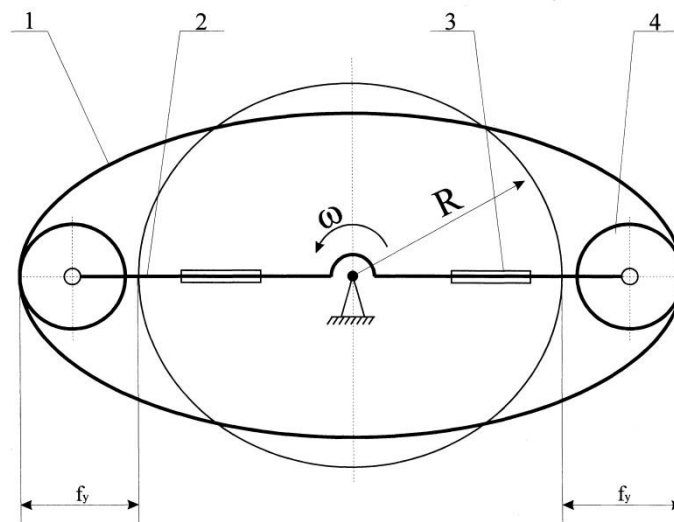
Задача зводиться до визначення граничних пружних прогинань f_y . Використовуючи положення напівбезмоментної теорії розрахунку оболонок, розглянемо частину оболонки, виділену двома суміжними перетинами, навантажену силами P в діаметрально протилежних точках, рис. 2. Відстань між суміжними перетинами приймається порівняно з шириною роликів для розкочування. В точках прикладення сил діють максимальні згинаючі моменти:

$$M_{\max} = \frac{PD}{2\pi} \quad (1)$$

де M_{\max} – максимальний згинаючий момент, Н·м;

P – сила, Н;

D – діаметр оболонки, м.



1 – оболонка; 2 – штанга; 3 – пристрій для розведення роликів; 4 – ролик.

Рис. 1. Схема калібрування оболонки обкатування роликами

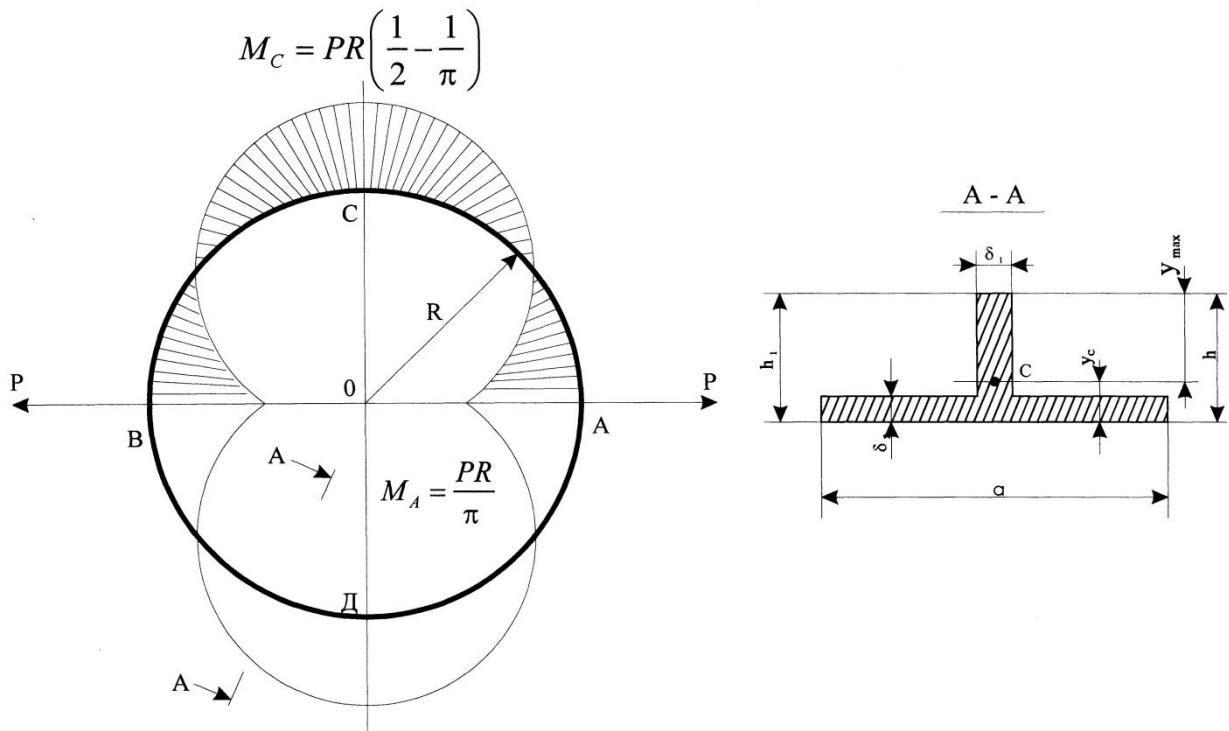


Рис. 2. Схема навантаження оболонки при калібруванні

На базі формули (1) можна записати:

$$\frac{P_y D}{2\pi} = \sigma_y W_u, \quad (2)$$

де P_y – сила, що викликає максимальне чисто пружне прогинання, Н;

σ_y – межа пружності, Па;

W_u – момент опору вигину поперечного перетину виділеної частини оболонки, м³.

Звідки отримуємо:

$$P_y = \frac{2\pi\sigma_y W_u}{D}. \quad (3)$$

З іншого боку, формула:

$$f_y = \frac{P_y D^3}{16EJ_u} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right), \quad (4)$$

де J_u – момент інерції поперечного перетину виділеної частини оболонки, м⁴;

E – модуль пружності першого роду, Па.

Підставляючи (3) в (4), отримуємо:

$$f_y = \frac{\pi \sigma_y D^2}{8 E y_{\max}} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right), \quad (5)$$

де

$$y_{\max} = h_1 + \delta_2 - y_c, \quad (6)$$

$$y_c = \left[\delta_1 h_1 \left(\frac{h_1}{2} + \delta_2 \right) + \frac{a \delta_2^2}{2} \right] / (\delta_1 h_1 + a \delta_2). \quad (7)$$

Формула (5) у приведенному вигляді застосовна до розрахунку шпангоутів; щоб застосувати її до оболонок, достатньо врахувати ефект плоскої деформації і товщину оболонок h :

$$f_y = \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{\pi \sigma_y D^2}{8 y_{\max}} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right), \quad (8)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона;

h – товщина оболонки, м.

Розглянемо приклад при наступних вихідних даних: матеріал АМГ-6, $\nu = 0,3$; $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа; $\sigma_y = 150$ МПа; $D = 4$ м; $\delta_1 = 6 \cdot 10^{-3}$ м; $h_1 = 32 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_2 = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $a = 157 \cdot 10^{-3}$ м.

$$y_c = \left[6 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 10^{-3} \left(\frac{32 \cdot 10^{-3}}{2} + 10 \cdot 10^{-3} \right) + \frac{157 \cdot 10^{-3} \cdot (10 \cdot 10^{-3})}{2} \right]:$$

$$: (6 \cdot 10^{-3} \cdot 32 \cdot 10^{-3} + 157 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}) = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$y_{\max} = 32 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3} - 7,3 \cdot 10^{-3} = 34,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$f_y = \frac{1 - 0,3^2}{0,7 \cdot 10^5 \cdot 10^5} \cdot \frac{3,14 \cdot 150 \cdot 10^6 \cdot 4^2}{8 \cdot 34,7 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{3,14}{4} - \frac{2}{3,14} \right) = 53 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 53 \text{ мм.}$$

Таким чином, одержано математичне обґрунтування нового методу калібрування шпангоутів і циліндрових оболонок; метод простий і універсальний, не вимагає застосування дорогого устаткування, складного оснащення. Особливо слід зазначити, що при калібруванні зовнішня поверхня оболонок не ушкоджується, зберігає ідеальну форму.

Асп. Вєсков Є. В.¹, академік НАНУ, д.ф.-м.н., проф. Довгий С. О.²,
д.ф.-м.н., ст. наук. співр. Редчиць Д. О.³

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

²Інститут прикладних систем управління Національної академії наук

³Інститут транспортних систем і технологій

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЧИСЕЛЬНИХ СХЕМ АПРОКСИМАЦІЇ КОНВЕКТИВНИХ ЧЛЕНІВ В OpenFOAM

У роботі моделюється обтікання двовимірного кругового циліндра ламінарним потоком нестисливої рідини при числі Рейнольдса $Re=200$ за допомогою програмного забезпечення з відкритим кодом OpenFOAM. Для чисельного моделювання нестационарної течії нестисливої рідини використовується розв'язувач *pimpleFoam*, який входить до складу OpenFOAM. *pimpleFoam* забезпечує зв'язок між тиском та швидкістю за допомогою алгоритму PIMPLE (об'єднаний цикл PISO-SIMPLE) [8]. Крок за часом є адаптивний. Для обчислення миттєвих значень аеродинамічних коефіцієнтів використовується функціональний об'єкт *forceCoeffs* [8]. Число Струхала обчислюється за частотним спектром коливання підйомної сили за допомогою дискретного перетворення Фур'є.

У цьому дослідженні розглядається, як різні схеми дискретизації конвективних членів впливають на точність обчислень для нестисливої течії навколо кругового циліндра. Зокрема, розглядаються схеми апроксимації конвективних членів, реалізовані в OpenFOAM: *linearUpwind*, *linearUpwindV*, *linearLimited*, *linearLimitedV*, *cubic*, *limitedCubic*, *limitedCubicV* [6], [8], [10], [11]. *linearUpwind* – схема другого порядку точності, але вона необмежена, тобто потенційно може створювати нефізичні коливання [6], [11].

Схема *linearLimited* – це схема першого/другого порядку. Зазвичай вона включає функцію обмежувача, яка поєднує схему проти потоку (першого

порядку, обмежена) та центрально-різницеву схему (другого порядку, необмежена) на основі коефіцієнта потоку. Коефіцієнт потоку має значення між 0 і 1 та контролює ступінь обмеження, причому більші значення сприяють обмеженості, а менші значення збільшують точність [8], [10].

Схема *cubic* має точність третього порядку. Однак, як і інші схеми вищого порядку, кубічна, як правило, необмежена і може бути схильна до осциляцій, особливо в областях з різкими градієнтами фізичних величин [3], [10].

Схема *cubicLimited* – схема третього порядку точності з обмежувачем потоку, який робить схему монотонною. Також можна контролювати ступінь обмеження аналогічно схемі *linearLimited* [8].

Схеми *linearUpwindV*, *linearLimitedV*, *cubicLimitedV* є спеціалізованими версіями, розробленими для розрахунку векторних полів. Вони застосовують єдиний обмежувач потоку до всіх компонентів вектора, який обчислюється на основі напрямку найбільш швидкої зміни градієнту [4].

Необмежені (немонотонні) схеми можна зробити монотонними, якщо в розрахунках використовувати обмежувачі градієнтів [4]. Для всіх протестованих схем апроксимації конвективних членів використовують обмежувач градієнту, запропонований в [1].

Таблиця 1. Результати розрахунку обтікання циліндру нестисливою в'язкою рідиною при $Re = 200$ для різних схем апроксимації конвективних членів в OpenFOAM

Advective scheme	C_D	C_L	St
linearUpwind	1,33	0,42	0,195
linearUpwindV	1,31	0,41	0,195
limitedLinear	1,28	0,36	0,19
limitedLinear 0.5	1,28	0,36	0,19
limitedLinearV	1,31	0,4	0,195
cubic	1,32	0,42	0,195
limitedCubic	1,32	0,42	0,1925
limitedCubicV	1,32	0,42	0,1925

Таблиця 2. Результати експериментальних досліджень та чисельного моделювання обтікання циліндру нестисливою в'язкою рідиною при $Re = 200$

Література	C_D	C_L	St
[8] Norberg, C. (2003) ^(E)	—	$\pm 0,45$	0,19
[14] Williamson, C. H. K. (1989) ^(E)	—	—	0,197
[2] Choi et al. (2007) ^(N)	1,36	$\pm 0,64$	—
[5] Guerrero (2009) ^(N)	1,408	$\pm 0,725$	—
[10] Posdziech and Grundmann (2007)	1,32	$\pm 0,66$	0,195

З результатів розрахунків та експериментальних даних видно, що всі протестовані схеми апроксимації конвективних членів при використанні з обмеженням градієнтів придатні для розрахунку течій з вихроутворенням. Схема *limitedLinear* має схемну в'язкість, вищу ніж у інших схемах, але використання векторних обмежувачів потоку її суттєво знижує. Тому доцільно використання чисельних схем з векторними обмежувачами для розрахунку течій із значною зміною швидкості в різних координатних напрямках.

Список використаних джерел

1. Barth T., Jespersen D C. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes // AIAA Paper. 2012. AIAA-89-0366.
2. Choi J., Oberoi R., Edwards J., Rosati J. An immersed boundary method for complex incompressible flows // Journal of Computational Physics, 2007. Vol. 224. p.757-784.
3. Ferziger J H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3 ed. Heidelberg: Springer, 2002. 431 p. ISBN 3-540-42074-6.
4. Greenshields C., Weller H. Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles. Reading, UK : CFD Direct Ltd, 2022.
5. Guerrero J. Numerical Simulation of the unsteady aerodynamics of flapping flight: PhD Thesis. University of Genoa, 2009. 239 с.
6. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics An Advanced Introduction with Open-FOAM and Matlab. Heidelberg: Springer, 2016. Vol. 113 of Fluid Mechanics and Its Applications. 791 p. ISSN 2215-0056.
7. Norberg, C. Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements // Journal of Fluids and Structures, 2003. Vol. 17. #1. p. 57-96.
8. OpenFOAM 2406. 2024. URL: <https://www.openfoam.com/documentation>. (дата звернення: 17.05.2025)
9. Posdziech, O., Grundmann, R., 2007. A systematic approach to the numerical calculation of fundamental quantities of the two-dimensional flow over a circular cylinder // Journal of Fluids and Structures. Vol. 23. #3. p. 479–499.
10. Verma S. A Large eddy simulation study of the effects of wind and slope on the structure of a turbulent line fire : Ph.D. thesis ; Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, 2019. URL: <https://drum.lib.umd.edu/items/02fc3fbd-daa5-4cf0-8ad4-292a9135ca05>, (дата звернення: 17.05.2025). 210 p.

11. Warming R. F. Beam M. (1976). Upwind Second-Order Difference Schemes and Applications in Aerodynamic Flows // AIAA Journal. Vol. 14. # 9. p. 1241–1249.
12. Williamson C.H.K Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers // J. Fluid Mech, 1989. Vol. 206. p. 579-.627.

Ст. викладач Волошин Р.В., викладач Турко М.Ю.*

Дніпровський державний технічний університет,

Відокремлений структурний підрозділ «Техніко-економічний фаховий коледж

*Дніпровського державного технічного університету»**

РОЗРАХУНОК ТРИВАЛОСТІ ПЛАВЛЕННЯ РОЗКИСЛЮВАЧІВ В ОБ'ЄМІ РОЗПЛАВУ І НА МЕЖІ ШЛАК-МЕТАЛ

Одним зі шляхів підвищення ступеня засвоєння алюмінію до 80% є застосування його сплавів із залізом. Вміст заліза в таких матеріалах зазвичай становить 50-90%, а густина їх підвищується до 5,5 - 6,8 т/м³. В роботі проведено розрахунки тривалості плавлення злитків в об'ємі розплаву і на межі шлак-метал із вмістом алюмінію, що не перевищує 18-40%. Рівняння теплопровідності для трьох фаз легкоплавкого циліндра (твердої, двофазної, рідкої):

$$C_{ef} \rho \frac{\partial T(r, \varphi, \tau)}{\partial \tau} = \left[\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left[\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right], \quad 0 < r < R_0, \quad 0 < \varphi < \pi, \quad (1)$$

де C_{ef} - ефективна теплоємність, щільність і теплопровідність визначаються у вигляді:

$$C_{ef} = \begin{cases} c_{жс}(t), T \geq t_L^T \\ c_{мс}(t) + Q_{мс} \frac{d\psi(t)}{dt}, t_S^T < T < t_L^T, \rho = \begin{cases} \rho_{жс}(t), T \geq t_L^T \\ (\rho_{мс}(t) + \rho_{жс}(t))/2, t_S^T < T < t_L^T \\ \rho_{мс}(t), T \leq t_S^T \end{cases} \\ c_{мс}(t), T \leq t_S^T \end{cases}$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{жс}(t), T \geq t_L^T \\ (\lambda_{жс}(t) + \lambda_{мс}(t))/2, t_S^T < T < t_L^T \\ \lambda_{мс}(t), T \leq t_S^T \end{cases} \quad (2)$$

На осі симетрії поперечного перерізу циліндра тепловий потік дорівнює нулю. $\frac{\partial t(0, \varphi, \tau)}{\partial r} = 0$. На поверхні циліндра, розташованій у шлаковому розплаві ($0 < \varphi < \varphi_h$), відбувається конвективний теплообмін з рідким шлаком із коефіцієнтом $\alpha_{ш}$ тепловіддачі. На поверхні циліндра, розташованій у розплаві сталі ($\varphi_{ш} < \varphi < \pi$), відбувається конвективний теплообмін з рідким розплавом із коефіцієнтом тепловіддачі α_m . Розподіл температур у затверділій оболонці металу має вигляд:

$$C_m \rho_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \lambda_m r \frac{\partial T_m}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_m}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial \varphi} \right], \quad r > R_0, \quad \varphi_{ш} < \varphi < \pi \quad (3)$$

Умова руху межі плавлення для точки P_m , яка належить межі плавлення затверділої оболонки металу, має вигляд:

$$\alpha_m (t_m(r, \varphi, \tau) - t_{nl}^m) - \lambda \frac{\partial t_m(P_m)}{\partial \bar{n}} = -\rho_m Q_m W(P_m); \quad t(P_m) = t_{nl}^m \quad (4)$$

Розподіл температур у затверділій оболонці шлаку описується аналогічним рівнянням теплопровідності:

$$C_u \rho_u \frac{\partial T_u}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \lambda_u r \frac{\partial T_u}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_u}{r} \frac{\partial T_u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial \varphi} \right], \quad r > R_0, \quad 0 < \varphi < \varphi_{ш} \quad (5)$$

Умова руху межі плавлення для точки P_h , яка належить межі плавлення затверділої оболонки шлаку, має вигляд:

$$\alpha_u (t_u(r, \varphi, \tau) - t_{nl}^u) - \lambda_u \frac{\partial t_u(P_u)}{\partial \bar{n}} = -\rho_u Q_u W(P_u), \quad t(P_{ш}) = t_{nl}^u \quad (6)$$

На нижній поверхні циліндра ($\varphi_0 < \varphi < \pi$) відбувається конвективний теплообмін з рідким металом із заданим коефіцієнтом тепловіддачі α_m :

$$\alpha_m [t_m - T(R_0, \varphi, \tau)] = -\lambda \frac{\partial T(R_0, \varphi, \tau)}{\partial \bar{n}}, \quad (\varphi_0 < \varphi < \pi) \quad (7)$$

На верхній поверхні циліндра ($0 < \varphi < \varphi_0$) відбувається конвективний теплообмін з рідким шлаком із заданим коефіцієнтом тепловіддачі α_h :

$$\alpha_h [t_h - T(R_0, \varphi, \tau)] = -\lambda \frac{\partial T(R_0, \varphi, \tau)}{\partial \bar{n}}, \quad (0 < \varphi < \varphi_0) \quad (8)$$

За початкову умову вибирається розподіл температур у циліндрі в момент спливання його на поверхню шлак-метал. Розглянемо варіанти розрахунків плавлення розкислювачів з 18-40% алюмінію (Рисунок 1). Результати розрахунків подано в Таблиці 1.

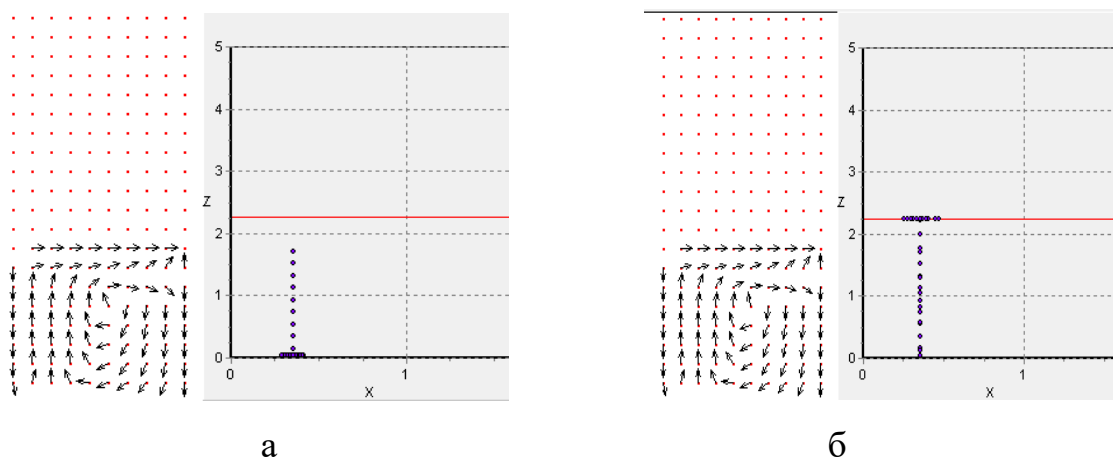


Рис. 1. Плавлення та траєкторія руху розкислювача в розплаві металу: а) вміст алюмінію 18%, б) вміст алюмінію 40%

Таблиця 1. Результати розрахунків тривалості плавлення розкислювачів в об'ємі розплаву і на межі шлак-метал (вміст алюмінію 18-40%)

Вміст Al (%)	Час перебування розкислювача в розплаві (с)	Щільність розкислювача в момент спливання на межі шлак-метал. (г/см ³)	Розмір шлакової кірки на момент спливання розкислювача на межі шлак-метал (мм)	Час плавлення розкислювача в шлаку (с)
18	6,6	6498	0,78	7,2
23	4,9	6590	0,7	14,8
28	3,0	6414	0,63	13,5
33	2,1	6233	0,55	13,6
38	1,6	5587	0,48	12,3

З результатів розрахунку видно, що з підвищенням процентного вмісту алюмінію злиток швидше спливає на поверхню шлак-метал. При цьому

тривалість подальшого розплавлення злитка збільшується. Встановлено технічну можливість та економічну доцільність заміни вторинного алюмінію залізоалюмінієвими сплавами. Економічна ефективність застосування сплаву з базовим вмістом алюмінію складає до 40%

Здоб. освіти Глазунова О.Е., к. техн. н. Клімов Р.О.

Дніпровський державний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЧАСТКОВО ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

В останні роки теплопостачання міст здійснюється від ТЕЦ та квартальних котелень, спалюючи в них природний газ. Однак, такий спосіб викликає значних перевитрат палива у всій системі. Шляхом вирішення цієї актуальної проблеми сьогодення є використання міні-ТЕЦ, які як правило базуються на газотурбінних або газопоршневих установках. Децентралізація теплопостачання на основі міні-ТЕЦ – це сучасний підхід до енергопостачання, при якому теплота та електроенергія виробляються на безлічі невеликих когенераційних установок, розташованих ближче до споживачів. Цей напрямок особливо актуальний для міст, де зношеність тепломереж та втрати при передачі залишаються проблемою. Основні переваги ГТУ (ГПУ) для енергосистеми полягають в їх мобільності та швидкому запуску.

Доцільним є забезпечення від районної ТЕЦ базової частини навантаження, а міні-ТЕЦ працюють тільки в холодний період року, коли потрібен догрів мережної води до більш високої температури. Новим рішенням проблеми раціонального теплопостачання міст є комбінована система теплопостачання в якій відпрацьованою парою турбін ТЕЦ протягом усього

року нагрівається вода для потреб ГВП, а навантаження опалення покривається від квартальних міні-ТЕЦ, які працюють тільки в опалювальний період.

Була побудована математична модель роботи міні-ТЕЦ. Аналіз результатів розрахунків показує, що найбільш вигідною з точки зору економії палива є однотрубна схема заміської конденсаційної електростанції і міні-ТЕЦ. Це обумовлюється меншою кількістю теплоносія що перекачується по магістральних мережах, діаметром магістральних мереж, витратою електроенергії на перекачку теплоносія і втрат з витокami і поверхневим охолодженням.

К. техн. н. Дерезь О.Л., д. техн. н. Садовой О.В., асп. Костенко В.І.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ З РІЗНИМ ТИПАМИ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ

Релейні системи керування формують динамічні режими з обмеженнями проміжних координат не лише завдяки ковзним режимам. На перебіг перехідних процесів найбільший вплив чинять одиничні перемикання регуляторів, які чергуються з інтервалами насичення, і саме ці стани підлягають точному розрахунку при оптимізації за швидкодією. Але відмінності варіантів структури електроприводів вносять в їх реальний рух певні відхилення від прогнозованих станів. Оцінка впливу способів обчислення сигналів зворотних зв'язків на спроможність систем керування положенням до відтворення розрахункових оптимальних за швидкодією траєкторій вимагають емпіричних досліджень.

Позиційний електропривод як об'єкт керування описано системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} p\varphi &= \omega \\ p\omega &= \varepsilon = \frac{k_p \cdot c}{J} \cdot (i - i_c) \\ p\varepsilon &= a = \frac{k_p \cdot c}{J} \cdot \frac{u - R \cdot i - c \cdot \omega / k_p}{L} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де $k_p, R, L, J, c = k\Phi$ — параметри електропривода, $\varphi, \varepsilon, \omega, a$ — кутові положення, прискорення, швидкість та ривок, u, i — напруга та струм якірного кола, $i_c = M_c / c$ — струм, пропорційний моменту статичного навантаження M_c .

За методом $N-i$ перемикачів [1], для оптимізації електропривода за швидкодією застосовується каскад регуляторів, взаємодію яких описують рівняння

$$\left. \begin{aligned} u_{R\varphi} = u_{R1} = \omega^* &= -\omega_{max} \cdot \text{sign}(\varphi - \varphi^* + K_{\varphi\omega} \cdot \omega + K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R\omega} = u_{R2} = \varepsilon^* &= -\varepsilon_{max} \cdot \text{sign}(\omega - \omega^* + K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R\varepsilon} = u_{R3} = u^* &= -u_{max} \cdot \text{sign}(\varepsilon - \varepsilon^*) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де $\omega_{max}, \varepsilon_{max}, u_{max}$ — амплітуди керуючих впливів регуляторів.

Коефіцієнти зворотних зв'язків каскаду (2) дорівнюють

$$K_{\varphi\omega} = \frac{\omega_{max}}{2 \cdot \varepsilon_{max}} + \frac{\varepsilon_{max}}{2 \cdot a_{max}}, \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{\omega_{max}}{4 \cdot a_{max}} + \frac{\varepsilon_{max}^2}{12 \cdot a_{max}^2}, \quad K_{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{max}}{2 \cdot a_{max}}. \quad (3)$$

Технічно найпростіший варіант структурної реалізації системи (1) – (3) полягає в замиканні так званими жорсткими зворотними зв'язками за безпосередньо вимірюваними координатами електропривода i, ω [5]. Для цього

в рівняннях (2) здійснюється заміна змінної $\varepsilon = \frac{k_p \cdot c}{J} i$.

В умовах незбуреного руху така система керування формує оптимальний за швидкодією перехідний процес (рис. 1, а). З прикладенням постійно діючого моменту опору система керування з жорсткими зворотними зв'язками стає

неспроможною відтворити розрахункові траєкторії (рис. 1, б). Зміна знаку статичного моменту не впливає принципово на втрату оптимальності за швидкодією, хоча викривлені відносно оптимальних перехідні діаграми мають дещо іншу форму (рис. 1, в). Зокрема, замість дотягування система позиціонується з перерегулюванням.

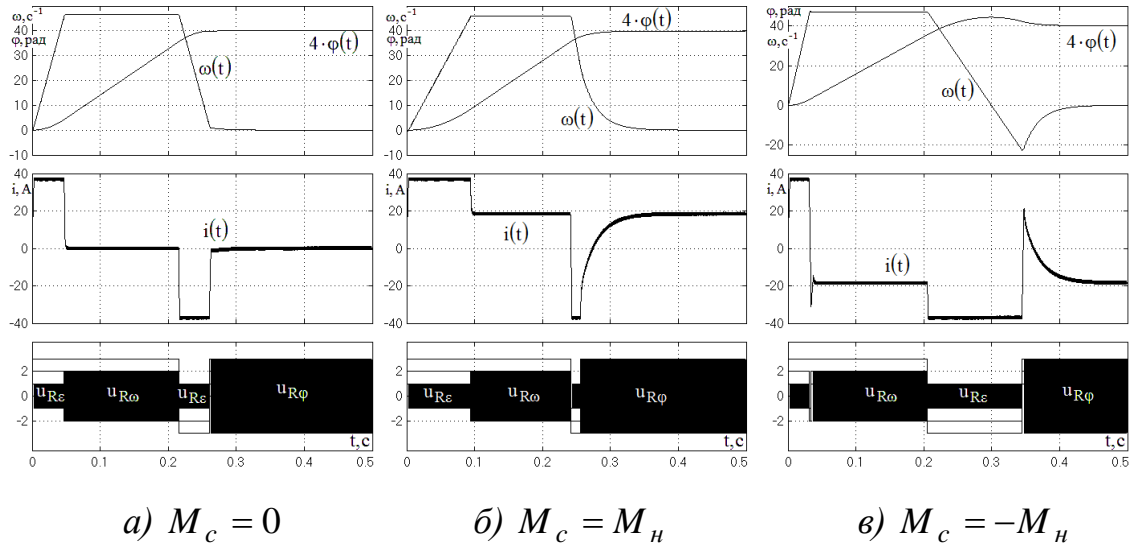


Рис. 1. Динаміка електропривода з жорсткими зворотними зв'язками

Формування оптимального за швидкодією перехідного процесу відбувається за рахунок забезпечення перемикаць регуляторів (2) в характерних точках оптимальної траєкторії, яка є прогнозованою в просторі канонічних координат. Причина втрати системою оптимальності за швидкодією полягає у розбіжності вимірюваних і канонічних координат системи в умовах дії збурень. В результаті перемикаць регуляторів відбуваються не в потрібних точках траєкторії, а у значному віддаленні від неї. Отже, в контексті забезпечення ефективності оптимізації за швидкодією практична рекомендація полягає в необхідності точного обчислення канонічних координат або, щонайменше, максимально точного наближення до них сигналів зворотних зв'язків.

На рис. 2, а та рис. 2, б наведені перехідні процеси системи (1) - (3) в умовах дії параметричного та координатного збурень відповідно, отримані при застосуванні ідеального диференціатора для обчислення сигналу зворотного зв'язку за прискоренням. В обох випадках часові діаграми свідчать про оптимальність системи за швидкодією. Врахування динаміки спостерігача

прискорення докладно розглянуто в роботі [1]. Зауважимо, що динамічні властивості, аналогічні продемонстрованим на рис. 2, забезпечують також зворотні зв'язки, отримані шляхом дворазового диференціювання вимірної координати φ .

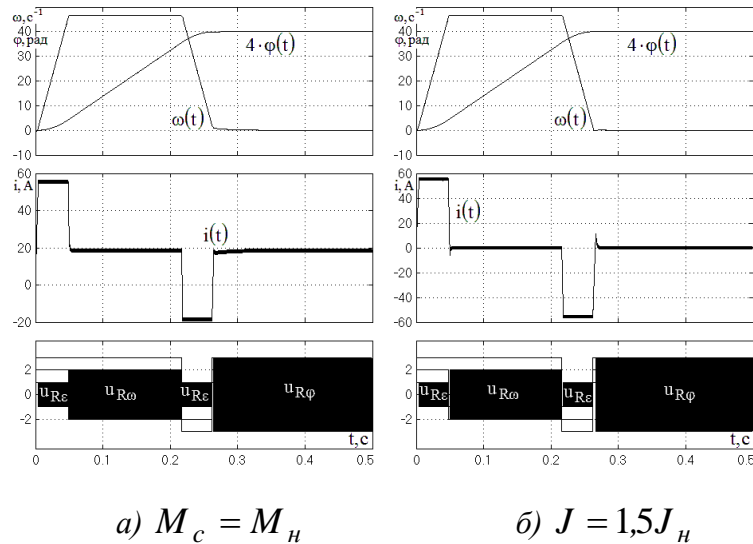


Рис. 2. Динаміка електропривода із гнучкими зворотними зв'язками

Список використаних джерел

1. Дерещ О. Л. Метод N-i перемикачів у задачах оптимізації за швидкістю : монографія / О.Л. Дерещ, О. В. Садовой. Кам'янське: ДДТУ. 2021. 252 с.

К. техн. н. Єрьоміна К.А., Бурзаєв В.Б.

Дніпровський державний технічний університет

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ВМІСТУ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СПЛАВУ AL-CO НА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАДВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ

Важливим аспектом розвитку сучасних полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) триботехнічного призначення є їхні теплофізичні властивості, оскільки саме вони визначають придатність матеріалів до експлуатації в умовах високих температур, змінних навантажень і швидкісних режимів, а також у середовищах з високими вимогами до ефективної

тепловіддачі. Оптимізація теплофізичних характеристик таких матеріалів, зокрема теплопровідності, теплоємності, термостійкості та коефіцієнта теплового розширення, відіграє вирішальну роль у забезпеченні їх надійної роботи в зазначених умовах. Одним із найбільш перспективних способів покращення властивостей термопластичних полімерів є введення наповнювачів, які здатні формувати теплопровідні канали всередині матриці.

Ефективність такого підходу значною мірою залежить як від типу наповнювача, так і від його кількісного вмісту та рівномірності розподілу в полімерній матриці. Зі збільшенням концентрації наповнювача підвищується ймовірність утворення безперервних теплопровідних структур, однак надмірна кількість може призвести до агломерації часток, що негативно позначається на однорідності структури та механічних характеристиках композиту. У зв'язку з цим виникає потреба у точному визначенні оптимальних параметрів композиції, що вимагає використання кількісного підходу до дослідження впливу декількох змінних одночасно.

Для ефективного вирішення таких завдань важливим є застосування методів математичного планування експериментів. Ці методи забезпечують систематичний підхід до дослідження багатофакторних систем, що дає змогу зменшити обсяг експериментальних робіт і водночас отримати точніші результати.

Метою цієї роботи є вивчення закономірностей впливу вмісту та хімічного складу бінарного наповнювача Al–Co на теплофізичні властивості композитів на основі надвисокомолекулярного поліетилену (НВМПЕ), а також розробка математичних моделей, які дозволяють прогнозувати та цілеспрямовано керувати властивостями матеріалу.

Для нових складів ПКМ було обрано НВМПЕ фірми Jiujiang Zhongke Xinxing New Material Co., Ltd. та дисперсний (50-100 мкм) бінарний сплав Al–Co, загартований з рідкого стану, із вмістом кобальту 3, 6,5 та 10 мас.%. Для

здійснення ефективного математичного планування експериментальних досліджень обрано метод повного факторного експерименту першого порядку. Даний метод дозволив мінімізувати час, необхідний для досліджень, забезпечуючи повне охоплення впливу основних факторів: температури експлуатації (Т, К), відсоткового вмісту (С, мас.%) і хімічного складу (с, мас.%) наповнювача.

У ході досліджень отримано математичні моделі залежностей теплофізичних характеристик композитів:

- для теплоємності (С), кДж/(кг·К):

$$C = 0,06 \cdot T - 0,014 \cdot C + 0,03 \cdot c - 17,77$$

- для теплопровідності (λ), Вт/(м·К):

$$\lambda = 0,0007 \cdot T - 0,004 \cdot C + 0,006 \cdot c + 0,00003 \cdot CT + 0,03$$

Результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними – розбіжності не перевищують 10%, що відповідає допустимим межам похибок для експериментальних методик вимірювання.

Отримані рівняння дозволяють здійснювати прогнозування й цілеспрямовану модифікацію теплофізичних властивостей ПКМ на основі НВМПЕ за рахунок варіації вмісту і складу бінарного сплаву, а також температурних умов експлуатації. Таким чином, стає можливим інженерне проєктування матеріалів із наперед заданими характеристиками для конкретних галузей застосування — від машинобудування до енергетики.

К. техн. н. Кабаков А.М.¹, К. техн. н. Кабаков Д.Ю.²

¹Дніпровський державний технічний університет,

²Український державний університет науки і технологій

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕМПФУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Для зниження динамічних навантажень на конструкції кранів в систему підвісу вантажу, що він піднімає, зазвичай вмонтовують демпфуючий пристрій. Однак через конструктивну та функціональну сталість їх фізичних параметрів вони недостатньо ефективні в широкому діапазоні технологічних режимів роботи крана. Цей недолік може бути усунутий автоматичною варіацією параметрів демпфуючих пристроїв — коефіцієнта жорсткості c_d та постійною демпфера k_d в залежності від умов експлуатації крана. Зміна постійної демпфера може бути реалізована завдяки керованій варіації умов дроселювання амортизаційної жорсткості або варіацією фізико-механічних властивостей спеціальної магнітореологічної суспензії (МРС), в'язкі властивості якої визначаються величиною її намагнічування.

МРС це є розчин дрібнодисперсної фракції різних феромагнітних речовин з можливо більш високою магнітною проникністю у синтетичних рідинах та нафтових технічних маслах. Розглянемо можливі варіації k_d при зміні реології МРС. Вона відбувається в результаті регулювання намагніченості рідин в каналах магнітореологічних дроселів (МРД). Конструкція МРД представлена на рис. 1.

Обмотка його електромагніту вміщена в магнітопровід, дозволяє отримати високу індукцію магнітного поля в центрі перепускного отвору. Немагнітна вставка перешкоджає проникненню робочої рідини, що містить у зваженому стані феромагнітні частинки, в обмотку, не впливаючи на конфігурацію магнітного поля. МРД установлюється в корпусі циліндра або поршня в залежності від конструктивного виконання демпфера.

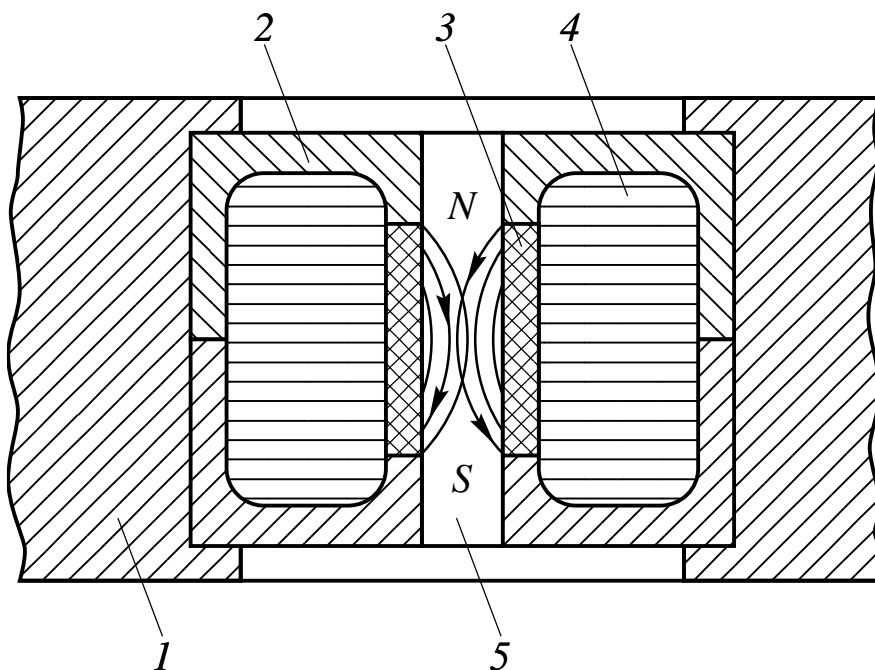


Рис.1. Конструкція магнітореологічного дроселю:

1 – корпус циліндру; 2 – магнітопровід; 3 – немагнітна вставка; 4 – обмотка електромагніту; 5 – перепускний отвір

Приведена в'язкість МРС $\mu = \mu_c / \mu_n$, що залежить від зсувної μ_c та ньютонів μ_n в'язкостей, змінюються в залежності від намагніченості вельми значно. Відносне збільшення в'язкості при збільшенні напруженості магнітного поля визначається виразом

$$(\mu - \mu_0) / \mu_0 = \gamma H^q \quad (1)$$

де μ_0 та μ — відповідно вихідна та зросла динамічні в'язкості МРС;

γ — коефіцієнт певної МРС;

H — намагніченість МРС;

$q = 2$ для великих швидкостей зсуву та $q > 2$ для малих швидкостей зсуву.

Постійна k_d демпфера, що визначається зусиллями в'язкого тертя при дроселюванні рідин [1], дорівнює

$$k_d = \frac{\epsilon \mu A^2}{\pi d^4 n} \quad (2)$$

Тут ε — безрозмірний коефіцієнт, що залежить від умов дроселювання;

μ — динамічна в'язкість робочої рідини демпфера;

d, l, n — відповідно діаметр, довжина та кількість дросельних отворів демпфера;

A — площа поршня демпфера.

З урахуванням виразу (1) отримаємо залежність постійної демпфера k_{∂} від варіації реології МРС.

$$k_{\partial} = \frac{\varepsilon \mu_0 (1 + \gamma H^q) A^2}{\pi d^4 n}. \quad (3)$$

Таким чином, зміна величини H можна досягти при фіксованих параметрах демпфера варіації постійної демпфера k_{∂} .

Розроблена математична модель мостового електромагнітного крана [2], є єдиним електромеханічним комплексом, що складається з керованого електропривода, демпфуючого пристрою відповідною моделлю формування алгоритму управління, канату, електромагніту з вантажем та підкрановою металоконструкцією, з'єднаних між собою пружними зв'язками. Показана суттєва залежності параметрів амортизатора на характер динамічних та коливальних процесів в елементах механізму підйому та металоконструкції для вантажів різної ваги і особливості умов експлуатації. Розроблена система автоматичного управління параметрів амортизатора. Це дозволило забезпечити високу ефективність гасіння коливань у великому діапазоні частот та збільшити продуктивність роботи крана, знизити шкідливий вплив мосту на обслуговуючий персонал, збільшити термін служби механізмів.

Список використаних джерел

1. Огурцов А. П. та інші. Діагностика, динаміка, надійність підйомально-транспортних машин, Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. — 368 с.
2. Кабаков А. М, Теліпко Л. П, Математичне моделювання крана з вантажем і керованими пристроями віброзахисту // European congress of scientific achievements. Proceedings of the 1st International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024 Pp. 91-98. URL: <https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv/>

К. техн. н. Качура О.В., к. техн. н. Количев С.В.,

здоб. освіти Сергієнко М.С.

Дніпровський державний технічний університет

**МОДЕЛЬ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО МІКРОДВИГУНА
СИСТЕМ АВТОМАТИКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ У ДИНАМІЧНИХ
РЕЖИМАХ**

Впровадження у різних сферах промислового виробництва автоматизованих технологічних ліній вимагає оцінки якості й умов експлуатації електроприводів виконавчих механізмів. Це обумовлює розширення вимог до електродвигунів, які повинні зберігати функціональність у широких інтервалах температур в умовах підвищеної вологості, вібрацій, коливання напруги живлення і т.д.

На сьогоднішній день найбільш широке поширення для привода автоматизованих ліній і промислових механізмів отримали асинхронні двигуни завдяки таким перевагам як простота, надійність, невисока вартість. Серед них особливе місце займають асинхронні мікродвигуни (МАД) з робочим діапазоном потужностей від декількох ватів до кількох сотень ватів, які, в основному, знаходять застосування у робототехніці, медицині, механізмах верстатів і т.д.

Незважаючи на те, що мікродвигуни відрізняються відносно простою конструкцією електромеханічної частини, питання, пов'язані з їх проектуванням, нерідко викликають складнощі. Існуючі методики [1], як правило, мають прив'язку до типу мікромашин і орієнтовані на певну конструкцію. Часто це призводить до необхідності кардинального перегляду підходів до розрахунків навіть при мінімальних конструктивних змінах.

У зв'язку з цим важливим інструментом аналізу МАД стають чисельні методи, серед яких можна виділити метод кінцевих елементів (МКЕ) [2].

У роботі запропонована універсальна математична модель трифазного МАД на основі об'єднання рівнянь електромагнітного поля й рівнянь електричних кіл із застосуванням МКЕ, що дозволяє досліджувати як електромагнітні, так і електромеханічні процеси у динамічних режимах.

Виконавши ряд відомих математичних перетворень системи рівнянь Максвелла [3], одержимо загальне рівняння, що описує електромагнітне поле

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \vec{A}) = J - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad (1)$$

де ∇ – оператор набла; ν – питомий магнітний опір сталі; \vec{J} – щільність електричного струму; σ – питома провідність середовища; \vec{A} – векторний магнітний потенціал; t – час.

Вирішення (1) пов'язане з розв'язком тривимірної польової задачі, яка у декартовій системі координат приймає вигляд

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial z} \right) = J - \sigma \frac{\partial A}{\partial t}, \quad (2)$$

де x, y, z - координати області.

У рамках розглянутої математичної моделі виконаний розрахунок електромагнітного поля серійного МАД УАД-32 (рис. 1).

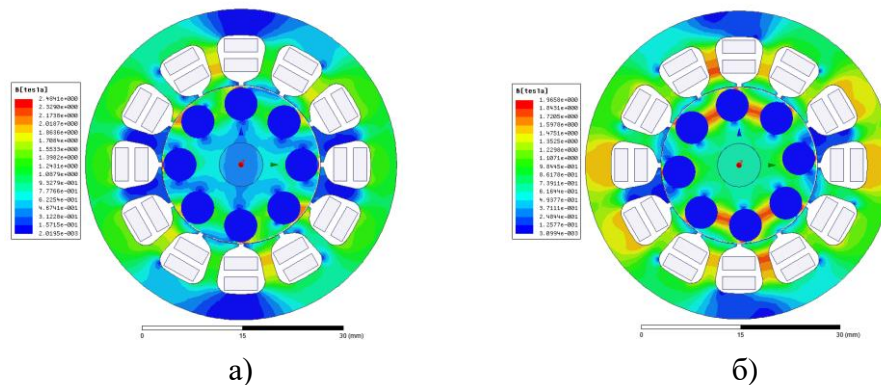


Рис. 1. Розподіл магнітної індукції у перетині МАД при $t = 0,03$ с (а) і $t = 0,47$ с (б)

Список використаних джерел

1. Lopukhyna E.M., Somykhyna H.S. Raschet asynkhronnykh mykrodvyhatelei odnofaznogo y trekhfaznogo toka. M. – L., Hosenerhoizdat, 1961.
2. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th Edition. - Butterworth-Heinemann, 2013. - 756 p.
3. Arkkio, A. Analysis of induction motors based on the numerical solution of the magnetic field and circuit equations. Phd thesis Acta Polytechnica Scandinava, Electr. Eng. Series No. 59, Laboratory of Electromechanics, Helsinki University of Technology, 1987. Helsinki.

Коровін О.О., к. техн. н. Клімов Р.О., к. техн. н. Крюковська О.А.

Дніпровський державний технічний університет

ВПЛИВ РОЗВИНЕНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ХАРАКТЕРИСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Однією з основних характеристик теплообмінних апаратів є об'єм займаний ними. Найчастіше виникають обмеження по займаному об'єму апарату, що викликане компонуванням обладнання, або споживчих об'єктів. Найбільшого використання для підігріву або охолодження середовища знаходять кожухотрубні теплообмінники, які дозволяють використовувати розвинені поверхні теплообміну.

Метою роботи є визначення впливу коефіцієнту оребрення, несучого діаметру оребрення трубки та довжини однієї оребреної трубки, як основних факторів на геометричний об'єм теплообмінника. Для раціональної постановки експерименту по визначенню впливу факторів на таку характеристику теплообмінника як його об'єм, обрано центральний композиційний план другого порядку $k = 3$. Була отримана математична модель досліджуваного процесу

$$\hat{y}_1 = 7,32 + 1,85x_1 + 2,553x_2 + 2,222x_3 + 0,432x_1x_2 + 0,358x_1x_3 + 0,564x_2x_3 + 0,198x_2^2 + 0,307x_3^2, \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (1)$$

Аналізуючи рівняння (1) видно, що найбільший вплив на загальний об'єм теплообмінника має фактор x_2 (несучий діаметр труби). Вплив коефіцієнту оребрення x_3 має вторинне значення на об'єм теплообмінника так само як і на загальну довжину його трубок. В той же час такий фактор як довжина однієї трубки має найменший вплив на шукану функцію x_1 .

Розроблена методика дозволяє проаналізувати вплив основних параметрів на знаходження мінімальної величини геометричного об'єму теплообмінника при заздалегідь заданому значенні одного з параметрів. Досягнути зменшення загального об'єму апарату можна зменшенням довжини однієї трубки поперек потоку теплоносія, коефіцієнту оребрення та несучого діаметру трубки.

Кривуляк І.І., д. ф.-м. н. Маркович Б.В., к. техн. н. Корендій В.М.

Національний університет «Львівська Політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ LSTM-МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РУХУ БІОНІЧНОГО ПРОТЕЗА НА ОСНОВІ ЕМГ-СИГНАЛІВ

Керування сучасними біонічними протезами передбачає розпізнавання м'язової активності користувача за допомогою ЕМГ-сигналів. Зараз є два найпоширеніших підходи: пряме керування (DC) та розпізнавання шаблонів (PR).

Пряме керування — використовує сигнали з м'язів-антагоністів для безпосереднього керування напрямком одного мотора. Цей метод простий, але обмежений лише одним ступенем свободи, що робить його непридатним для складних протезів.

Розпізнавання шаблонів — базується на класифікації попередньо навченої бази жестів, що визначають, який рух потрібно виконати. Алгоритм обробляє сигнали з декількох ЕМГ-каналів, виділяє ознаки (частотні, статистичні) й подає їх на класифікатор.

Обидва методи мають суттєві обмеження: дискретність, низьку адаптивність та неможливість одночасного і плавного керування кількома суглобами. У цьому контексті актуальним стає використання моделей машинного навчання, зокрема рекурентних нейронних мереж, що враховують часову динаміку сигналів. У дослідженні розглянуто потенціал застосування LSTM-мереж для прогнозування рухів протеза, які ґрунтуються на часових закономірностях ЕМГ.

Рекурентні нейронні мережі, а особливо їхній удосконалений варіант — Long Short-Term Memory, ідеально підходять для аналізу послідовностей, таких як ЕМГ-сигнали. LSTM дозволяє враховувати не лише поточне значення сигналу, але й контекст попередніх значень завдяки своїй архітектурі, яка:

- вирішує яку частину нового сигналу записати в пам'ять;
- відкидає неактуальні дані;
- визначає яка інформація з пам'яті використовується для прийняття рішення.

У контексті керування протезом це означає, що мережа аналізує кілька останніх мілісекунд EMG-сигналу та прогнозує майбутнє положення суглоба, силу захвату чи інші параметри керування. Завдяки здатності до прогнозування, протез реагує майже одночасно з м'язовою активацією користувача, що наближає керування до природного.

На відміну від PR (розпізнавання шаблонів), який працює з дискретними командами («сильно стиснути», «відкрити»), LSTM формує неперервний сигнал керування, що дозволяє реалізувати плавні, контрольовані рухи. Протезна кисть не просто виконує жести, а варіює силу та швидкість згідно з інтенсивністю м'язового скорочення.

Крім того, модель LSTM здатна обробляти сигнали з кількох EMG-каналів одночасно, що дає змогу керувати кількома ступенями свободи. Наприклад, користувач може одночасно обертати зап'ясток і стискати кисть, а модель «розплутує» ці сигнали, формуючи окремі виходи для кожного руху.

Теоретично, через впровадження таких моделей, очікується підвищення точності прогнозування сили/положення до $R^2 \approx 0.95$, кореляція з реальним рухом до 0.97, стабільність системи до шумів та змін положення електродів, зменшення затримки реакції протеза до 50–100 мс, що критично для суб'єктивного відчуття миттєвості, зменшення апаратних вимог через використання лише базових ознак.

Особливу увагу заслуговує адаптивність LSTM: її можна донавчати під конкретного користувача, враховуючи унікальні фізіологічні особливості. Така можливість дозволяє формувати персоналізоване керування, а також впровадити самонавчання під час експлуатації.

Застосування LSTM-моделей в керуванні біонічними протезами демонструє суттєве зростання ефективності порівняно з традиційними методами. Завдяки здатності до аналізу часових послідовностей, мережа забезпечує плавне, адаптивне і багатофункціональне керування. Реакція протеза стає майже миттєвою, рухи — природними, а процес — інтуїтивним для користувача.

Впровадження таких систем дозволить покращити якість життя осіб з ампутаціями, скоротити період адаптації до протезу, підвищити рівень автономності користувача, знизити залежність від технічного обслуговування.

Таким чином, LSTM — це не просто новий підхід, а фундаментальний крок до створення «розумних» протезів, що поєднують у собі потужність штучного інтелекту та нейротехнологій. Подальші дослідження мають зосередитися на інтеграції зворотного зв'язку, спрощенні архітектур моделей та проходженні клінічних валідацій.

**Д. техн. н., проф. Кругляк І.В., Сорока Д.В., Чухно С.С., Ткач Є.М.,
Овод Є.О.**

Дніпровський державний технічний університет

THERMODYNAMIC MODELING OF THE GAS PHASE DURING THE PREPARATION OF BORONIZED COATINGS UNDER SHS CONDITIONS

Thermodynamic systems are conceptually defined material objects whose interaction with the environment is limited to the exchange of heat and work. The use of thermodynamic modeling methods makes it possible to quantitatively predict the composition and properties of complex heterogeneous, multicomponent, and multiphase systems over a wide range of temperatures and pressures, taking into account chemical and phase transformations. In addition, this approach helps to systematize theoretical and experimental information, which is important for the development of new technologies and materials [1, 2].

Based on thermodynamic studies and studies of the phase composition of boron-doped chromium coatings, physicochemical models of the formation of boron-doped chromium coatings in the mode of thermal spontaneous combustion of functionally active charges were developed. At the 1st stage, as a result of the temperature rise, the steel part is heated and the decomposition of the gas transporting agents NH_4F and I_2 begins. At the 2nd stage, thermal spontaneous combustion of functionally active charges occurs, resulting in further heating of the parts and the formation of a gas environment consisting of halides: CrF , CrF_2 , CrF_4 , AlI , AlI_2 , AlI_3 , BF_3 . At stage 3, heat is removed by the parts, and the temperature drops to the design temperature of the process. The α -phase alloyed with Cr, Al, B begins to form.

At stage 4, active atoms of chromium, aluminum, silicon boron, and titanium diffuse into the steel, forming a solid solution of these elements in iron. Alloyed chromium-alloyed phases are also formed.

At stage 5, the functionally active charge is cooled. Due to a decrease in temperature, the rate of formation of the protective coating decreases. The final coating is formed with the following phases: $(\text{FeCrAl})_2\text{B}$, Fe_3Al , $(\text{FeCr})_7\text{C}_3$, $(\text{Fe,Cr,Al})_2\text{B}$.

Metallographic and X-ray spectral analysis of boron-doped chrome protective coatings obtained on 45 and 40X steel samples (figs. 7,8) showed that the following phases were formed on the surface: $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$, $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$, Fe_3Al , $(\text{Fe,Cr,Al})_2\text{B}$, and zones of α -solid solution of Cr, Al, B in Fe.

References

1. Bartkowska, A. (2021). Characteristics of Cr-B Coatings Produced on Vanadis® 6 Tool Steel Using Laser Processing. *Materials*, 14(10), 2621. <https://doi.org/10.3390/ma14102621>
2. Hu, J., Zeng, J., Yang, Y., Yang, X., Li, H., & Guo, N. (2019). Microstructures and wear resistance of boron-chromium duplex-alloyed coatings prepared by a two-step pack cementation process. *Coatings*, 9 (9), 529. <https://doi.org/10.3390/coatings9090529>

Д. техн. н., проф. Кругляк І.В., Кривко Р.Г., Дерев'янка С.С.,

Гуменний А.М., Чеченін М.К.

Дніпровський державний технічний університет

MODELING OF GAS ENVIRONMENT DURING STRENGTHENING OF HOT-ROLLED MECHANICAL EQUIPMENT

Protective coatings, which are obtained by thermal self-ignition using complex powder charges, lead to changes in the phase and chemical composition of alloyed alloy coatings, which causes residual stresses. During the cooling of the reactor, as a result of the elastic interaction of alloyed alloy coatings and structural material, due to thermal effects, thermal expansion is observed. All this leads to the appearance of residual stresses on the surface. Tensile residual stresses in the surface are particularly harmful to metal products that operate under alternating loads. Such stresses contribute to the destruction of fatigue. Harmful effects of residual stresses affect the increase in the total chemical activity of the metal. The level of residual stresses increases with increasing difference in temperature conditions and thermo physical properties of the structural material and alloy coating. In order to influence the nature of the residual stress distribution, alloyed alloys were alloyed. The value of residual stresses in the alloy coating is also affected by the ratio of the volume of the coating and the core. It is established that compressive stresses occur on the surface of steel 45, which reach 170 - 200 MPa during titanium doping, 210 - 240 MPa during chromium doping, 90 - 120 MPa during doping with silicon. As the process temperature increases, the residual compressive stresses decrease. Residual stresses largely determine the possibility of practical use of structural materials. The size, sign and nature of their distribution affect the strength of adhesion of the coating to the material.

Residual stresses arising in the surface of the part, lead to micro cracks, chips and destruction of the coating. Increasing the concentration of alloying elements in

alloy coatings, leads to an increase in their level compared to known alloy coatings obtained under stationary conditions. The study shows that the process temperature affects the magnitude and nature of the distribution of residual stresses. As the temperature of the SHS process increases, the level of residual compressive stresses on the surface decreases. It is established that the residual compressive stresses within the coating on steel, associated with a gradient of volumetric changes at the boundary between the alloyed alloy coatings, which have the phases: $(Cr,Fe)_{23}C_6$, Fe_2Al_5 , $FeAl$ i Fe_3Al alloyed Ti, $TiAl_3$, Ti_3Al , $TiAl$, $(FeAl)_3Si$ and – α - solid solution of chromium, aluminum, silicon in iron.

Diffusion coatings obtained under conditions of thermal self-ignition of SHS-charges have significant advantages over other types of coatings, as their bond strength with the base metal, due to the penetration of alloying elements into the crystal lattice of the material, significantly exceeds the bond strength of other coatings.

References

1. Surface strengthening of working materials in the conditions of complex influence of aggressive substances: monograph / B.P. Sereda, L.P. Bannikov, S.V. Nesterenko, O.S. Gaidaenko and others. DDTU, 2019. 173 p.

Кудрін Д.В., к. техн. н. Клімов Р.О.

Дніпровський державний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПЕРЕРИВЧАСТИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ

Переривчасте опалення широко використовується для економії енергії та зниження експлуатаційних витрат, особливо у будівлях, які не використовуються цілодобово. Підлогове (особливо водяне) опалення має високу теплову інерцію: повільно остигає, зберігає тепло навіть при відключенні. Але також має й недоліки: довго нагрівається після включення, не підходить для приміщень, де потрібна швидка зміна температури. При

проектуванні потрібно враховувати теплову інерцію підлоги (масивні стяжки тривало нагріваються/охолоджуються). Дослідження показують, що переривчасте опалення може зменшити енерговитрати на 10–30 %. Так само як і зниження температури на $3\div 4^{\circ}\text{C}$ вночі або без людей, а також оптимальний час включення до приходу людей.

Рівномірність нагрівання теплої підлоги – один із ключових показників комфорту та ефективності системи. Вона означає, наскільки однакова температура поверхні підлоги на всій площі. Ідеальна система має забезпечувати плавний та рівномірний розподіл тепла — без «гарячих» чи «холодних» зон. На рівномірність нагрівання впливає крок укладання труб або кабелю, матеріали стяжки та покриття підлоги, температура теплоносія або нагрівального елемента, схема укладання та теплоізоляція. Різниця температур в $1\div 2^{\circ}\text{C}$ майже непомітна, а великі значення викликають дискомфорт перебування людей. Розроблена математична модель теплопередачі при роботі систем підлогового опалення на основі водяного та електричного стрижневого типів. Як показали розрахунки рівномірність нагріву для водяної системи підлогового опалення вища в порівнянні з електричним стрижневим, але при наявності підлогового покриття, наприклад, керамічної плитки, електричне опалення більш ефективно і характеризується рівномірним прогрівом підлоги.

Д. ф.-м. н. Кузьменко В.І.

Дніпровський національний університет

МЕТОДИ УМОВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ У МОДЕЛЯХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ

Розглядаються та аналізуються існуючі підходи до формулювання математичних моделей процесів обробки металів тиском. Особливість цього класу задач пов'язана з виконанням умови нестисливості в усіх точках області та умов взаємодії металу та інструменту у вигляді нерівностей. Загальний підхід ґрунтується на слабкому формулюванні у вигляді квазіваріаційної нерівності відносно полів швидкостей та середнього гідростатичного тиску.

Унаслідок дискретизації за часом виникає послідовність задач розв'язання варіаційних нерівностей для кожного моменту часу. Скінченноелементна дискретизація призводить до розв'язання скінченно-вимірних задач нелінійного програмування. Запропоновано узагальнення методу послідовної верхньої релаксації для задач даного класу.

Наводяться та аналізуються приклади дослідження процесів осідання шаруватих заготовок та контактної взаємодії в умовах істотно складного навантаження. Виконано аналіз особливостей технологічної операції обкочування роликami поверхонь деталей машинобудування і встановлено глибину та рівень поверхневого зміцнення. Досліджено вплив історії зовнішнього навантаження на параметри пружнопластичного деформування. Продемонстровано процес згладжування мікронерівностей на поверхнях деталей та встановлено необхідні значення технологічних параметрів.

PhD Student Makarenko M.V., PhD in Technical Sciences Nosov D.G.

Dniprovsky State Technical University

**DEVELOPMENT OF A THERMODYNAMIC MODEL FOR
PREDICTING THE PHASE COMPOSITION OF MULTICOMPONENT
METALLIC ALLOYS USED IN ADDITIVE MANUFACTURING**

Additive manufacturing technologies are increasingly integrated into industrial practice, which, in turn, imposes new requirements on the accuracy of predicting the properties of materials formed under complex thermal and temporal conditions. In this context, the modeling of phase formation in multicomponent metallic systems becomes highly relevant, especially since classical approaches based on equilibrium phase diagrams often prove inadequate. A deep understanding of phase stability and evolution during cooling and solidification is impossible without thermodynamic

modeling, which incorporates both energetic and entropic factors, thus highlighting the importance of this research direction.

This study proposes a thermodynamic model based on the formalized CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) approach, adapted for conditions of rapid cooling that are typical of additive processes. The core idea lies in determining the composition of both equilibrium and metastable phases while accounting for time-dependent temperature changes, cooling rates, local compositional inhomogeneities, and mutual solubility of the alloying components. Particular attention is given to modeling the behavior of alloying elements at the solidification front—both in terms of phase nucleation and their subsequent co-evolution.

The model is formalized as a system of Gibbs energy equations, complemented by mass balance constraints and phase equilibrium conditions, with the possibility of incorporating heat and mass transfer phenomena. As a thermodynamic foundation, generalized Helmholtz free energy functions and component activity models are employed. This allows for the description of phase transformations not only under equilibrium conditions but also in kinetically constrained scenarios. The influence of cooling rate is considered via a functional relationship between the thermal gradient and the degree of undercooling, which is crucial for accurately reproducing phase distributions in the material.

To verify the model, a series of simulations were conducted for characteristic nickel-, cobalt-, and iron-based alloys commonly used in additive manufacturing. The results were compared with experimental microstructural analyses (metallography, X-ray phase analysis) and computational thermodynamics outputs (Thermo-Calc, JMatPro). A high degree of correlation was observed in terms of phase volume fractions, precipitation temperatures, and morphological features. In several cases, the model successfully predicted the formation of metastable phases identified only through detailed thermal analysis.

The proposed model has practical significance for alloy design and the optimization of additive deposition regimes. Its application enables the avoidance of undesirable phase formations, enhances the structural stability of the deposited layer, and ensures the predictability of mechanical properties. Future developments will focus on the integration of kinetic parameters to extend the model's capabilities towards describing the growth behavior of structural elements at both micro- and nanoscales.

The developed thermodynamic model represents a step toward creating a digital environment for the engineering design of functional materials, combining high-precision computational methods with experimental data from materials science. Such an approach not only broadens our understanding of the physico-chemical nature of multiphase systems but also lays the foundation for scientifically grounded prediction in modern manufacturing practices.

Асп. Моргун Є.М., к. техн. н. Надригайло Т.Ж.

Дніпровський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РАФІНУВАННЯ СТАЛІ

Рафінування сталі — це важливий етап металургійного процесу, що має на меті зменшення вмісту домішок (C, S, P, H, N, O) та покращення експлуатаційних характеристик кінцевого продукту. Ефективне математичне та комп'ютерне моделювання процесу дозволяє оптимізувати параметри виробництва та забезпечити стабільну якість металу.

Матеріали, що використовуються при рафінуванні сталі:

- Флюси: CaO, MgO, CaF₂ — для утворення шлаку та зв'язування сірки й фосфору.

- Легувальні елементи: FeSi, FeMn, Al — для покращення структури та властивостей сталі.

- Газова атмосфера: Аргон — для продування металу та зменшення вмісту водню й азоту.

- Шлакоутворювачі: Al_2O_3 , SiO_2 — для рафінування металу та утворення стійкого шлаку.

Для дослідження було обрано математичну модель, яка враховує ефективну стисливість середовища, взаємний рух, взаємодію та перетворення кількох фаз: розплаву; газ, який уловлюється при додаванні присадок і металевим струменем; тверда дрібнодисперсна фаза модифікуючих матеріалів; рідка дисперсна фаза продуктів їх розчинення або плавлення та інші фази, в які вона переходить.

Гідродинаміка середовища в цілому та масообмін газової фази описуються системою рівнянь [1]:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}\tilde{p} + \nu_e \Delta \vec{v} - [\alpha + (1-x)\beta] \vec{g} + \vec{f}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \psi_a + \psi_b, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\alpha (\vec{v} + \vec{w}_a^c)] = \vec{\nabla} \cdot (D_a \vec{\nabla} \alpha) + \psi_a, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\beta (\vec{v} + \vec{w}_b^c)] = \vec{\nabla} \cdot (D_b \vec{\nabla} \beta) + \psi_b. \quad (4)$$

Процес теплопередачі описується рівнянням:

$$C_r \frac{dT}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda'_e \vec{\nabla} T) + \theta. \quad (5)$$

Рівняння (1) – (4) розв'язуються чисельно методом розщеплення фізичними факторами для несоленоїдного руху багатофазних середовищ.

Рівняння (5) розв'язується за допомогою явної різницевої схеми.

Покоординатний запис системи рівнянь (1) – (5) реалізовано в тривимірному просторі в циліндричних координатах на рівномірній шаховій сітці.

Граничні умови для розрахункових величин на твердих поверхнях ковша, осі симетрії та металевого дзеркала задаються стандартним способом, властивим методу розбиття за фізичними факторами при використанні шахової сітки.

Для опису динаміки процесу рафінування застосовуються рівняння масопереносу та кінетики реакцій. Наприклад, масоперенос сірки описується рівнянням:

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

де J — потік маси, D — коефіцієнт дифузії, $\frac{dC}{dx}$ — градієнт концентрації.

Також враховується кінетика реакції рафінування сірки:

$$\frac{dC_S}{dt} = -k * C_S$$

де C_S — концентрація сірки, k — константа швидкості реакції.

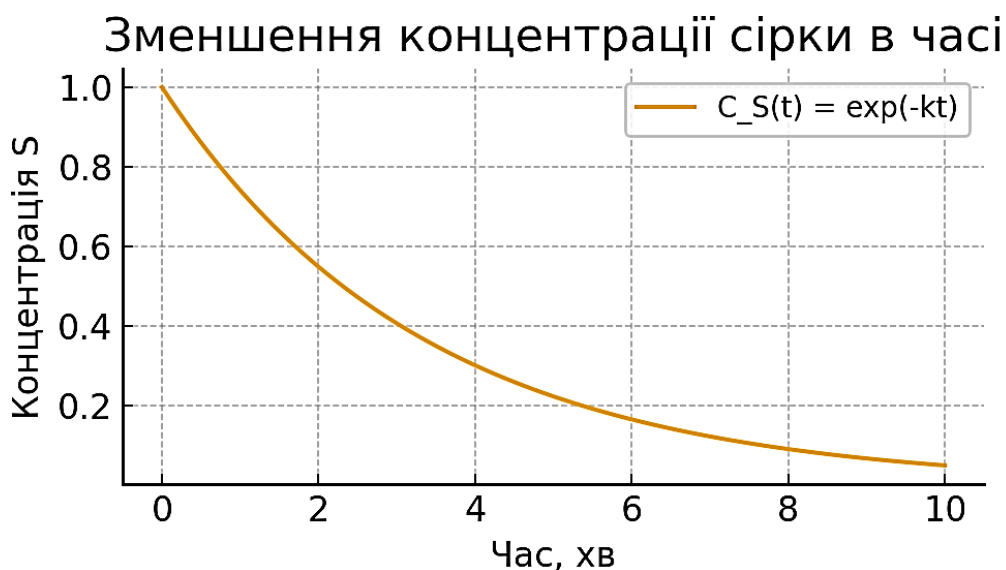


Рис. 1. Динаміка зниження вмісту сірки у сталі під час рафінування

Для комп'ютерного моделювання, окрім середовища програмування Microsoft Visual Studio.NET, можна використовувати системи чисельного розв'язання рівнянь (наприклад, COMSOL, ANSYS, OpenFOAM), які

дозволяють враховувати теплообмін, турбулентність та фазові переходи у процесі рафінування. Комп'ютерне моделювання дає змогу оптимізувати витрати енергії, вибір матеріалів та параметри технологічного процесу.

Висновки. Математичне та комп'ютерне моделювання процесу рафінування сталі є ефективним інструментом для підвищення якості металопродукції. Завдяки моделюванню можливе передбачення змін у хімічному складі, оптимізація використання ресурсів та зменшення втрат при виробництві.

Список використаних джерел

1. Огурцов А.П., Самохвалов С.Є. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах: монографія. Київ: Наукова думка, 2001. 412 с.

К. ф.-м. н. Огліх В.В.¹, к. т. н. Шаповалов О.В.², Лісунова В.В.¹

¹Інститут транспортних систем і технологій НАН України

²Університет митної справи та фінансів

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ВІДПОВІДНОСТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ У ТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ

Стратегічні й тактичні рішення щодо розвитку транспортної інфраструктури України набувають особливого значення як в контексті змін, що обумовлені військовою агресією росії, так і глобального переходу світу у інформаційний простір. Стрімкий розвиток цифрової економіки перетворив транспортні системи на інформаційно-орієнтовані платформи, здатні генерувати великі обсяги даних про переміщення товарів, пасажирів, маршрути, швидкість доставки та поведінкові особливості користувачів [1].

Для забезпечення ефективного управління логістичними процесами, оптимізації транспортних потоків і прийнятті обґрунтованих управлінських рішень у режимі реального часу необхідно досліджувати взаємозалежності між

структурними компонентами транспортної системи — видами транспорту, географічними зонами обслуговування, категоріями вантажів та споживачів послуг тощо. Оскільки значна частина даних має дискретну природу і поєднує як кількісні, так і якісні показники, доцільним є застосування методу аналізу відповідностей (Correspondence Analysis, CA) [2]. Цей метод дозволяє виявити приховані взаємозв'язки категоріальними змінними, що представлені у вигляді контингентної таблиці, побудувати спільний простір для візуалізації відношень між категоріями і здійснювати проводити сегментацію елементів транспортної системи за схожістю їх поведінкових характеристик.

Особливої актуальності цей підхід набуває в аналізі інтермодальних перевезень, де взаємодія між різними видами транспорту потребує точного інформаційного супроводу [3]. У цьому контексті використання методів математичного моделювання [4; 5], зокрема багатовимірного статистичного методу аналізу відповідностей (CA), дозволяє дослідити взаємозв'язки між компонентами транспортної системи та поведінкою клієнтів, виявляючи приховані закономірності у категоріальних даних великого обсягу. Перевага методу аналізу відповідностей (CA) і його відмінність від методу головних компонент, полягає у тому, що він працює з категоріальними даними, що дозволяє адекватно описувати структуру відношень у транспортній системі, не зводячи багатовимірність до числових узагальнень. Результати аналізу відображаються у низьковимірному евклідовому просторі, де просторове розташування точок вказує на наявність або відсутність асоціацій між відповідними категоріями.

У рамках проведеного дослідження аналіз базувався на матриці:

$$S = \{s_{ij}\} = (s^1, \dots, s^f) = (s_1, \dots, s_n), \quad s_{ij} > 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, f,$$

де: рядки s_i , $i = 1, \dots, n$ — відповідають типу перевезень,

стовпці s^j , $j = 1, \dots, f$ – відповідають класам користувачів або суб'єктам транспортної інфраструктури.

На їх перетині міститься частота вибору певного типу перевезення представниками кожного класу.

Процедура обробки включала такі етапи:

- нормалізація вхідної таблиці частот;
- обчислення відстаней хі-квадрат між рядками та стовпцями;
- застосування сингулярного розкладу (SVD) до матриці відхилень;
- побудова просторової візуалізації з відображенням елементів у двовимірному евклідовому просторі;
- аналіз відстаней між точками як міри асоціативності.

Результуюча матриця нормалізованих профілів:

$$PN = \{p_{ij}\}, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, f.$$

служує основою для подальшого класифікаційного аналізу за відповідними критеріями. Зокрема, було виявлено типові переваги представників окремих груп споживачів щодо конкретних видів перевезень з урахуванням ринкової позиції конкурентів у кожному сегменті φ_i , $i = 1, \dots, m$.

Апробація запропонованого підходу на реальних даних підтвердила його дієвість і обґрунтованість.

Аналіз відповідностей показав себе як ефективний інструмент не лише для виявлення внутрішніх структур даних, а й для прийняття рішень у сфері транспортної логістики.

Список використаних джерел

1. Прокопенко, О. І. Цифровізація транспортної системи України: проблеми та перспективи. Вісник транспортної академії України. 2022. 59.С. 56-62.
2. Greenacre, M. Correspondence Analysis in Practice). New York: Chapman and Hall / CRC. 2021. 326 p.
3. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. The Geography of Transport Systems Routledge. New York: Routledge. 2024. 402 p.

4. Jain, A., & Kumar, A. Multivariate Statistical Analysis for Transportation Data. Journal of Transportation Engineering. 2021. 147(4).

5. Трегуб О. В. Математичне моделювання логістичних процесів / Харків: ХНУМГ ім. Бекетова. 2022.

Магістр Пальцун Д.О., ст. викл. Давидюк А.В.

Дніпровський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

У сучасному машинобудуванні зростає потреба у легких, міцних та технологічних конструкційних матеріалах. Алюмінієві сплави, як одні з основних матеріалів у цій галузі, вимагають подальшого вдосконалення властивостей. Одним із ефективних методів покращення їх характеристик є модифікування рідкого розплаву, що дозволяє змінювати процес кристалізації та структуру сплаву. Для підвищення ефективності такого підходу доцільним є застосування математичного моделювання, яке дозволяє прогнозувати результати модифікування та оптимізувати параметри технологічного процесу.

Розглянуто математичне моделювання впливу модифікування на характеристики алюмінієвих сплавів. Модель побудована на основі експериментальних даних, отриманих у промислових умовах, і враховує вплив концентрації модифікатора, температурно-часового режиму обробки та технологічних параметрів лиття на формування мікроструктури та механічні властивості. Для аналізу використано статистичні методи, зокрема розрахунок середнього значення, стандартного відхилення та коефіцієнта варіації, що дозволило оцінити рівень стабільності отриманих результатів.

Застосоване моделювання підтверджує, що модифікування сприяє покращенню комплексу механічних властивостей, зокрема границі міцності, твердості та ударної в'язкості, а також зменшенню варіативності структури. Це пов'язано зі зміною умов кристалізації, утворенням більш однорідної структури

та покращенням розподілу фаз. Встановлено, що математична модель ефективно описує поведінку системи при зміні параметрів обробки та може бути використана для техніко-технологічного супроводу литтєвих процесів.

Результати роботи мають практичне значення для виробництв, де застосовується модифікування алюмінієвих сплавів, і можуть бути основою для створення адаптивних алгоритмів керування технологічними режимами в ливарному виробництві. Такий підхід дозволяє не лише підвищити якість кінцевого продукту, а й забезпечити стабільність властивостей при серійному виготовленні.

Д.ф.-м.н. Пасічник А. М., магістр Малий А. М.

Дніпровський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗОДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПНЕВМАТИЧНОЇ МІКРОТУРБИНИ

Підвищення рівня автоматизації та механізації виробничих процесів є одним із ключових завдань сучасного виробництва, в якому важливу роль відіграють механізовані інструменти. Серед механізованих інструментів широке застосування мають пневматичні шліфувальні машини із мікротурбінним приводом. Для отримання достатньо високої чистоти обробки поверхонь деталей технічні характеристики таких машин мають забезпечувати достатньо велике число обертів та відповідну потужність. Для таких систем достатньо ефективного застосування набувають мікротурбіни завдяки їх компактності, ефективності та здатності перетворювати енергію стисненого повітря у корисну роботу. Тому удосконалення методів розрахунку технічних параметрів пневматичних мікротурбін має достатньо актуальне як наукове так і прикладне значення обумовлене потребою в енергоефективних і екологічно чистих енергетичних установках. Зазначимо, що газодинамічний розрахунок

мікротурбін є міждисциплінарною задачею вирішення якої вимагає застосування теорії термодинаміки, аеродинаміки, чисельного моделювання та матеріалознавства.

Принципова схема роботи пневматичної парціальної мікротурбіни наведена на рис. 1.

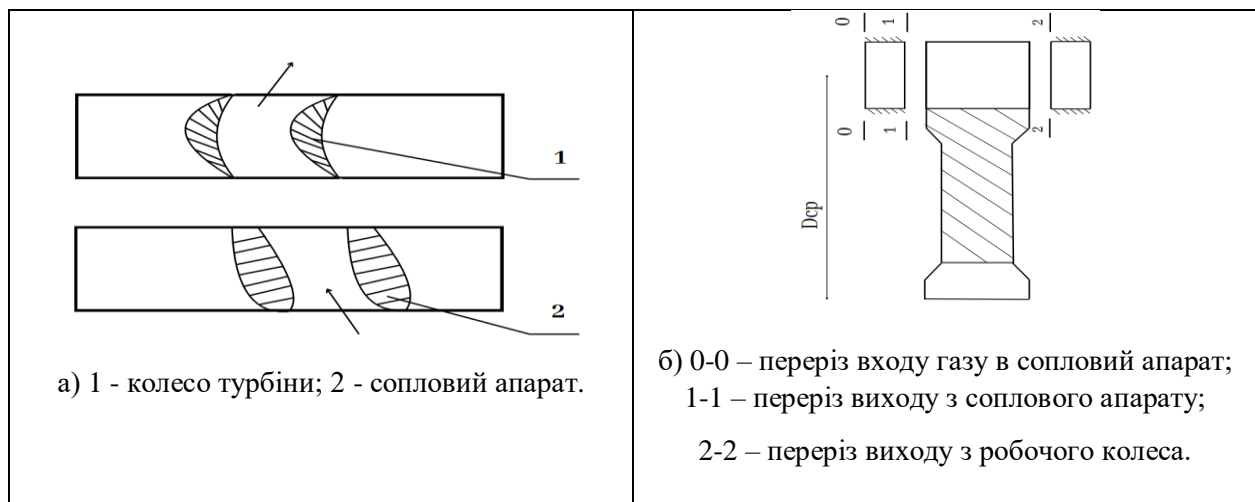


Рис. 1. Схема роботи пневматичної парціальної мікротурбіни

Крутний момент на валу мікротурбіни створюється за рахунок подачі повітря із тиском 5 ата на лопатки робочого колеса мікротурбіни через сопловий апарат. В результаті розширення стисненого повітря потенціальна енергія тиску перетворюється в кінетичну енергію обертального руху мікротурбіни. Відпрацьоване повітря через вихлопні канали відводиться у навколишнє середовище.

При такому функціонуванні напрямки руху та параметри повітряних потоків на вході і виході із мікротурбіни реалізуються за схемою наведеною на рис. 2.

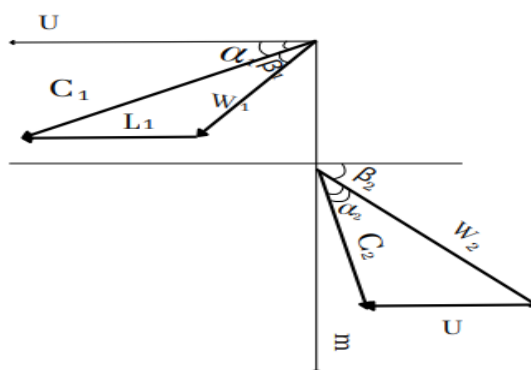


Рис. 2. Схема розподілу та напрямків руху повітряних потоків

Наведені на рис. 2 позначення визначають: C_1, W_1 – швидкість потоку газу, на виході із сопла в абсолютному та у відносному русі; U – швидкість обертання колеса мікротурбіни; C_2, W_2 – швидкість потоку газу при виході з робочого колеса в абсолютному та у відносному русі; α_1, α_2 – кути між напрямком руху робочого колеса і напрямками швидкостей C_1, C_2 ; β_1, β_2 – кути між напрямком руху робочого колеса і напрямками швидкостей W_1, W_2 .

В якості основних критеріїв оптимізації технічних параметрів мікротурбіни застосовано максимізацію ефективної потужності і коефіцієнту корисної дії та мінімізацію витрати повітря при забезпеченні достатньо високих обертів валу мікротурбіни.

Для визначення витрат стисненого повітря з використанням схеми його подачі через надзвукові сопла запропоновано використовувати таку розрахункову модель:

$$G = m * F_{кр} * \frac{P_0^*}{\sqrt{T_0^*}} * \lambda L; F_{кр} = Z I_{кр} = 4 \frac{\Pi D^2}{4}. \quad (1)$$

Проведені за формулою (1) розрахунки для обраних техніко-геометричних параметрів визначають такі величини витрат стисненого повітря:

$$m = 0,347, D = 1,44 \text{ мм}, h = 2,1 \text{ мм}, F_{кр} = 6,52 \text{ мм}^2, \\ G = 0,347 * 6,52 * \frac{5,06 * 10^5}{9,8 \sqrt{290 * 10^6}} * 0,81 = 6,25 * 10^{-3} \left(\frac{\text{кг}}{\text{сек}} \right). \quad (2)$$

За результатами розрахунків встановлено, що ефективний коефіцієнт корисної дії парціальної мікротурбін визначається так:

$$\eta_e = \frac{\Delta T_e^*}{T_0^* \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{0,286} \right]} \cong 0,5 - 0,6, \quad (3)$$

де: ΔT_e^* – ефективне падіння температури гальмування в турбіні; P_0, T_0^* – тиск і температура гальмування перед турбіною; P_2 – статичний тиск за турбіною.

Відповідне пониження температури гальмування в парціальній турбіні та на лопатках її колеса при парціальності $\varepsilon=1$:

$$\Delta T_e^* = \bar{\eta}_E \left[(\Delta T_{л}^*)_{\varepsilon=1} - \Delta T_f E \right] = 0,8 [31^\circ - 1 * 0,125] = 24,7^\circ,$$

$$(\Delta T_{л}^*)_{E=1} = T_0^* - T_2^* = 290^\circ - 259^\circ = 31^\circ. \quad (4)$$

За результатами проведеного дослідження ефективна потужність мікротурбіни визначається так:

$$N_e = \frac{1}{102} * \frac{k}{k-1} R \Delta T_e^* G = \frac{1}{102} \frac{1,4}{0,4} 29,27 * 24,7 * 6,25 = 0,155 \text{кВт} \cong 0,21 \text{ л. с.} \quad (5)$$

Результати проведених експериментальних досліджень дозволяють зробити висновок, що визначення оптимальних техніко-економічних параметрів турбомашини забезпечує достатньо високу ефективність одноступеневої осьової турбіни з бандажем і циліндричними свердленими соплами із закругленим входним краєм. Така турбіна має найменшу питому витрату повітря, найменші габарити а також має достатньо технологічні для виробництва техніко-геометричні параметри. Застосування мікротурбін з оптимізованими параметрами в якості приводу в ручних інструментальних машинах дозволить понизити енергетичні витрати та рівень їх вібрації і шуму.

PhD student Peremitko M.V., PhD Nadryhailo T.Zh.

Dniprovsky State Technical University

**METHODS OF ANALYZING INDIVIDUAL BLOOD PRESSURE
MEASUREMENTS: TRENDS, SEASONALITY, AND FORECASTING**

Timely detection of changes in the state of the cardiovascular system is one of the key challenges in modern medicine. Daily blood pressure measurements form time series characterized by high variability and the presence of possible seasonal components. These features are often overlooked in traditional data processing approaches, which complicates the assessment of long-term changes and potential health risks. Therefore, there is a need to develop a more in-depth approach to the analysis of such individual time series, aimed not only at identifying trends and seasonal components but also at enabling personalized forecasting of health risks.

The aim of this study is to develop and validate an approach for analyzing individual daily blood pressure measurements to identify long-term trends, seasonal fluctuations, and to forecast future changes. This approach will not only enhance the understanding of blood pressure dynamics under real-life conditions but also lay the groundwork for personalized monitoring and early detection of cardiovascular risk factors.

Linear regression is one of the fundamental statistical methods for time series analysis and is widely used in medical research to investigate long-term changes in physiological indicators. It allows for modeling the trend component, which captures the overall direction of change in the observed variable over time.

However, a major limitation of linear regression is its inability to account for seasonal components, which often exhibit cyclical patterns. To address this, seasonal decomposition methods are employed to separate a time series into three main components: trend, seasonal, and residual. Among these methods, Seasonal-Trend

decomposition based on Loess (STL) is considered one of the most effective contemporary approaches due to its flexibility and robustness [1].

Once the trend and seasonal components of the time series have been identified, the next step involves constructing forecasting models. In the context of physiological time series, such as blood pressure dynamics, three modeling approaches are commonly used: ARIMA, SARIMA, and Holt-Winters exponential smoothing [2-4].

The ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) model combines autoregressive terms, differencing, and a moving average component to capture the temporal structure of the data. For time series with pronounced seasonality, the SARIMA (Seasonal ARIMA) model extends ARIMA by incorporating seasonal autoregressive and moving average terms, making it well-suited for periodic patterns.

In contrast to ARIMA-based models, the Holt-Winters exponential smoothing method does not require the time series to be stationary. Instead, it continuously updates estimates of the level, trend, and seasonal components in real time, which makes it particularly useful for adaptive forecasting in the presence of evolving seasonal behavior.

To quantitatively compare the performance of the models, two common error metrics were used: Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE). The forecast error analysis presented in Table 1 shows that the SARIMA model achieved the lowest RMSE for systolic blood pressure (SBP), with a value of 8.06, confirming its effectiveness in capturing seasonal components. A similar result was observed for diastolic blood pressure (DBP), where SARIMA again yielded the best performance with an RMSE of 5.63, making it the optimal choice among the tested models.

While the Holt-Winters model demonstrated slightly lower accuracy—particularly for SBP—it maintained consistent predictive stability. The highest forecast errors were associated with the ARIMA model, highlighting its limitations when seasonal components are not properly accounted for.

Table 1

Model	SBP RMSE	SBP MAE	DBP RMSE	DBP MAE
ARIMA	8.313376	5.898569	5.629561	4.359530
SARIMA	8.063249	5.801833	5.627619	4.345661
Holt-Winters	8.066819	5.696488	5.815987	4.544821

Conclusions. The results of this study demonstrate that SARIMA is the most accurate and adaptable model for short-term blood pressure forecasting when seasonal patterns are present. Holt-Winters performs reasonably well in the absence of strong seasonality, while ARIMA serves better as a baseline model for capturing general trends without accounting for cyclical components.

The combined use of linear regression and STL decomposition proved effective for uncovering long-term trends and consistent seasonal patterns, respectively. These findings highlight the importance of time series analysis in understanding individual physiological dynamics and stress the need to consider seasonality in such assessments.

Since the forecasting focused on a short-term horizon (only the last 15 observations), the study suggests that longer historical records — ideally over 100 data points — are required for more accurate long-term predictions. Incorporating additional metrics such as heart rate, pulse variability, physical activity, and environmental factors may further improve the precision and personalization of blood pressure forecasting models.

References

1. Robinson, J., & Williams, S. (2020). Long-Term Trends in Home Blood Pressure Monitoring Data. *Journal of Medical Systems*, 44(12), p. 203.
2. Lee, J., & Kim, S. (2021). Application of Time Series Analysis to Blood Pressure Data. *IEEE Access*, 9, pp. 87211-87221.
3. Takeuchi, H., Kodama, N., & Takahashi, S. (2015). Time-series data analysis of long-term home blood pressure measurements in relation to lifestyle. *Studies in Health Technology and Informatics*, 216, pp. 751–755.
4. Holt, C. C. (2004). "Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages." *International Journal of Forecasting*, 20(1), pp. 5–10.

Ph.D. Razdobreev V.G., Kluychnikov K.Yu., Leschchenko A.I.,

Palamar D.G., Ph.D. Ivanov A.P.

Iron and Steel Institute of NASU

MATHEMATICAL MODELING OF VARIABLE DEFORMATION OF THE STRIP

In the production of shaped profiles from wire, for example of the tape type, the method of drawing in roller dies is used. During drawing, tensile stresses arise on the surface of the rolled product, which can lead to the destruction of the finished profile. The plasticity of metal can be increased not only by heat treatment, but also mechanically, using bending and stretching devices (DBT). Calculations of the metal stress state were performed using a mathematical model developed at the Iron and Steel Institute of the NASU. To simulate alternating metal deformation by bending and stretching, a single-plane three-roller DBT with a vertical arrangement of rollers was used. The modeling parameters were adopted taking into account the capabilities of the technological equipment of the ISI rolling laboratory. The process of alternating deformation of a 5.2 mm thick strip with a step between the centers of the axes of the support rollers of 70 mm, and the movement of the pressure roller can occur at a distance of 0 to 8 mm in the vertical direction. Modeling elastic-plastic alternating bending of metal in the SolidWorks Simulation system includes the following stages: 1) model setup – creation of a finite element model of the strip, which is placed between the upper and lower rollers; 2) vertical movement of the lower pressure roller upwards to the working position, ensuring fixation of the given displacement value; 3) applying gravity to the system in the absence of roller motion; 4) providing the speed of rotation of the rollers to simulate the movement of the staff due to the friction forces between it and the rollers; 5) assessment of the elastic unloading of the material after leaving the DBT.

The material of the rollers is steel grade 40Cr. The material of the strip is steel grade St.08 with the properties obtained during the testing of the samples. The following characteristics of the strip material were also used in the calculation: density $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$; Poisson coefficient $\nu=0.3$; modulus of elasticity of the first kind $E=2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$. The model of the deformed medium is elastic-plastic. A contact interaction with a friction coefficient of 0.25 was determined between the pressure roller and the lower surface of the strip.

Fig. 1 shows that under the support roller, the upper fibers of the strip material are compressed and the lower ones are stretched. Under the lower pressure roller, the upper fibers of the strip material are stretched and the lower ones are compressed. Under the second support roller, the upper fibers of the strip material are compressed again and the lower ones are stretched.

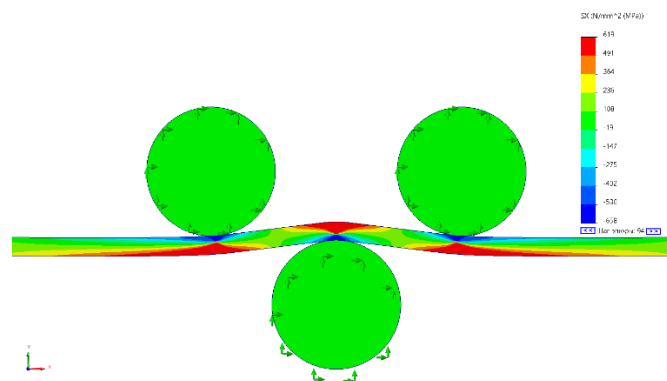


Fig. 1. Stress distribution in steel strip of grade St.08 along the length of the DBT when modeling alternating deformation in a three-roller device with vertical movement of the pressure roller upwards by a distance of 4 mm

According to the results of the modeling, graphs of the distribution of stresses σ in all cross-sections of the strip along its length were constructed. From the analysis of the data, it was determined that the distribution of stresses that stretch and compress along the thickness of the strip is complex and significantly uneven. Modeling the deformation process of the strip in the DBT showed that there is a cyclic change in both the sign of the stresses and the magnitude of these stresses, i.e.

it leads to a significant non-uniformity of longitudinal stresses along the thickness of the strip.

After the strip leaves the DBT, the pressure on the strip is relieved, that is, the strip undergoes elastic unloading, which leads to a decrease and redistribution of internal stresses. According to the results of modeling to compare the stress state of the strip made of St.08 steel, graphs of stress distributions in the cross-section of the strip under the pressure roller (Fig. 2) and after elastic unloading at the exit from the DBT (Fig. 3) were constructed.

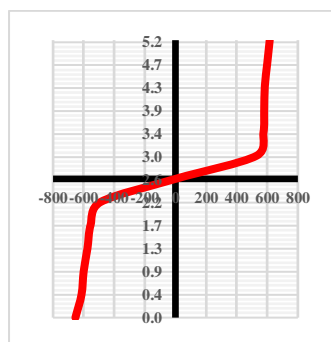


Fig. 2. Distribution of longitudinal stresses along the thickness of the strip under the pressure roller during alternating deformation, MPa

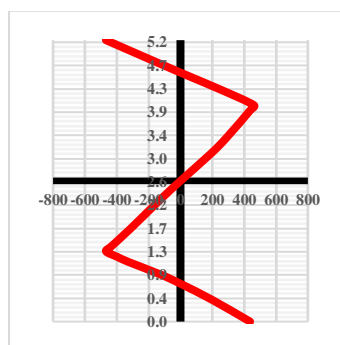


Fig. 3. Distribution of longitudinal residual stresses after the strip leaves the DBT device, MPa

From the analysis of the data in Fig. 2, it is clear that under the pressure roller in the upper layers of the metal, tensile stresses are formed with a maximum value of +616 MPa on the upper layer, and compressive stresses are formed on the lower layer with a maximum value of -654 MPa during the deformation process in the DBT. The simulation results showed that after elastic unloading (see Fig. 3), the sign of the stresses changes: in the upper layers of the strip, compressive residual stresses with a

maximum value of -468 MPa are observed, and in the lower layer, tensile residual stresses with a maximum value of $+439$ MPa, i.e., there is an equilibrium of the residual stresses of the upper and lower surfaces of the strip. A comparison of the maximum values of stresses that arise during the process of alternating deformation under the pressure roller and after the DBT shows that after elastic unloading they decrease by an average of 1.4 times, regardless of the sign of the stresses.

Д. ф.-м.н. Пасічник А. М., асп. Ріпа М. Ю.

Дніпровський державний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ СИСТЕМИ УКРИТТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ДІАГРАМ ЛАГЕРРА-ВОРОНОГО

Актуальність роботи обумовлена сучасними умовами зростаючої небезпеки для населення, зумовленої як воєнними загрозами, так і природними катастрофами, питання ефективного просторового розміщення укриттів набуває особливої актуальності. Необхідність забезпечення оперативного доступу населення до найближчих укриттів вимагає використання математичних методів, що дадуть змогу моделювати та оптимізувати таке розміщення з урахуванням топографії території, щільності забудови, характеристик інфраструктури та демографічного розподілу.

Одним із потужних інструментів для вирішення задач такого типу є діаграми Вороного – геометричні конструкції, що дозволяють розподілити простір на області впливу навколо заданих центрів, що є місцями розташування укриттів. Кожна така область охоплює ту частину території, для якої відповідне укриття є найближчим. Таким чином, отримана діаграма надає природне розбиття території населеного пункту на зони швидкого доступу до укриттів.

Застосування цього підходу дозволяє виявити проблемні ділянки з недостатнім покриттям, оцінити зони надмірного перекриття і, головне,

оптимізувати кількість та координати розміщення укриттів, аби мінімізувати середній та максимальний час, який буде витратити населення, щоб дістатися до них. На відміну від класичних рішень із фіксованими радіусами дії, діаграми Вороного є гнучкими до неоднорідної забудови та можуть бути адаптовані з урахуванням обмежень, таких як наявні будівлі, рельєф, транспортна доступність, густина населення, а також різні категорії населення.

Вдосконалення даного підходу можливе шляхом використання зважених діаграм Вороного або діаграм Лагерра-Вороного, що дозволяє враховувати неоднакову ємність укриттів, а також різну швидкість доступу залежно від типу місцевості та відповідної інфраструктури населеного пункту. У такому випадку кожне укриття характеризується не лише просторовими координатами, а й параметрами ваги, які впливають на формування зон обслуговування.

Математична модель задачі включає побудову зваженої функції відстані, яка враховує геометричну відстань до укриття та інші характеристики і особливості місцевості (наприклад: час доступу, природні перешкоди, густина забудови), що дозволяє сформувати більш ефективну модель розміщення системи укриттів. Зони впливу укриттів візуалізуються у вигляді полігонів, обмежених відрізками радикальних осей, що забезпечує створення наглядної схеми для просторового аналізу та прийняття рішень, рис.1.

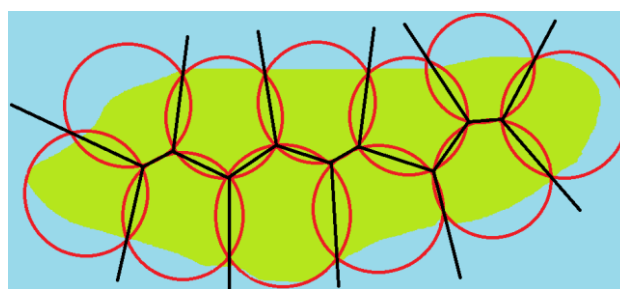


Рис. 1. Схема діаграми Лагерра-Вороного для розміщення 11 укриттів

Такий підхід достатньо ефективно можна використовувати для планування нових укриттів у районах з дефіцитом покриття, проведення перевірок ефективності наявної мережі укриттів, оцінювання досяжності укриттів у

надзвичайних умовах, прийняття рішень щодо мобільних або тимчасових споруд, створення систем підтримки прийняття рішень для органів місцевої влади та служб цивільного захисту.

Таким чином, застосування діаграм Вороного для моделювання та оптимізації розміщення системи укриттів дасть змогу забезпечити не лише рівномірний доступ, але й досягти балансу між ефективністю, безпекою населення та економічною доцільністю інфраструктурних рішень. А подальше поєднання такого підходу з геоінформаційними системами може дозволити автоматизувати розрахунки для конкретних міст або регіонів із урахуванням актуальних картографічних даних.

К. техн. н. Романюк О.Д., асп. Романюк Я.О., асп. Поліщук В.Ю.

Дніпровський державний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОЇ МАСИ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС МЕХАНІЧНИХ ПЕРЕДАЧ

На основі динамічної моделі машинного агрегату, побудованої із застосуванням принципу зведення сил, моментів сил та моментів інерції мас, вирішена задача вибору оптимальної маси зубчастого колеса, яка виконувала б функцію маховика з метою стабілізації кінематичних та динамічних характеристик машинного агрегату.

Характер зміни приросту кінетичної енергії механізму ΔT за час усталеного руху (швидкість ланки зведення $\omega = const$) відповідає зміні зведеного моменту інерції ΔJ ,

$$\Delta T = \Delta J \frac{\omega^2}{2}.$$

Маховий момент, який необхідний для стабілізації роботи виконавчого органу машино визначається рівнянням

$$J_M = \frac{\Delta T}{\omega^2 \delta}.$$

Відповідно, процес моделювання оптимальної маси зубчастого колеса, з урахуванням питомої ваги матеріалу ρ , базується на визначенні маси обода зубчастого колеса

$$m = \sqrt{\frac{\Delta T \pi \rho}{\omega^2 \delta}} \sqrt{b} = B \sqrt{b}.$$

Відповідно, масу зубчастого колеса можна розглядати як функцію ширини вінця b зубчастого колеса,

$$m = B \cdot f(b).$$

Отримане рівняння на етапі попереднього проектування дає можливість варіювати шириною вінця зубчастого колеса для підбору необхідної махової маси.

К. техн. н. Романюк О.Д., асп. Романюк Я.О., асп. Жуков Ф.Ф.

Дніпровський державний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЗУБЧАТИХ КОЛІС

Умова взаємодії між деталями зубчастої передачі виражаються рівняннями зв'язку, які описують функціонування передачі, особливість яких полягає в тому, що кількість невідомих величин проектування набагато більше ніж рівнянь. Занадто велика кількість невідомих величин проектування суттєво ускладнює і без того багатоваріантність задачі. В даному випадку вибираємо, що маса зубчастого колеса механічної передачі буде залежати від наступних основних невідомих перемінних величин проектування: передаточне число редуктора u ; нормальний модуль зачеплення m_n ; кількість зубів зубчастого

колеса z ; кут нахилу зуба β ; коефіцієнт ширини вінця зубчастого колеса по міжосьовій відстані ψ_{ba} .

Відповідно цільова функція маси може бути записана в наступному виді

$$F_M = f(u, m_n, z, \beta, \psi_{ba}).$$

Використавши математичну модель шестерні рішення цільової функції маси може бути записано в наступному виді

$$M = \frac{\pi \rho \psi_{ba}}{8} (1 + u) \left(\frac{m_n z_1}{\cos \beta} \right)^3.$$

Отримана залежність дає можливість підібрати відповідну масу зубчастого колеса моменти інерції якого відповідав би маховому моменту маховика, який необхідний для стабілізації динамічних характеристик виконавчого органу машини.

Крім того, аналіз залежності вказують на те, що кут нахилу зуба не суттєво впливає на зміну маси. Це спрощує можливість, на етапі попереднього проектування, оптимізувати вибір коефіцієнтів ψ_{ba} та m_n для отримання відповідної маси зубчастого колеса механічної передачі.

К. техн. н. Романюк О.Д., асп. Романюк Я.О., асп. Невстакай О.С.

Дніпровський державний технічний університет

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МАШИННОГО АГРЕГАТУ

Пошук методів оптимізації кінематичних та динамічних характеристик машинного агрегату в сталому режимі роботи на сучасному етапі є актуальним і в основному вирішується методом математичного моделювання.

На основі математичній моделі машинного агрегату, яка складається з трьох елементів: електродвигуна; передаточного механізму; виконавчого

органу машини, можливо побудувати три варіанти динамічних моделей в залежності від вибору ланки зведення.

За ланку зведення вибирається:

- головний вал виконавчого органу машини;
- швидкохідний вал передаточного механізму;
- вал електродвигуна.

Найбільш оптимальним розв'язанням задач оптимізації кінематичних та динамічних параметрів машинного агрегату є комплексний підхід, який полягає в проектуванні не схеми приводу, а машинного агрегату в цілому, тобто, використовуючи тільки стандартний електродвигун, а виконавчий орган машини бажано проектувати разом з механізмом приводу. Такий підхід забезпечує оптимальне розв'язання практично будь-якої задачі, яку ставить перед інженерами та конструкторами сучасне виробництво, так як, дає можливість підбору відповідних мас ланок складальних одиниць, моменти інерції яких відповідають маховому моменту маховика, що забезпечить необхідну стабілізацію кінематичних та динамічних характеристик машинного агрегату. А відповідно, метод компоновання схеми приводу машинного агрегату із стандартних механізмів можна вважати застарілим та економічно не вигідним, оскільки він обумовлює підвищення габаритних розмірів, надлишкову масу, нерівномірний термін довговічності та рівень надійності відповідних елементів системи.

Д. техн. н. Самохвалов С.Є., к. техн. н. Піптюк В.П., Греков С.В.

Інститут чорної металургії НАН України

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСНИХ ПРОЦЕСІВ У КОВШІ ПРИ ВВЕДЕННІ ДОБАВОК З ВІДМІННОЮ ВІД РІДКОЇ СТАЛІ ГУСТИНОЮ

Позапічна обробка сталі передбачає введення модифікуючих та легуючих матеріалів у рідкий метал у ковші. Відомо, що теплова і гідродинамічна обстановка в ковші суттєво впливає на ступінь засвоєння легуючих компонентів та ефективність рафінування розплаву. У випадку, коли густина введених матеріалів близька до густини сталі, нами було розроблено одношвидкісну математичну модель колективного введення добавок у ківш [1]. Однак при введенні речовин з питомою густиною, значно меншою або більшою за густину рідкої сталі (наприклад, шлакоутворюючі суміші та феросплави), одношвидкісна модель втрачає точність.

У роботі пропонується новий підхід до моделювання тепломасопереносних процесів у ковші при колективному введенні модифікуючих і легуючих матеріалів, питома густина яких суттєво відрізняється від густини рідкої сталі. Основна новизна полягає у розгляді трифазного середовища з розплавом сталі у якості несучого середовища, а також дисперсних газової фази та фази домішок, що вводяться, причому середовище розглядається як система з двома полями швидкостей – для металевого розплаву та для дисперсної фази введених матеріалів. Швидкість газової фази визначається за емпірично заданою швидкістю спливання пазирів газу. Підхід, що пропонується, дозволяє адекватніше відобразити реальну картину тепломасообміну і руху фаз.

Математична постановка задачі

Пропонується розгляд динаміки двох фаз:
- Перша фаза – металевий розплав зі швидкістю \bar{u} і температурою T ;

- Друга фаза – тверді (або рідкі) частинки з густиною ρ^P , швидкістю \vec{v} і температурою T^P .

В основу моделі покладено рівняння масопереносу для розплаву сталі та домішкової дисперсної фази:

$$\partial\rho/\partial t + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{u}) = 0, \quad \partial\rho^P/\partial t + \vec{\nabla} \cdot (\rho^P\vec{v}) = S_m, \quad (1)$$

а також рівняння руху розплаву:

$$\rho(\partial\vec{u}/\partial t + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u}) = -\vec{\nabla} p + \mu_e \Delta\vec{u} + \vec{F}_{inr} + \rho\vec{g} \quad (2)$$

та домішкової дисперсної фази:

$$\rho^P(\partial\vec{v}/\partial t + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v}) = -\vec{\nabla} p^P + \mu_e^P \Delta\vec{v} + \vec{F}_{drag} + \rho^P\vec{g}, \quad (3)$$

де \vec{F}_{inr} – сила взаємодії між фазами, зокрема опірна сила $\vec{F}_{drag} = \beta(\vec{u} - \vec{v})$, де β – коефіцієнт спряження, який залежить від розміру частинок та в'язкості середовища. Теплова сторона процесу, який розглядається, описується рівнянням:

$$C_e \rho(\partial T/\partial t + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})T) = \lambda_e \Delta T + \theta, \quad (4)$$

де джерело θ визначається тепловими ефектами початкового прогріву домішок та фазовими перетвореннями і конкретизується при розгляді окремих процесів. Ефективні коефіцієнти C_e та λ_e враховують присутність у розплаві дисперсних фаз і можуть бути визначені за формулами, наведеними в [2], де також пояснені деякі не описані тут позначення.

Наведені рівняння пропонується розв'язувати методом розщеплення за фізичними факторами [2] з подальшою програмною реалізацією в середовищі Visual Studio 2022 на мові програмування C#.

Очікувані результати та перспективи

– Вперше на етапі позапічної обробки сталі запропоновано роздільне моделювання руху розплаву та колективно введеної дисперсної фази;

- Модель враховує вплив густини, розміру частинок та швидкості введення;
- Сприяє оптимізації технології введення легуючих елементів.

Запропонована модель дає змогу описати складні гідродинамічні і теплові явища при введенні матеріалів з питомою густиною, відмінною від густини сталі. Планується подальша верифікація моделі методами фізичного моделювання.

Список використаних джерел

1. Самохвалов С. Є., Піптюк В. П., Греков С. В. Вплив кількості добавки на гідродинаміку металеві ванни у ковші // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії, 2023. Вип. 37. С. 231-245.
2. Огурцов А.П., Самохвалов С.Є. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах. К.: Наукова думка. 2001. 412 с.

**Д. техн. н. Самохвалов С. Є., д. техн. н. Чернятевич А.Г.,
к. техн. н. Молчанов Л.С.**

Інститут чорної металургії НАН України

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСНИХ ПРОЦЕСІВ У КОНВЕРТЕРІ, СПРИЧИНЕНИХ ВПЛИВОМ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ФАКЕЛУ

Свого часу цікава ідея попереднього нагрівання металевого брухту у порожнині конвертера шляхом спалювання пиловугільного палива, що вноситься в конвертер за допомогою газу-носія була запропонована і випробувана на невеликій кількості плавок в ІЧМ НАНУ [1].

В даній роботі запропоновано математичну модель тепломасопереносних процесів у конвертері, які виникають при нагріванні металобрухту за допомогою пиловугільного факелу. В основу математичної моделі покладені наступні основні припущення:

1. Окремі факели нехтувано мало впливають один на другий, тому розгляд ведеться для кожного факела окремо.

2. Задача прийнята циліндрично-симетричною відносно осі факела, зокрема відхиляючою дією сили тяжіння на рух твердої фази (порошинок вугілля) нехтуємо.

3. Сумарний об'ємний вміст порошинок вугілля в газовій фазі при витратах, що вивчаються, невеликий, тому воно розглядається як дисперсна фаза.

Математична модель, з урахуванням зроблених припущень, будується за методикою, що описана в роботі [2] (позначення, що використовуються, також вибрані у відповідності з даною роботою).

Крім несучої газової фази з об'ємною густиною α , присутня дисперсна фаза палива (порошку вугілля) з об'ємною густиною β , для якої справедливе рівняння:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\beta \vec{v}_b) = \vec{\nabla} \cdot (D_b \vec{\nabla} \beta) - x_b \psi, \quad (1)$$

де \vec{v}_b – швидкість фази β , D_b – ефективний коефіцієнти дифузії, що враховує турбулентні складові і $x_b \psi$ – об'ємна густина стоку фази β (палива), наявність якої зв'язана з горінням порошку вугілля в факелі, $x_b := \rho_g^o / \rho_b^o$, де ρ_g^o і ρ_b^o – істинні густини газової фази і палива відповідно.

Кінетика горіння порошку вугілля, яка в нашій моделі представлена величиною ψ , визначається згідно даним, наведеним в роботі [3].

Швидкості газової фази \vec{v}_g і дисперсної фази порошку вугілля \vec{v}_t визначаються з рівнянь, які згідно першому та третьому припущенням нашої моделі записуються у вигляді:

$$\alpha \frac{d_g \vec{v}_g}{dt} = \Delta (\vec{v}^k v_g^k) - \psi \vec{v}_g - \vec{\nabla} p' + \vec{f}_{gt}, \quad (2)$$

$$\beta \frac{d_t \vec{v}_t}{dt} = x_b \psi \vec{v}_t + \vec{f}_{tg}. \quad (3)$$

Тут $\frac{d_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \vec{\nabla}$ – субстанційна похідна i -ої фази (несучої газової при $i = g$, чи дисперсної при $i = t$), $p' = p / \rho_g^o$ – тиск, нормований на дійсну густину газу, $\vec{\bar{\nu}}$ – тензор ефективної кінематичної в'язкості, що враховує турбулентні ефекти, \vec{f}_{tg} та \vec{f}_{gt} – густини сил міжфазної взаємодії. При записі рівняння (3) прийнято, що через розрідженість твердої фази в факелі взаємодія між порошинками вугілля відсутня.

Теплова сторона розглянутого процесу описується рівнянням:

$$C_r \frac{dT}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda'_e \vec{\nabla} T) + x_b \kappa L \beta, \quad (4)$$

де C_r і λ'_e – ефективні теплоємність і нормована на густину теплопровідність (яка враховує турбулентні ефекти) дисперсного середовища в цілому, L – теплова здатність вугілля, а $\frac{d}{dt}$ – середнеоб'ємна субстанційна похідна. В рівнянні (4) під T розуміємо середнеоб'ємну температуру середовища, яка в нашому наближенні малості об'ємного вмісту твердої фази в середовищі наближено співпадає з температурою газової фази. Тут прийнято [2]:

$$C_r = C_g (1 - \beta) x_b + C_t \beta, \quad (5)$$

де C_t і C_g — теплоємності вугілля і газу відповідно. Що стосується ефективної нормованої на густину теплопровідності середовища λ'_e , то внаслідок явно турбулентного режиму руху середовища, вона визначається, в основному, турбулентними ефектами, оскільки в нашому випадку, турбулентний механізм переносу тепла набагато перевищує молекулярний.

Список використаних джерел

1. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі. Підручник. Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. 454 с.
2. Огурцов А.П., Самохвалов С.Є. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах. К.: Наукова думка. 2001. 412 с.
3. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. Москва: Энергоатомиздат. 1986. 208 с.

Д. техн. н. Серета Б.П., Зюзін Є. П., Орел В.Г., Глушенко А.О.

Дніпровський державний технічний університет

MODELING OF THE GAS ENVIRONMENT DURING HARDENING OF KAMAZ-6520 ENGINE PARTS

Thermodynamic modeling of processes involves performing a complete thermodynamic analysis of the equilibrium state of a system that is considered as a conditionally isolated material domain. The calculation of the thermodynamic equilibrium of arbitrary systems, including the determination of equilibrium parameters, thermodynamic properties, as well as chemical and phase composition, is carried out by minimizing the isobaric-isothermal potential G or maximizing the entropy of the system S , taking into account all potentially equilibrium individual substances [1]. This approach allows us to obtain accurate predictions of the composition and properties of the system under given conditions.

The kinetic regularities of chemical processes under non-stationary temperature conditions are determined by both temperature conditions and diffusion factors. It is assumed that at the heating stage, the inhibition of diffusion processes in the gas phase is insignificant, and the rate of temperature change is much lower than the rate of gas-phase chemical reactions [2]. This allows us to assume that the equilibrium composition of reaction products is established for each temperature. Thus, by calculating the equilibrium composition of products for a range of temperatures, it is possible to track the chemical dynamics of the process.

At temperatures above 800 K, the proportion of the condensed phase stabilizes, indicating that reactions in the range of 800-1600 K proceed with the release of condensed products without changing the total number of molecules. This is typical for decomposition, disproportionation, or exchange reactions occurring with the substrate, which underlie the processes of chemical transfer of elements in the system. Thermodynamic modeling and analysis of kinetic laws allow not only to

predict the results of chemical transformations, but also to optimize the conditions of processes, which is important for the development of new materials and technologies. Depending on the amount of boron and ammonium gas transport agents, gaseous compounds When strengthening the engine parts of the KAMAZ-6520 (AlH, AlH₂, AlF, AlF₂, Al₂F₆, AlHF, AlH₂F, AlI, AlI₂, AlI₃, Al₂I₆, Cr, Cr₂, CrH, CrOH, CrF, CrF₂, CrF₃, CrI, CrI₂, CrI₃, BH, BH₂, BH₃, BOH, HBO₂, BF, BF₂, BF₃, BHF BI, BI₂) and condensed phases (Al(c), B(c), Al₂O₃(c), AlI₃(c), AlN(c), Cr(c)).

References

1. Muthiah, P., Palaniappan, G., & Raj, S. (2022). Boriding of steels: Improvement of mechanical properties – A review. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 26 (2), 1–15. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2022041805>
2. Zhang, Z., Wang, L., & Li, Q. (2019). High-performance coatings for industrial applications. *Journal of Coating Technology*, 21(5), 1024-1035. <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00264-1>

Д. техн. н. Серета Б.П., Комендаров К.М., Стасевич О.О., Дробот Д.Я.

Дніпровський державний технічний університет

THERMODYNAMIC MODELING OF THE GAS ENVIRONMENT DURING HARDENING OF THE CAR CHASSIS PARTS KRAZ-7133S4

The application software package “ASTRA” was used to calculate the equilibrium composition of the products of the studied system. During the calculations, the database of thermodynamic properties of individual compounds was used, which contains detailed information. To ensure the mandatory presence of the gas phase, 1% argon was added to the initial composition of the model. In all cases, the pressure was assumed to be equal to atmospheric pressure (0.098 MPa), which allowed for calculations in a wide range of changes in the input components depending on temperature [1]. The results of the thermodynamic analysis of possible reactions in the temperature range of 400-1600 K demonstrated that the products of thermal decomposition of activators (I₂, NH₄Cl) actively interact with the oxide film

on the aluminum surface, which precedes the reduction reactions and is accompanied by the formation of gaseous compounds such as AlI , AlI_2 , Al_2I_6 , CrF_2 , CrI_2 , CrI_3 , $TiCl_3$, $TiCl_4$, TiI_2 , etc. As the temperature increases, the amount of gaseous products increases, and condensed phases are released in parallel when strengthening parts of the car chassis KRAZ-7133S4 (Fig. 1). In the temperature range of 1200-1800 K, the main components of the gas phase are iodides, fluorides, and chlorides of elements such as chromium, aluminum, boron, titanium, and silicon.

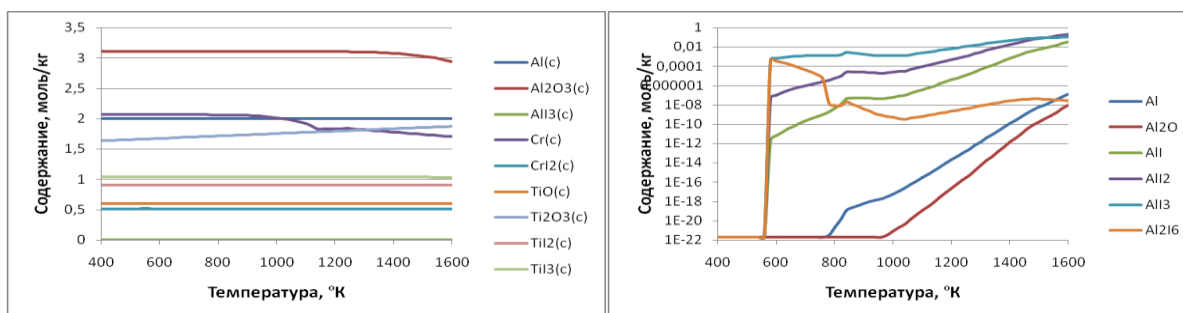


Fig. 1. Content of condensed and gaseous aluminum for the system Cr-Al-Ti

Characteristically, in the temperature range of 400-1600 K, the fraction of the condensed phase decreases, which is associated with the evaporation of a single gas transportation medium. At the same time, starting from temperatures of 400 K, its decomposition occurs, as evidenced by the appearance of decomposition products in the system and an increase in the number of gas moles.

References

1. Sereda B., Sereda D., Kryhliyak, I., Kryhliyak, D. Modification of the surface of copper alloys with aluminum in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2023, (2), P. 130–133. DOI:10.46813/2023-144-130.

Д. техн. н. Серода Б.П., Кіфорук Д.О., Скрєбков К.О., Краневальд В.О.

Дніпровський державний технічний університет

GAS PHASE MODELING DURING STRENGTHENING OF PARTS OF THE GAZ-31105 CAR ENGINE

The technology of obtaining coatings in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis, combined with chemical transport reactions, is devoid of these shortcomings and provides high (up to 95%) stability of processing results. Sampling of the mother liquor of the sulfate department was performed. The choice of this environment is due to its high corrosion activity and propensity to provoke local types of corrosion damage.

The composition of the mother liquor is as follows: sulfuric acid - 3-4% of the mass; ammonium sulfate - 380–458 g/l; chlorides – 1,8–2,5 g/l; rhodanide – 0,1-0,3 g/l; pyridine bases - 12–15 g/l. Laboratory electrochemical measurement of corrosion activity, which consists in removing potentiostatic curves, was used to monitor the corrosion activity of working solutions. Corrosion activity was determined by electrochemical method, based on potentiostat EP-20A, automatically controlled by a computer program. Measurements were performed in a glass three-electrode cell with separated electrodes with free access of oxygen to the cell. Values at the electrode potentials were measured relative to the saturated chloride of the silver electrode $E_0 = -0.222$ V. As an auxiliary electrode used a platinum plate, the working electrode was a sample of steel. The corrosion current was determined from the analysis of polarization curves, the transmission relationship between the electrode potential of the steel electrode and the dissolution current density of steel during polarization from an external source of direct electric current. The corrosion current density is proportional to the corrosion rate of the metal in the test medium, which was determined by extrapolating the Tafel sections on the obtained polarization curves to the value of the free corrosion potential.

Samples of the studied materials were installed in the most aggressive environments of the sulfate department. The test was performed in a saturator. It follows from the voltammetry that the protective coatings inhibit both the anode and cathode corrosion process. At a potential of +0.1 volts, the maximum anode dissolution current is observed, which decreases to a potential of + 0.8 V and a current of 0,8 mA/cm² (aluminotitan coatings in 15% aqueous sulfuric acid solution). The corrosion rate calculated from voltammograms is $55 \cdot 10^{-5} - 22 \cdot 10^{-6}$ A/cm².

References

1. Improving the corrosion resistance of steel and alloys in coal-tar processing / S. V. Nesterenko, V. M. Troshin, L. P. Bannikov, V. V. Karchakova. *Coke and Chemistry*, 2016. vol. 59. № 10, P. 389–395.

Д. техн. н. Серета Б.П., Суслов І.В., Гуляєв К.В., Удод А.М.

Дніпровський державний технічний університет

MODELING OF GAS ENVIRONMENT WHEN STRENGTHENING BUS STEERING DETAILS

Modern conditions of operation of parts of machines, equipment, tools, mechanisms, units of units of responsible purpose put forward increased requirements for their reliability, working life and physical and mechanical characteristics. In mechanical engineering, a significant part of the production cost is formed by the costs of repairing equipment, assemblies and units. At the same time, the raw materials used in the production of high-quality and alloyed steels are limited. An effective and economically feasible method of solving these problems is the creation of structural materials with various functional (heat-resistant, corrosion-resistant, wear-resistant) protective coatings on working surfaces.

The influence of residual stresses on the bearing capacity of structures under static and cyclic loading is well known [1]. It should be noted that during static

loading of technological equipment, under conditions of normal temperatures, residual stresses have an insignificant effect on reducing the strength of materials. Residual stresses appear after SHS treatment under the conditions of thermal self-ignition of SHS charges. However, under conditions of cyclic loading, especially under loading with a low level of stress, under the conditions of operation of naval equipment, their influence is clearly manifested in a significant reduction of the endurance limit of the material and an increase in the rate of fatigue crack development. Tensile residual stresses are one of the main causes of corrosion cracking, as a result of which brittle destruction of the metal is observed under the simultaneous action of a corrosive-active environment and mechanical stresses. Protective coatings, which are obtained during the thermal self-ignition of SHS-charges, lead to a change in the phase and chemical composition of the doped coating, which causes residual stresses. During the cooling of the reactor as a result of the elastic interaction of the alloyed titanium coating and the structural material, we have thermal expansion due to the thermal effect [2].

References

1. Improving the operational stability and efficiency of industrial transport in the conditions of a metallurgical enterprise: monograph / B.P. Sereda, S.M. Turpak, I.V. Kruglyak, O.O. Ostrohlyad, D.Y. Mukovska, D.B. Sereda, D.O. Kruglyak - Kamianske: DSTU, 2021. - 272 p.
2. Surface hardening of materials working in conditions of complex exposure to aggressive substances: monograph / B.P. Sereda, L.P. Bannikov, S.V. Nesterenko, I.V. Kruglyak et al. - Kamianske: DSTU, 2019. - 173 p.

К. ф.-м. н. Стрєва В.О.¹, к.е.н. Нужна С.А.²,

здобувач Пузїк А.О.¹

¹Дніпровський державний технічний університет

²Дніпровський аграрно-економічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМ

У роботі [1] досліджувалася задача оптимального використання зрошувальних систем. У представленому дослідженні проведено математичне моделювання задач проектування зрошувальних систем. Розроблені моделі є неперервними багатопродуктовими задачами оптимального розбиття множини $\Omega \in E^n$ на її неперетинні підмножини $\Omega_1^1, \dots, \Omega_N^1; \Omega_1^M, \dots, \Omega_N^M$ (серед яких можуть бути і порожні) з розміщеними центрами цих підмножин при обмеженнях у вигляді рівностей та нерівностей. А саме, задано множини Ω – це територія, яка потребує зрошування, підживлення та обробки від шкідників (надалі ресурсів) засобами трьох зрошувальних станцій (СЗ). Попит $\rho^j(x, y)$ на ресурси розподілений в області Ω з відповідними щільностями, заданими у аналітичному або дискретному вигляді:

Функції $\varphi_i^j(Y_i^j)$, які описують умовні вартості збереження j -го виду ресурсу на i -їй станції в залежності від потужності СЗ, мають вигляд

$$\varphi_i^j(Y_i^j) = T_i + a_i^j Y_i^j, \quad i = \overline{1, 3}, \quad j = 1, 2, 3,$$

де потужність Y_i^j i -ї СЗ по постачанню j -го ресурсу визначається за формулою: $Y_i^j = \iint_{\Omega_i^j} \rho^j(x, y) dx dy$. Величина $a_i^j \geq 0$ – витрати на збереження одиниці ресурсу j -го виду на i -їй станції. T_i – капітальні витрати на будівництво i -ї СЗ. Потужність i -ї СЗ по всім видам ресурсів визначається сумарним попитом насаджень, які належать Ω_i^j , $i = \overline{1, 3}$, та для

станції i не повинна перевищувати задані об'єми, тобто на потужності станцій

$$\text{накладені обмеження: } 0 \leq \sum_{j=1}^3 \iint_{\Omega_j^i} \rho^j(x, y) dx dy \leq b_i, \quad i=1, 2, 3.$$

Необхідно розбити множину насаджень Ω на їх зони зрошення трьома станціям зрошення по кожному виду ресурсів, тобто на підмножини Ω_i^j , $i=\overline{1, 3}$, $j=\overline{1, 3}$, так, щоб мінімізувати функціонал сумарної вартості витрат на зберігання ресурсів і доставку їх до зон розбиття:

$$F(\{\Omega_1^1, \dots, \Omega_3^1; \dots; \Omega_1^3, \dots, \Omega_3^3\}) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left\{ \iint_{\Omega_j^i} c^j(x, y, \tau_i) \rho^j(x, y) dx dy + \varphi_i^j(Y_i^j) \right\},$$

В результаті математичного моделювання та чисельних досліджень ряду модельних задач отримано значення оптимальних потужностей СЗ та відповідні схеми розбиття, зокрема у наступному вигляді:

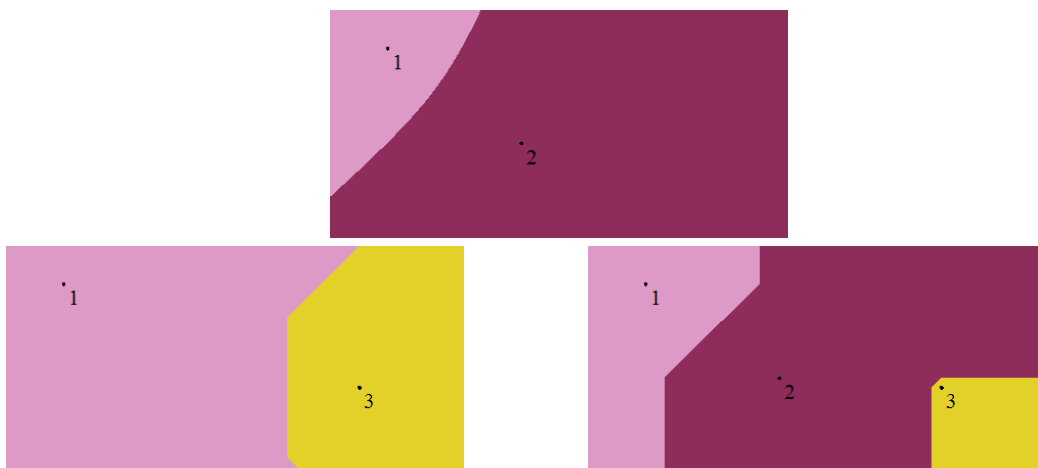


Рис.1. Оптимальне розбиття множини Ω на зони зрошення кожною з 3 станцій зрошення з фіксованими центрами по 3 видам ресурсів

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку більш складних моделей, що враховуватимуть особливості рельєфу місцевості, тощо.

Список використаних джерел

1. Строева В.О., Косенко А.Р., Пузік А.О., Тарасюк О.С. Задача оптимального використання зрошувальних систем. Проблеми математичного моделювання: всеукр. наук.-метод. конф., 24-26 травня 2023 р.: тези допов. Кам'янське, 2023. С. 28-30.

К. техн. н. Теліпко Л.П.
Дніпровський державний технічний університет
**ДО ПИТАННЯ МОДУЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОМИСЛОВИХ
ВИСОТНИХ СПОРУД**

В різних галузях промисловості широко застосовуються висотні споруди: етажерки різного призначення, на яких розташовано технологічне обладнання; транспортні галереї та вихлопні труби в просторових стержньових призмах. Довготривале несприятливе поєднання технологічних, кліматичних та динамічних навантажень часто приводять до їх руйнувань.

Адекватність динамічних розрахунків таких об'єктів реальності у більшості залежить від вибору коректної динамічної моделі. Для отримання напруженого стану об'єкта, що відповідає дійсності, при виборі динамічної моделі треба віддавати перевагу не стільки більшому числу степенів вільності, як урахуванню особливості просторової роботи усїєї нелінійної системи та її взаємодії з зовнішніми впливами і середовищами. Прийнята динамічна модель повинна враховувати складні форми сумісних згинально-обертових коливань, дозволяти аналізувати рух з резонансними явищами, критичними режимами роботи, з розривами зв'язків та іншими якісно нестандартними впливами. Для інтегральної динамічної діагностики технічного стану таких об'єктів прийнята динамічна модель повинна дозволяти визначати увесь спектр частот і форм власних коливань споруди.

По результатам комп'ютерного модулювання був зроблений аналіз частот і форм власних коливань прольоту транспортної галереї за трьома динамічними моделями: 1 – плоска модель; 2 – модель, що являє собою просторовий блок ферм і інших елементів галереї; 3 – просторова модель, що включає просторовий блок несучих ферм (модель 2) і дві опори. Аналіз показав, що для дослідження усіх нижчих форм власних коливань, які відповідають поперечному згинанню з закручуванням необхідно обов'язково застосовувати модель 3. Нехтуванням пружною роботою опорних конструкцій (модель 2) приводить до завищення частот нижчих форм власних коливань.

**Tkach A.O., Cand. Sc. Tech. Zhulkovska I.I.,
Cand. Sc. Tech. Zhulkovskyi O.O., Vokhmyanin H.Ya.**

Dniprovsky State Technical University

TYPING OF PROGRAMMING LANGUAGES AS A FACTOR OF RELIABILITY OF COMPUTER MODELING

In modern engineering, computer modeling plays a key role in the design, analysis, and optimization of complex systems and processes. The reliability of such models depends not only on mathematical methods but also on the means of software implementation – particularly the type system, which defines the rules for working with data types, ensures operation compatibility, and enables the detection of errors at compile time or during runtime [1]. Proper type usage helps prevent logical errors, enhance computational safety, and ensure predictable model behavior. Modern approaches include the use of dependent types, which allow control not only over data types but also over units of measurement and valid physical parameters [2].

Statically typed programming languages such as C/C++, Rust, Fortran, Ada, Kotlin, and Haskell allow for the detection of typical errors before program execution. This is particularly important when modeling heat conduction, fluid dynamics, or electrical circuits [3]. Dynamically typed languages – such as Python, Julia, MATLAB, and JavaScript – offer greater flexibility, but require additional control measures, including type annotations, testing, and static code analysis tools. In this context, the concept of gradual typing is actively explored, particularly in languages like TypeScript or Python using mypy [1].

Recent studies indicate that combining flexible languages (such as Python with static analysis support via mypy) with critical components implemented in Rust or C++ allows achieving a balance between flexibility and safety [4].

To evaluate the impact of typing on the quality of computer modeling, a mathematical model of transient heat conduction in a one-dimensional rod was

selected. The model was implemented in the following languages: Python (dynamic typing), C++ (static typing), Rust (static typing with safety guarantees), and TypeScript (a web-oriented language with gradual typing).

The analysis of the results showed that Rust provides the highest level of reliability: all invalid type operations are blocked at compile time, and the memory safety system helps prevent common errors related to accessing uninitialized or deallocated memory regions.

C++ also enables effective type control but requires considerable caution, especially when working with templates and pointers.

Python demonstrated the lowest level of protection against type-related errors; however, using tools like mypy or libraries such as pydantic helped improve stability.

TypeScript, although not intended for numerical modeling, performed well in interface modeling, where strict data typing was critical [1].

The type system of programming languages is a decisive factor in designing software for computer modeling of technological systems. Static typing facilitates early error detection, increases reliability, and enhances trust in modeling results. Rust and C++ proved to be the most effective for critical computations, while Python requires additional control mechanisms. A promising direction is a combined approach – using flexible languages to build general logic and strictly typed languages for critical computational cores [2, 4].

References

1. Zhulkovska I., Zhulkovskyi O., Biljo V. Typesis of modern programming languages. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*. 2017. Vol. 1, no. 30. P. 143-147
2. Botta N., Jansson P., Da Silva G. H. A. Types, equations, dimensions and the Pi theorem. *Journal of Functional Programming*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2308.09481
3. Rizky Harlin I., Washizaki H., Fukazawa Y. Impact of Using a Static-type System in Computer Programming. *Journal of Software*. 2017. Vol. 12, no. 8. P. 598–611. DOI: 10.17706/jsw.12.8.598-611
4. Liu Y., Weirich S. Dependently-Typed Programming with Logical Equality Reflection. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*. 2023. Vol. 7, ICFP. P. 649–685. DOI: 10.1145/3607852

Dr. Sci. Togobitska D., Ph.D. Belkova A., Khodotova N.E.

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov NASU

**SPECIFIC ASPECTS OF APPLYING THE HARRINGTON DESIRABILITY
FUNCTION TO DEVELOP AN INTEGRATED INDEX FOR STEEL
DESULFURIZATION IN A LADLE**

The efficiency of the steel desulfurization process in a ladle depends on a variety of factors. The key parameters that determine the quality of the final steel include slag properties, the characteristics of desulfurizing additives, steel temperature, metal–slag interactions, stirring intensity, reagent consumption, and others. This multifactorial nature of the process necessitates a systematic approach to its analysis and the development of an integrated index that can account for multiple variables and provide a comprehensive assessment of ladle desulfurization efficiency.

The Harrington desirability function is a widely used method for solving multi-criteria optimization problems, including those in the field of metallurgy [1]. It converts multiple response variables into a single, dimensionless desirability value ranging from 0 to 1. Each individual process characteristic is mapped onto a scale from 0 to 1 using a specific desirability function (fig.). A value of 1 corresponds to the most desirable parameter level, while a value of 0 indicates an undesirable one. Individual desirability values are aggregated into an overall desirability index (D) using the geometric mean. If even one parameter is deemed undesirable, the overall desirability is zero. Additionally, individual desirability values can be assigned weights to reflect their relative importance.

The effectiveness of applying this function lies in its ability to identify a compromise solution among potentially conflicting objectives. In the steel desulfurization process, for instance, it is essential not only to achieve a low sulfur content but also to minimize reagent and energy consumption.

The sulfur distribution ratio L_s between metal and slag serves as an integral thermodynamic characteristic that reflects the completeness and efficiency of the steel refining process. Treating distribution coefficients of elements as variable values depending on specific raw material and process conditions enables the prediction of final process outcomes and the solution of the inverse problem of identifying optimal process parameters to produce steel of the desired quality. A higher value of L_s indicates a greater ability of the slag to absorb sulfur and is therefore a parameter to be maximized.

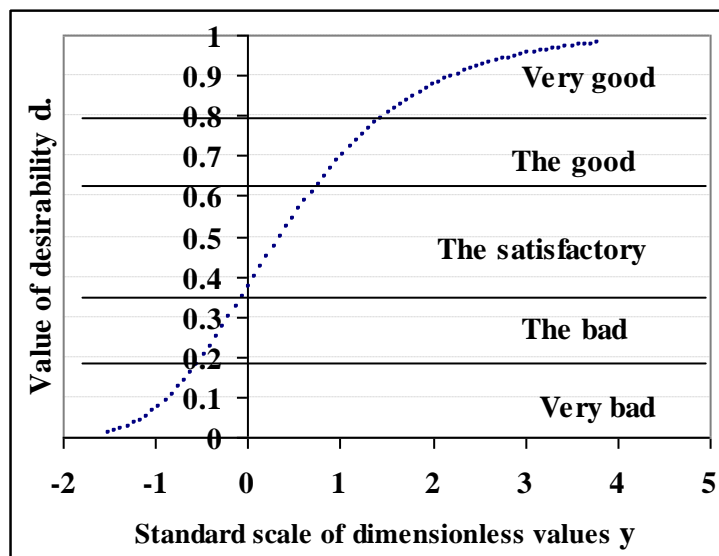


Fig. 1. Graph of the desirability function $d = \exp(-(\exp(-y)))$

An analysis of the steel desulfurization process for a specific steel grade revealed that the sulfur distribution ratio between the final products after ladle treatment is influenced by three main groups of factors: the metal–slag system prior to treatment, the metal–additive system, and the process parameters. Analytically, this relationship can be expressed as $L_s = f(F_{ms}, F_{md}, F_t)$, where F_{ms} , F_{md} , F_t are integrated indicators characterizing the metal–slag system, metal–additive interactions, and technological regime, respectively.

The structure of the integrated indicators was developed using the Harrington desirability function based on the identified influencing factors affecting the sulfur distribution ratio between metal and slag after ladle refining of steel:

$$F_{ms} = [S]_i^{0,5} \cdot Z_i^{Y_i,0,25} \cdot \Delta e_i^{0,25} \quad (1)$$

$$F_{md} = (T_{mFeSi}/T_{mSteel})^{0,6} \cdot (CaO/SiO_2)_{SFM}^{0,4}, \quad (2)$$

$$F_t = I_{st}, \quad (3)$$

where $[S]_i$ is the initial sulfur content in the steel at the ladle furnace (LF) stage; $Z_i^{Y_i}$ and Δe_i are the integrated indicators of the initial composition of the metal and slag, respectively; T_{mFeSi}/T_{mSteel} is the ratio of the melting temperatures of the FeSi65 additive and the steel; CaO/SiO_{2SFM} is the basicity of the slag-forming mixture composed of lime and fluorspar; and I_{st} is the stirring intensity, calculated as the ratio of the argon flow rate to the treatment duration. The chemical equivalence of the metal composition $Z_i^{Y_i}$ and the slag Δe_i , as well as the melting temperatures of FeSi65 and steel, are determined according to the methodology of physico-chemical modeling of melts at the level of interatomic interactions [2].

Based on the identified relationships between the integrated indicators F_{ms} , F_{md} and F_t and the sulfur distribution ratio, an analytical expression was developed for the predictive estimation of the final value after ladle treatment of steel (where R is the correlation coefficient and A_1 is the regression coefficient determined for a specific steel grade)

$$L_s = A_1 \cdot F_{ms}^{0,5} \cdot F_{md}^{0,3} \cdot F_t^{0,2} \quad R=0,85 \quad (4)$$

Thus, the Harrington desirability function proves to be an effective tool for the integrated assessment of complex technological processes such as steel desulfurization in a ladle. Its ability to combine multiple critical parameters into a single, dimensionless indicator provides a more comprehensive understanding of process efficiency compared to traditional evaluations based on individual

parameters. The application of the Harrington desirability function to construct an integrated indicator of ladle desulfurization offers new opportunities for process optimization, improving steel quality, and reducing production costs.

References

1. Harrington, E. C. (1965), The desirable function, *Industrial Quality Control*, Vol. 21, No. 10, pp. 494-498.
2. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters *Lithuanian Journal of Physics*. Vol. 64, No. 1, pp. 58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

**Д. техн. н. Тогобицька Д.М., к. техн. н. Поворотня І.Р.,
інж. першої кат. Шевченко В.М.**

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

МОДЕЛЮВАННЯ АКТИВНОСТЕЙ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ FE-MN-P НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ СПРЯМОВАНОГО ХІМІЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Сучасність металургійної промисловості описується жорсткими трендами щодо підвищення вимог до якості спеціальних сталей і сплавів, а однією з першопричин цьому є світова зацікавленість у створенні надміцних сплавів у зв'язку з військовими діями у різних частинах світу та необхідністю забезпечення відповідного рівня обороноздатності і надійності функціонування деталей, машин, конструкцій цільового призначення. Надмірне навантаження та відповідальність, що сьогодні покладені на металургійну галузь розподіляють між собою металурги-науковці й виробничники з залученням провідних комп'ютерних технологій, розробки нових технологічних рішень, впровадженням оригінальних ідей, що ґрунтуються на поєднанні фундаментальних досліджень, як фізико-хімічних процесів, так і найбільш важливих аспектів різних технологічних питань, які об'єднані спільною метою – створення якісного, конкурентоздатного металу.

На жаль на вітчизняному металургійному ринку, збільшилась кількість надходження не зовсім якісної руди, феросплавів, добавок іноді з підвищеним вмістом домішок або зниженим вмістом провідних дороговартісних компонентів для виплавки металу, що також є важелем впливу на його якість. Саме з огляду на ці аспекти обрана у якості об'єкта дослідження система Fe-Mn-P (Fe, як один з основних елементів сплавів; Mn – може виконувати роль матричного елемента, у складі добавки як десульфуруюча складова; P – домішковий компонент).

Важливе значення при описі процесів фізико-хімічних взаємодій у системі «метал-шлак» відіграє ймовірність числового вираження активностей реагуючих компонентів їх розплавів. Наявність достовірної інформації про термодинамічну властивість – активність елемента, дозволяє визначати спрямованість процесу (перехід компоненту у шлакову чи металеву фазу), а отже є важелем впливу по вдосконаленню технології виробництва якісної сталі та розробці оптимальних рішень щодо коригування хімічного складу добавок, зокрема при позапічній обробці сталі.

Залучення відправних положень концепції спрямованого хімічного зв'язку, розробленої Приходько Е.В. [1], для опису активності елемента дозволяє розглянути його з іншої фізико-хімічної позиції, а саме з погляду, що немає заряду іонів взагалі, а є їх заряд по відношенню до конкретного партнера. Таким чином, відображається мінливість зарядового стану і активності атому від кристалохімічного оточення, які залежать від хімічного складу системи, що розглядається. Хімічна індивідуальність системи, реакційна здатність, структурний стан розплавів виражаються за допомогою методу кодування хімічного складу дослідного розплаву в інтегральних параметрах міжатомної взаємодії, які є основою концепції спрямованого хімічного зв'язку: Z^Y – параметр зарядового стану системи, e ; d – середньостатистична між'ядерна відстань, 10^{-1} нм; $\text{tg}\alpha$ – константа для кожного елемента, яка характеризує градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду; ρ_l – спрямована зарядова щільність, $e/\text{нм}$.

Аналіз взаємозв'язків параметрів міжатомної взаємодії з активностями компонентів досліджуваної системи Fe-Mn-P дозволив встановити найбільш

інформативні (рис.1). Активність фосфору зростає з збільшенням температури, що підтверджується параметром спрямованої зарядової щільності і свідчить на користь утворення активних скупчень електронів та нових партнерських зв'язків та послабленню залізо-марганцевих комплексів. Суттєвого зв'язку між активністю марганцю та спрямованою зарядовою щільністю не виявлено, натомість у заліза чим вища його активність, тим менші числові значення параметру ρ_l . Зростання активності марганцю призводить до збільшення середньозваженої між'ядерної відстані та послабленню зв'язків досліджуваної системи. Наразі зміна активності заліза носить нелінійний характер з виділенням характерної оптимізаційної області для подальшого дослідження.

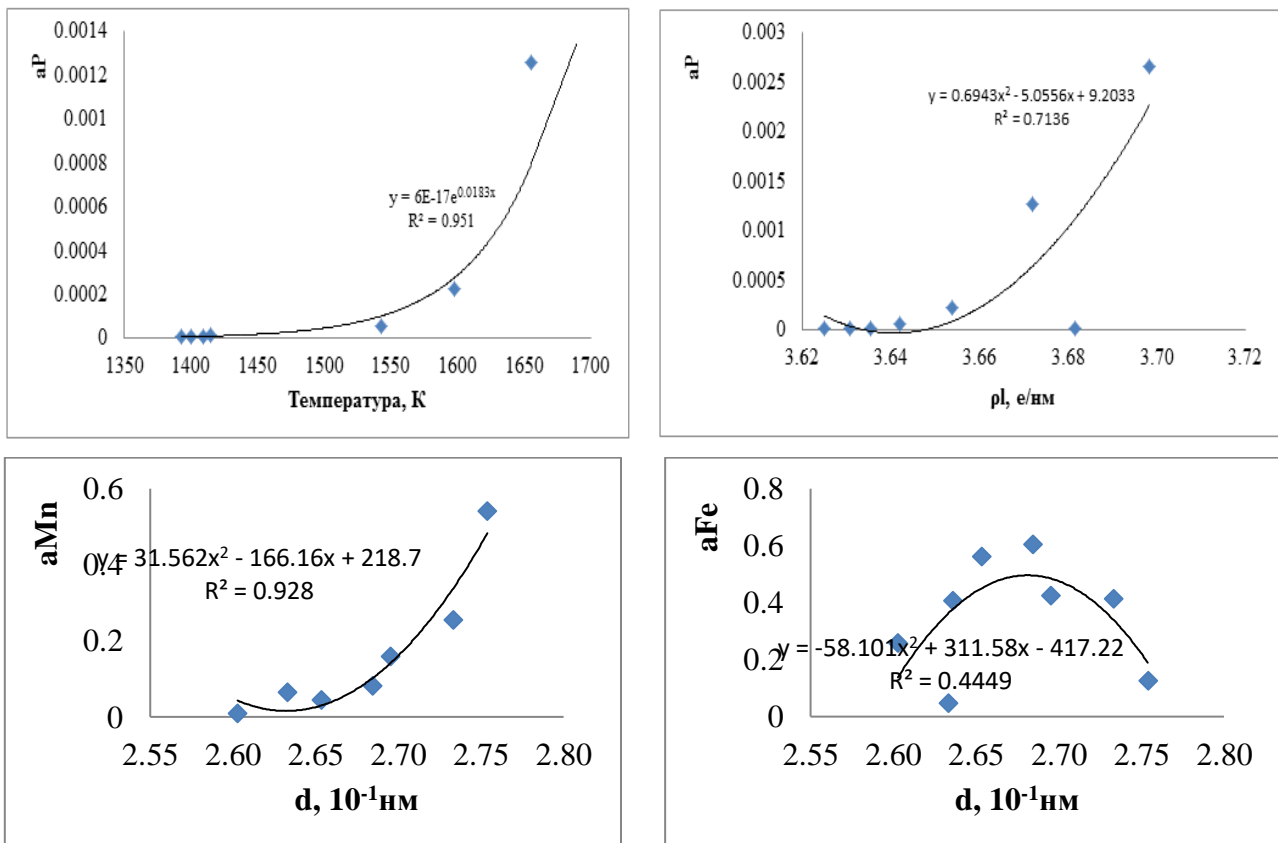


Рис. 1. Залежності активностей фосфору (aP), заліза (aFe), марганцю (aMn) від параметрів міжатомної взаємодії у системі Fe-Mn-P

Зміна числових значень активностей компонентів системи пов'язана з процесом перезарядки, а саме перерозподілом електронів на зовнішніх

оболонках цих атомів у напрямку їх зв'язку. Таким чином, хімічна активність елементу є величиною змінною по відношенню до конкретного партнера зв'язку, що узгоджується інтегральними параметрами міжатомній взаємодії.

Список використаних джерел

1. Приходько Е.В. Металохімія багатоконпонентних систем. М.: Металургія. 1995. 320 с.

К. техн. н. Томіна А.-М.В., Попіль О.І., к. техн. н. Єрьоміна К.А.

Дніпровський державний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТУ З БІНАРНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ НА ОСНОВІ СПЛАВУ СИСТЕМИ AL-CR

Невпинний розвиток технічного прогресу зумовлює потребу в розробці та створенні нових матеріалів для вузлів тертя сучасної техніки з високими показниками трибологічних властивостей. Перспективним напрямком у цій сфері є полімерні композиційні матеріали (ПКМ), зокрема на основі надвисокомолекулярного поліетилену (НВМПЕ), які містять дисперсні наповнювачі (Нп) різної природи, у тому числі тальк, алмаз, гідроксид алюмінію, гексагональний нітрид бор, графіт, сульфід металів та цеоліт [1]. Тому, пошук нових складів ПКМ на основі НВМПЕ залишається актуальним завданням. Застосування методів математичного планування експерименту дає змогу забезпечити безвідмовну та ефективну роботу виробів із нових полімерних композиційних матеріалів без проведення надмірної кількості стендових і натурних випробувань, що у свою чергу, дозволяє суттєво заощадити час і фінансові ресурси.

Значний інтерес при створенні нових ПКМ на основі НВМПЕ викликають швидкозагартовані сплави на основі алюмінію. Це пояснюється тим, що їхня дрібнозерниста структура, сформована в процесі швидкого охолодження, сприяє одержанню матеріалів з високими функціональними властивостями.

При створенні нових складів ПКМ як матрицю обрано НВМПЕ торгівельної компанії Jiujiang Zhongke Xinxing New Material Co., Ltd [1], а як Нп – дисперсний (40-100 мкм) однофазний швидкозагартований бінарний сплав системи Al-Cr із вмістом хрому 5 мас.%. У роботі [2] встановлено, що найкращим комплексом трибологічних властивостей характеризується ПКМ із вмістом бінарного сплаву 20 мас.%. Вплив режимів тертя на інтенсивність лінійного зношування та коефіцієнт тертя даного ПКМ в умовах тертя без змащення досліджували при обертальному русі за схемою «диск-колодка» у парі зі сталевим контртілом (сталь 45, твердість 45-48 HRC та шорсткість поверхні $R_a=0,32$ мкм) при швидкостях ковзання 0,5-1,5 м/с і навантаженнях 0,5-1,5 МПа на машині тертя СМЦ-2. Використовуючи ортогональне композиційне планування другого порядку ступеня 3², детальна методика якого описана у [3], були отримані математичні моделі, що дозволяють прогнозувати трибологічні властивості композиту із вмістом Нп 20 мас.% від швидкості ковзання та навантаження.

$$I_h = (0,773 P^2 - 0,951 v^2 + 7,296 P \cdot v - 9,02 P - 1,27 v + 3,422) \cdot 10^{-7},$$
$$f = 0,1316 P^2 + 0,3612 v^2 - 0,014 P \cdot v - 0,02864 P - 1,0832 v + 1,2321$$

Дані моделі дозволяють не тільки здійснювати аналіз впливу окремих параметрів на трибологічні властивості деталей виготовлених з даного полімерного композиційного матеріалу, а й прогнозують їхню безвідмовну та надійну роботу у вузлах тертя сучасної сільськогосподарської, текстильної та автомобільної техніки під впливом різних навантажень та швидкостей ковзання.

Список використаних джерел

1. Wang L., Gao S., Wang J., Wang W., Zhang L., Tian M. Surface modification of UHMWPE fibers by ozone treatment and UV grafting for adhesion improvement. *The Journal of Adhesion*. 2018. Vol. 94. P.30–45.

2. Попіль О.І., Томіна А.-М.В., Микита К.А. Вплив бінарного сплаву системи Al-Cr на показник абразивного стирання надвисокомолекулярного поліетилену. *Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2025): тези доповіді VIII Міжнародної (XVIII Української) наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених, 25–27 березня 2025 р., м. Вінниця / Донецький національний університет імені Василя Стуса; редколегія: О. М. Шендрик (відп. ред.) [та ін.]. Вінниця, 2025. С. 153.*

3. Yeromenko O.V., Yeriomina Ye.A., Tomina A.-M.V. Supply of operation modes on tribological power to basaltoplastics based on polytetrafluoroethylene / *Mathematical Modeling*. 2023. №1(49). P. 48–55.

Торська М.О.

Національний університет «Львівська політехніка»

ГЕНЕРУВАННЯ МУЗИЧНИХ КОМПОЗИЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАНЦЮГІВ МАРКОВА

У сучасному світі щодня зростає потреба в музичному наповненні – від фонові музики для відео та ігор до персоналізованих добірок. Однак процес створення музики потребує часу, професійних навичок та значних фінансових вкладень. Крім того, існує проблема авторських прав: використання вже створених композицій потребує ліцензування, що не завжди є можливим чи економічно доцільним. Традиційні методи написання музики також мають певні обмеження, зумовлені людською увагою та стильовими рамками.

Розвиток алгоритмів автоматичного генерування музики відкриває нові перспективи. Сучасні алгоритми можуть аналізувати величезні масиви даних і

знаходити нестандартні рішення, дозволяють швидко створювати унікальні композиції, розширювати творчу палітру та експериментувати з музичними формами, гармоніями і ритмікою.

Одним із найефективніших інструментів для моделювання таких процесів є ланцюги Маркова. Це стохастична модель, що дозволяє описати системи, у яких майбутній стан процесу залежить лише від його поточного стану, а не від усіх попередніх станів. Основу такої моделі становлять ймовірності переходу між станами, що визначаються на основі спостережень послідовного перебігу певного явища. Завдяки цьому ланцюги Маркова є ефективним інструментом для аналізу та прогнозування поведінки процесів, що розвиваються у часі та характеризуються локальною залежністю між послідовними станами [1].

Музична композиція є набором елементів – нот, акордів та пауз – які з'являються у визначеному порядку. Отже, музичні елементи можна розглядати як стани системи, а послідовність їхнього відтворення – як реалізацію марковського процесу. Різні музичні жанри та індивідуальні стилі композиторів використовують стійкі шаблони переходів між музичними елементами. Ці закономірності можна зобразити як матрицю перехідних ймовірностей, що дозволяє математично формалізувати структуру певного музичного твору.

У даній роботі запропоновано математичну модель, побудовану на основі ланцюгів Маркова, яка визначає ймовірнісні переходи між елементами вхідного твору чи сукупності творів, що дозволяє виявляти та аналізувати закономірності, характерні для стилю певного композитора. Визначено алгоритм, за допомогою якого на основі вхідної послідовності музичних елементів можна згенерувати нову оригінальну послідовність, що зберігає характерні риси заданого твору. Для автоматизації процесу генерування виконано програмну реалізацію алгоритму за допомогою бібліотеки music21 мовою програмування Python.

Для кожного стану, що відповідає певній ноті, обчислюються ймовірності переходів до інших станів на основі частоти появи відповідних послідовностей у вхідних даних. Отримані ймовірності формують матрицю переходів $P = (p_{ij})_{n \times n}$, яка використовується для подальшого генерування нового музичного твору. Тут $p_{ij} = \frac{m}{n}$, де m – кількість спостережень переходу зі стану i у стан j вхідної послідовності, n – загальна кількість переходів зі стану i у будь-який інший стан.

Розроблена програма працює з композиціями у форматі MIDI. Це дозволяє здійснювати комплексний аналіз музичних елементів і параметрів, зокрема мелодичної лінії, гармонічної структури, ритмічного малюнка, темпу, метричного розміру та тональності. Вхідні дані, які є основою для роботи програми, зберігаються у реляційній базі даних. Такий підхід забезпечує структуроване зберігання, швидкий доступ до музичних елементів і ефективну побудову матриць переходів для ланцюгів Маркова. Крім того, вхідні дані є творами класичних композиторів, що не порушує авторські права та дозволяє використовувати матеріал для навчання моделі.

Завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу програми, користувач може легко здійснювати пошук серед запропонованих композиторів, переглядати доступні твори та відтворювати аудіофайли (рис. 1). Крім того, доступне створення нової композиції на основі одного або кількох творів обраних із бази даних застосунку. Також передбачена можливість локального завантаження користувачем задовільного результату генерування.

Запропонований програмний застосунок має широкий спектр застосування – від освіти та творчості до музичної індустрії. Він дає змогу генерувати унікальні музичні композиції у стилі класичних творів, що робить його корисним як для професійних музикантів і викладачів, так і для

початківців та авторів медіа, які потребують фонового музичного супроводу без порушення авторських прав.

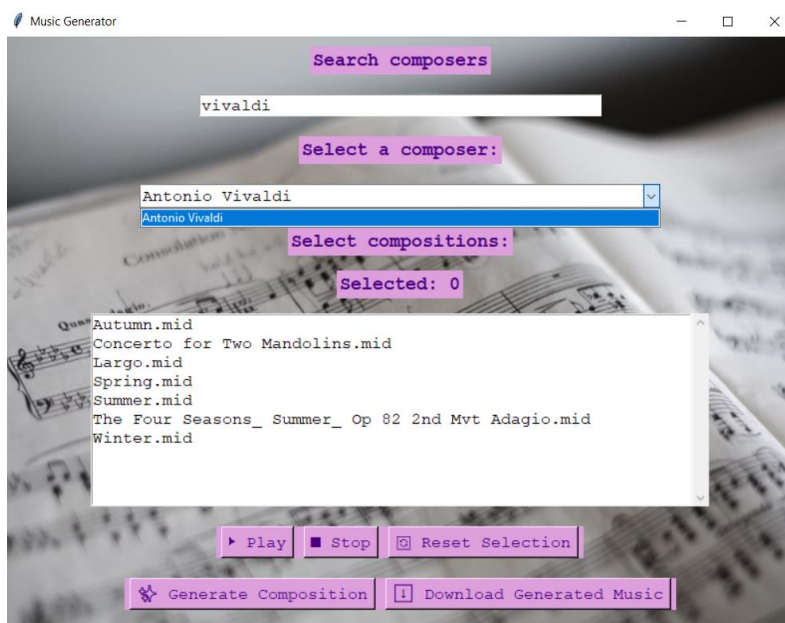


Рис. 1. Інтерфейс головного вікна додатка

Результати цієї роботи можуть бути використані для подальших досліджень у сфері алгоритмічної композиції, а також для розробки рішень, які передбачають створення композицій із більш складною структурою.

References

1. Serfozo R. Basics of Applied Stochastic Processes. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-89332-5.

Трубник А.О., к. техн. н. Клімов Р.О.

Дніпровський державний технічний університет

ВПЛИВ РОЗВИНЕНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ОПТИМАЛЬНУ КОНСТРУКЦІЮ ПОВІТРОПІДГРІВАЧІВ

Оптимізація геометричних параметрів теплообмінних апаратів може проводитись за багатьма параметрами. Одними з найважливіших є геометричні розміри. Розробка оптимізованої конструкції теплообмінника за допомогою

методів планування експерименту є актуальною задачею. Це дозволяє мінімізувати витрати матеріалів на виготовлення апаратів та найбільш ефективно передавати теплоту.

Метою роботи є визначення впливу таких факторів як довжина однієї оребреної трубки, несучий діаметр оребрення трубки та коефіцієнт оребрення на оптимальне конструктивне виконання підігрівача стисненого повітря за показником мінімальної довжини трубної системи.

З метою раціональної постановки експерименту з вивчення процесу побудування оптимальної конструкції теплообмінного апарату за критерієм мінімальної довжини трубчастої системи обрано центральний композиційний план другого порядку $k = 3$. Математична модель досліджуваного процесу

$$\hat{y}_1 = 5,812 + 1,344x_1 + 0,245x_2 - 0,634x_3 - 0,275x_1x_3 - 0,203x_1^2 + 0,166x_3^2. \quad (1)$$

Аналізуючи отримане рівняння видно, що найбільший вплив на загальну довжину труб теплообмінника має фактор x_1 , тобто довжина однієї трубки поперек потоку повітря. Вторинне значення на загальну довжину трубок має коефіцієнт оребрення x_3 , а знак вказує на те, що зі збільшенням коефіцієнту оребрення загальна довжина буде зменшуватися. Останнє місце за впливом на значення шуканої функції є несучий діаметр оребрення x_2 .

За допомогою розробленої методики можна проаналізувати значення довжини трубчастої системи теплообмінника при різних поєднаннях наведених факторів та оптимізувати його конструкцію.

Postgraduate student Vernyhora D.V., PhD Karimov I.K.

Dnipro State Technical University

**ALGORITHMS AND PROGRAMS FOR MODELING THE THERMAL
STATE OF SLAB STRUCTURES IN THE PROCESS OF LOCAL HEAT
TREATMENT**

Local heat treatment of large-sized products made by electroslag welding refers to progressive resource-saving processes. Dnipro State Technical University has completed a series of works on modeling the thermal state of products in the process of local heat treatment in order to develop rational thermal schemes for the technological process.

Algorithms and programs for calculating the temperature fields of slab structures for different thermal schemes due to different variants of heat exchange of the product with the external environment have been developed and implemented. The traditional two-zone scheme is used with the allocation of heating zones and cooling zones on the surface of the product and a three-zone scheme, which also takes into account the zone in contact with the lining of the gas furnace. In addition, a scheme with thermal insulation of the product in the area outside the furnace is considered, and a scheme with the introduction of buffer zones in the working space of the furnace with a more intensive heat supply.

The algorithms are built on the basis of a local-one-dimensional method for solving problems of mathematical physics. At the same time, the nonlinearities of the processes associated with the dependence of the thermophysical properties of the metal and the coefficients of external heat transfer on temperature are taken into account. Approbation of algorithms is carried out using specially designed computer programs. The presence of procedures common to all programs made it possible to combine them into a complex of programs with a single interface. In the future, this complex will be used to conduct a computational experiment in order to develop rational thermal schemes for local heat treatment of large-sized products in portable gas furnaces.

Асп. Фостяк В.Т., д.ф.-м.н. Маркович Б.В., д. техн. н. Афтаназів І.С.,
к. техн. н. Корендій В.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

3D-ЛОКАЛІЗАЦІЯ БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ЗЙОМКИ ТА ТРІАНГУЛЯЦІЇ НА ОСНОВІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

У тезі розглянуто проблему визначення точного 3D-положення ворожого безпілотного літального апарату (БПЛА) на основі вимірювання відстаней від трьох стаціонарних дронів-спостерігачів, обладнаних тепловізійними сенсорами. Задача локалізації геометрично моделюється як знаходження вершини трикутної піраміди, основу якої утворюють відомі позиції дронів-спостерігачів, а ребра, що з'єднуються з вершиною, являють собою виміряні відстані до БПЛА. Розв'язавши цю обернену геометричну задачу, можна відновити точні координати БПЛА. Ці координати потім використовуються для спрямування автономного безпілотника-перехоплювача для усунення загрози.

Метод ґрунтується на тріангуляції з використанням трьох стаціонарних дронів-спостерігачів із тепловізорами, здатними визначати пряму відстань до ворожого БПЛА [1,2]. Дрони розміщено у фіксованих тривимірних координатах $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$ та $C(x_3, y_3, z_3)$. Виміряні відстані d_A , d_B і d_C задають сфери, на перетині яких має знаходитись БПЛА з координатами (x, y, z) . Це формує обернену задачу, що математично описується системою:

$$\begin{aligned}(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 &= d_A^2 \\(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 &= d_B^2 \\(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 &= d_C^2\end{aligned}\tag{1}$$

У реальних умовах, враховуючи похибки вимірювань, рішення отримують чисельно шляхом мінімізації залишкової похибки методом найменших квадратів:

$$R(x, y, z) = \sum_{i=A,B,C} \left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - d_i \right)^2 \quad (2)$$

Цей підхід забезпечує стійку та точну оцінку координат БПЛА, придатну для застосувань у режимі реального часу.

Моделювання та числовий приклад

Таблиця 1. Числовий приклад визначення координат БПЛА

t(s)	d_A (м)	d_B (м)	d_C (м)	v_x (м/с)	v_y (м/с)	v_z (м/с)	$x(t)$ (м)	$y(t)$ (м)	$z(t)$ (м)
0	1562.05	2538.39	1562.05				0	1000	1200
1	1576.12	2524.12	1557.06				27,78	1013,89	1205,56
2	1590.06	2511.12	1554.38				55,56	1027,78	1211,11
3	1604.52	2498.36	1551.81	27,78	13,89	5,56	83,33	1041,67	1216,67
4	1618.77	2485.14	1549.34				111,11	1055,56	1222,22
5	1634.65	2472.91	1546.96				138,89	1069,44	1227,78
6	1650.15	2461.18	1544.68				166,67	1083,33	1233,33

Даний приклад із таблиці 1 наочно демонструє чисельний підхід: Спостерігач А(0;0;0), спостерігач В(2000;0;0), спостерігач С(0;2000;0), d_A , d_B , d_C - відстані до спостерігачів А,В,С розраховані за формулою:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3)$$

$x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ - положення шару в момент часу t, знайдені за формулами:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + v_x t \\ y(t) &= y_0 + v_y t \\ z(t) &= z_0 + v_z t \end{aligned} \quad (4)$$

На рис.1 представлено тривимірну візуалізацію, яка ілюструє просторове розташування трьох стаціонарних спостерігачів А, В, С на місцевості та траєкторію руху безпілотної мішені. Помаранчева крива з маркерами відображає його політ від початкової позиції $P_0=(0;1000;1200)$ до моменту часу $t=6с$. Пунктирні лінії, що з'єднують кожного спостерігача з відповідними

точками траєкторії, утворюють динамічні «піраміди спостереження», які наочно демонструють напрямки та довжини вимірювальних променів у кожен момент часу. Така інтеграція трилатераційної локалізації з кінематичним моделюванням створює передумови для високоточної прогностичної оцінки та подальшого положення БПЛА, що є критично важливим для оперативного захисту населених пунктів від ударних і розвідувально-диверсійних дронів [3].

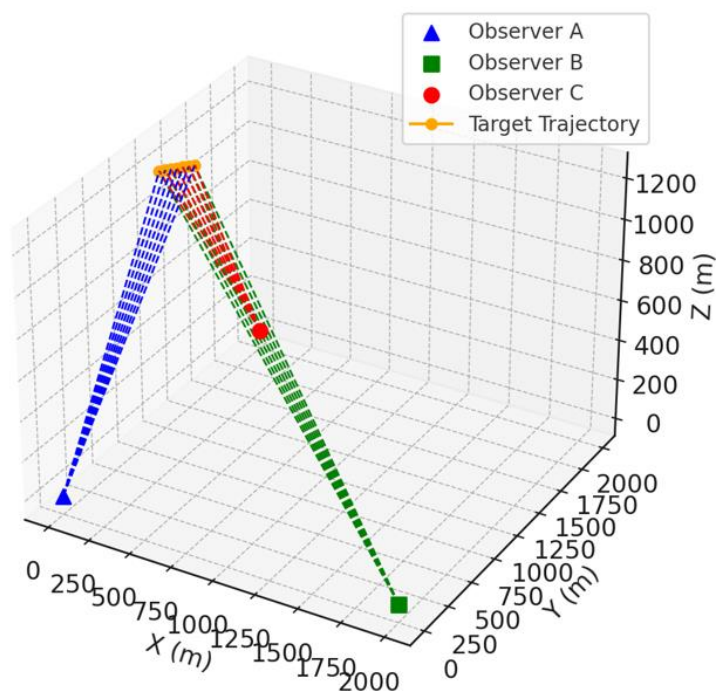


Рис. 1. 3D-траєкторія цілі та піраміди спостереження

Висновки. Дослідження підтверджує, що геометрична триангуляція з тепловізійними вимірюваннями та чисельною оптимізацією забезпечує надійну локалізацію БПЛА в реальному часі. Метод ефективно працює навіть за складних умов і може бути інтегрований у системи автономного перехоплення, підвищуючи ситуаційну обізнаність і обороноздатність. Його точність і адаптивність роблять підхід придатним для сучасної безпекової інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Афтаназів І.С., Стоцько Р.З., Шевчук А.О, Строган О.І., Бойко О.О. Визначення координат та параметрів руху безпілотних літальних апаратів. Системи озброєння і військова техніка. 2022. №3(71). С. 49–59.

2. Svidrak I. G., Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strogan O. Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection . *Mathematical Modeling and Computing*, -2022. Vol. 9, № 2. – P. 459–469.
3. Афтаназів І.С., Стоцько Р.З., Шевчук А.О., Струтинська Л.Р., Строган О.І., Бойко О.О. Захист населених пунктів від ударних та диверсійно-розвідувальних БПЛА. Системи озброєння і військова техніка. 2022. №1 (73).С.83-95, DOI:10.30748/soivt.2023.73/10.

Асп. Циба В. В.

Дніпровський державний технічний університет

РОЗВИТОК МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДОСЛІДЖЕННЯ БАЛІСТИЧНОЇ ТРАЄКТОРІЇ ПОЛЬОТУ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО СНАРЯДА

Одні із перших досліджень з кінематики були зумовлені застосуванням гармат та необхідністю розрахунку траєкторії польоту снаряда. Однією з найперших задач стало визначення оптимального кута пострілу для досягнення максимальної дальності. Італійський вчений-балістик на ім'я Тарталья у 1537 році провів низку випробувань та встановив, що максимальна дальність стрільби досягається підняттям гармати на кут близький до 45 градусів. Зазначимо, що такий кут дійсно забезпечує максимальну дальність лише у випадку пострілу у вакуумі, де відсутні аеродинамічні сили і траєкторія визначається винятково гравітацією. Натомість у сучасних гармат кут підняття, що забезпечує максимальну дальність, становить приблизно 30 градусів, оскільки суттєвий вплив на траєкторію має аеродинамічний опір.

Дослідження впливу аеродинамічного опору на політ твердого тіла започаткував І. Ньютон, який моделював повітря множиною окремих пружних частинок – кульок які отримують кінетичну енергію за рахунок енергії руху тіла, що визначає опір повітря його переміщенню. Було встановлено, що опір кулі збільшується зі збільшенням густини повітря (чи рідини), поперечної

площі та квадрату швидкості кулі. В загальному випадку опір повітря для довільної форми визначається наступним виразом:

$$F_{air} = \frac{1}{2} c_d S \rho v^2, \quad (1)$$

де c_d – коефіцієнт, який залежить від передньої частини поверхні тіла, S – площа найбільшого поперечного перерізу тіла, ρ – щільність середовища, v – швидкість польоту тіла.

Результати експериментальних досліджень, проведені наприкінці XVIII століття, показали, що теорія Ньютона не враховує особливості зовнішньої поверхні тіла. Так для тіл однакової форми заміри сили опору їх під час руху з різними швидкостями, або в середовищах з різною щільністю, добре збігалися з розрахунковими значеннями. Але для тіл, що відрізняються одне від одного за формою, експеримент не підтверджував теорії Ньютона, що пояснюється її недосконалістю.

У кінці 19 століття та на початку 20 століття для розрахування опору повітря припускали, що різні типи артилерійських снарядів мають схожу форму тому мають схожі аеродинамічні властивості. Тобто, залежність $C_x(M)_{ет}$ визначають дослідним шляхом для снарядів типової («еталонної») форми. Подібність процесів обтікання снарядів повітряним потоком найчастіше не забезпечується через відмінності конфігурації головної частини, і, для того щоб мати змогу використовувати наявні експериментальні дані, вводиться коефіцієнт форми снаряда, що враховує неповноту умов подібності:

$$i = \frac{C_x(M)}{C_x(M)_{ет}}. \quad (2)$$

Цей коефіцієнт порівняно мало залежить від швидкості снаряда, і його зручно використовувати як коефіцієнт узгодження розрахунку з визначення дальності стрільби з експериментом. У цьому разі враховуються як форма снаряда, так і інші фізичні чинники, що впливають на рух снаряда. Найбільш

відомі еталонні залежності коефіцієнта лобового опору: за формулою Сіаччі, «закон 1930 року», «закон 1943 року» для снарядів які обертаються, «закон 1958 року» для крилатих снарядів.

Поява сучасних обчислювальних машин і комп'ютерів зумовила стрімкий розвиток чисельних методів дослідження, зокрема обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD), та дозволила на базі моделі з шістьма степенями свободи (6DOF) розраховувати аеродинамічні коефіцієнти снаряда з урахуванням його конструктивних особливостей. Такий підхід дозволяє перейти від використання еталонних функцій опору повітря до динамічного їх розрахунку з урахуванням форми твердого тіла.

К. техн. н. Чернета О.Г., здоб. освіти Буланий Р.О.

Дніпровський державний технічний університет

МОДЕЛЬ НАВАНТАЖЕННЯ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ПІСЛЯ ЗМІЦНЕННЯ

Основною проблемою при виборі технології зміцнення конкретної деталі, є вибір матеріалів та покриттів трибо сполучених пар, що визначають характер та природу утворення зносостійких структур. Для вирішення поставлених завдань необхідний комплексний підхід з урахуванням впливу всіх значимих факторів. Ці чинники повинні враховувати, як технологічні складові для протікання відпрацьованих технологій зміцнення, так і прогнозованих результатів структуроутворення і вибору оптимальних матеріалів для деталі та покриттів. За рядом причин (технологічних, безпекових, економічних, міцних) у авто виробництві спостерігається заміна матеріалу більшості складових

деталей. Заміна матеріалу деталі спонукає і до відповідної технології зміцнення поверхневого шару.

Швидкість зношування матеріалу кільця за Горячевою І.Г. пропорційна тиску і визначається за формулою:

$$I_t = Kq, \quad (1)$$

де q - тиск; K – коефіцієнт зносостійкості.

The pressure at a given time is given as a series of ascents. Then the expression for the contact pressure distribution has the form

$$q'(\theta, t') = \sum_{n=1}^{\theta} B_n U_n(\theta) \exp(-\lambda_n^2 t'), \quad (2)$$

$$B_1 = \frac{2 \cos L_1^+ n \sin L_1^- n}{L_1^- \cos L_1^- n} + \frac{\frac{2 \sin L_1^+ n}{L_1^+}}{\frac{\pi \cos^2 L_1^+}{\cos^2 L_1^- n}} + \frac{(3\lambda_1 -) \cos^2 L_1^- \pi \sin L_1^- \pi}{\lambda_1 L_1^- \cos L_1^- n} + \frac{(3\lambda_1) \sin 2L_1^+ \pi}{2\lambda_1 L_1^+} \quad (3)$$

$$\text{де; } B_n = \left(\frac{2sh\Lambda_n^- \cos \Lambda_n^+ n}{\Lambda_n^- ch\Lambda_n^- \pi} \right) + \frac{2\sin \Lambda_n^+ n}{\Lambda_n^+} / \left[\frac{\pi \cos^2 \Lambda_n^+ n}{ch\Lambda_n^- n} + \frac{(3\lambda_n - 2) \cos^2 \Lambda_n^- n}{\lambda_n \Lambda_n^- ch\Lambda_n^- n} + \frac{(3\lambda_n + 2) \sin 2\Lambda_n^+ n}{2\lambda_n \Lambda_n^+} + \pi \right]$$

$$L_1^+ = \sqrt{1 \pm \lambda_1}; \quad \Lambda_n^+ = \sqrt{\lambda_n \pm 1}; \quad (5)$$

$$U_1(\theta) = \cos L_1^+ \theta + \frac{\cos L_1^+ \pi \cos L_1^- \theta}{\cos L_1^- \pi}; \quad (6)$$

$$U_n(\theta) = \cos \Lambda L_1^+ \theta + \frac{\cos \Lambda_1^+ \pi ch \Lambda_1^- \theta}{ch \Lambda_1^+ \pi}; \quad (7)$$

$$t' = \frac{K'EJt}{r^4}; \quad q'(\theta, t') = \frac{q(\theta, t)r^3}{EJ}, \quad (8)$$

де θ - кутова координата (для поршневого кільця $\theta = \pm \pi$);

E – модуль пружності кільця; t – поточний час;

r – радіус кривизни кільця; q – тиск.

На сталі 50ХФА була вперше випробувана комбінована технологія зміцнення поверхневого шару поршневих кілець. Технологічний процес зміцнення складений з двох послідовних етапів: азотування в колодязних пічках при

температурі 650°C в середовищі азотовміщуючих речовин з витримкою 96 годин і наступною імпульсною лазерною обробкою на приладі ГООС1001[3-7].

До випробувань були підготовлені зразки у вигляді шайб діаметром 30 мм і товщиною 5 мм. Підготовлені зразки поміщали у відкритих контейнерах в камеру пічки азотування при температурі 650°C. Далі під тиском подавали азотовміщуючий газ на 96 годин. Наступний етап комбінованої обробки – це імпульсне лазерне випромінювання на приладі ГООС1001 при наступних режимах (енергія накопичення 15 кДж, відстань до мішені – 290 мм, діаметр лазерної плями 11 мм, інтервал між пострілами 3 хвилини).

Для повного сприйняття динаміки процесів зміцнення за комбінованою технологією половини зразка підвергали лазерній обробці з перекриттям зон впливу без оплавлення поверхневого шару.

Геометричні параметри зразків при комбінованій технології зміцнення не мінялися. При цьому в наслідок лазерної обробки змінювалися параметри шорсткості поверхні – мікрорельєф після оплавлення змінювався. Вершини мікронерівностей після оплавлення лазерним променем згладжувалися.

Внаслідок проведення технологічних операцій зміцнення за комбінованою технологією поверхневий шар деталі із сталі 18Х2Н4МА набув певних змін у мікроструктурі від поверхні до центру матричного матеріалу. Багатоскладовий вміст легованих елементів спровокував утворення складних форм карбонитридів та нітридів у переважно мартенситній матриці поверхні, що має високі показники міцності, твердості ($H_{\mu 50} = 11000$ МПа) та зносостійкості.

Розроблена технологія комбінованої обробки високолегованої сталі 18Х2Н4МА на базі середньо температурного азотування в печі анодації при температурі 650°C з витримкою 96 годин та наступною лазерною обробкою на лазерному приладі ГООС1001 з енергією накопичення

15 кДж, відстані до мішені – 290 мм, діаметром лазерної плями 11 мм та інтервалом між пострілами 3 хвилини.

Список використаних джерел

1. Cherneta O. G. Strengthening of automobile transportparts by combined laserprocessing: monograph. Kamianske: DDTU, 2024. 147 p.
2. Cherneta O. G., Korodochka O.M. Effective materials and coatings for the production and renovation of automobile parts. Chief assistant. DDTU. 2008. 143p.
3. Dmitrichenko M.F., Mnatsakanov R.G., Mikosyanchik O.O. Tribotechnics and the basis of machine reliability: basic guide. K.: INFORMAVTODOR, 2006. 216 p.
4. Kindrachuk M.V., Labunet V.F., Pashechko M.I. TRIBOLOGY. Branch of the National Aviation University “NAN-Druk” 2009.392. p.
5. Popov S. V., Buchynskiy M. Ya., Hnytko S. M., Chernyavskiy A. M. Theory of mechanisms of technological machines: a extbook for students of mechanical specialties of higher education institutions. Kharkiv: NTMT, 2019. 268 p.

**Д. техн. н. Чернятевич А.Г.¹, д. техн. н. Самохвалов С. Є.¹,
д. техн. н. Сігарьов Є.М.², к. техн. н. Молчанов Л.С.¹,
к. техн. н. Похвалітий А.А.²**

¹Інститут чорної металургії НАН України,

²Дніпровський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ МЕТАЛЕВОГО БРУХТУ В КОНВЕРТЕРІ ОБЕРТОВОЮ БАГАТОСОПЛОВОЮ ФУРМОЮ

У зв'язку з дефіцитом рідкого чавуну в Україні та зростаючим використанням металевого брухту в киснево-конвертерному виробництві, актуальною є задача попереднього нагріву лому безпосередньо в порожнині конвертера.

Раніше нами було розроблено математичну модель нагріву лому пиловугільним факелом за допомогою стаціонарної фурми [1]. Однак застосування багатосоплової фурми, що обертається, дозволяє інтенсифікувати теплопередачу та підвищити енергоефективність процесу.

У роботі представлено математичну модель теплофізичних процесів у сталевиплавному конвертері при використанні обертової паливно-кисневої фурми з кількома соплами, розташованими на різних рівнях. В таких умовах формуються декілька пиловугільних факелів, які забезпечують рівномірний і глибокий нагрів металевго брухту.

Геометрична схема та припущення. Моделюється конічна або циліндрична порожнина конвертера, частково заповнена металевим брухтом. В фурмі вздовж осі на рівновіддалених висотах розташовано N сопел. Обертання фурми зі змінною як за величиною, так і за знаком (напрямком) частотою ω забезпечує рівномірний розподіл теплового потоку по всьому об'єму завантаження. Прийmemo, що пиловугільний факел можна змоделювати як об'ємне джерело тепла з густиною $q_i(\vec{r}, t)$, де $i \in \{1, \dots, N\}$.

Математична модель. Розглядається нестационарна задача теплопровідності з об'ємним джерелом тепла:

$$\rho C_e \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_e \vec{\nabla} T) + \sum_{i=1}^N q_i(\vec{r}, t),$$

де ρ – густина металевго брухту, C_e та λ_e – ефективні коефіцієнти теплоємності та теплопровідності брухту, $T(\vec{r}, t)$ – температура в точці \vec{r} у момент часу t і q_i – теплова потужність від i -го факела.

Форма джерела тепла кожного факела моделюється як:

$$q_i(\vec{r}, t) = Q_i(t) \exp\left(-\frac{|\vec{r} - \vec{r}_i(t)|^2}{2\sigma^2}\right),$$

де $\vec{r}_i(t)$ – координати центру факела з урахуванням обертання:

$$\vec{r}_i(t) = [R \cos(\omega t + \theta_i), R \sin(\omega t + \theta_i), z_i],$$

де θ_i – кутова позиція сопла, z_i – його позиція вздовж фурми, R – радіус дії факела, σ – характерний радіус теплової дії.

Для розв'язання рівнянь моделі застосовується метод скінченних різниць з часовою дискретизацією. Температурне поле визначається на кожному часовому кроці з урахуванням переміщення джерел тепла.

Результати та перспективи. Очікується, що нові конфігурація фурми і метод нагрівання брухту дозволять:

- скоротити час нагрівання брухту;
- зменшити енерговитрати на тонну сталі;
- забезпечити більш рівномірний прогрів;
- зменшити кількість непрогрітих включень.

Подальші дослідження передбачають порівняння одержаних числових результатів з експериментальними даними та оптимізацію конструкції фурми (кількість сопел, розташування, швидкість обертання тощо).

Список використаних джерел

1. Самохвалов С.Є., Чернятевич А.Г., Сігарьов Є.М., Похвалітий А.А., Надригайло Т.Ж. Математична модель нагрівання металевого брухту в конвертері пиловугільним факелом // Збірник наукових праць ДДТУ (тематичний випуск), 2024. – С. 132- 137

Асп. Чугунов Д.В., д. техн. н. Нізімов В.Б.

Дніпровський державний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЄМНІСНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ В ФАЗНИХ КООРДИНАТАХ

Система рівнянь синхронного двигуна (СД) складається з рівнянь електричної рівноваги напруг контурів, рівнянь, що описують електромагнітні зв'язки і рівнянь механічної рівноваги.

Диференційні рівняння електричної рівноваги напруг електричних контурів, складені на підставі законів Кірхгофа, мають наступний вигляд:

$$[u] = [R] [i] + \frac{d[\psi]}{dt}, \quad (1)$$

де $[u] = [u_A, u_B, u_C, u_f - u_{x_c}, u_{kd}, u_{kq}]^T$ — транспонована матриця джерел

живлення; u_A, u_B, u_C — напруги на затискачах обмоток статора;

$[i] = [i_A, i_B, i_C, i_f, i_{kd}, i_{kq}]^T$ — транспонована матриця струмів контурів

живлення; $[\psi] = [\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_f, \psi_{kd}, \psi_{kq}]^T$ — транспонована матриця

потокозчеплень контурів СД; $\psi_A, \psi_B, \psi_C, i_A, i_B, i_C$ — відповідно повні

потокозчеплення і струми обмоток фаз статора; r — активний опір обмотки

фази; u_f — напруга на затискачах обмотки збудження; ψ_f, i_f —

потокозчеплення і струм обмотки збудження (ОЗ); R_f — активний опір ОЗ;

C — електрична ємність НЕ.

Демпферна обмотка представляється у вигляді окремих контурів, розташованих по двох осях симетрії.

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] \\ [R_r] \end{bmatrix} \text{— матриця активних опорів контурів;}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \text{— діагональна матриця опорів фаз статора;}$$

$$[R_k] = \begin{bmatrix} r_f & & \\ & r_{kd} & \\ & & r_{kq} \end{bmatrix} \text{— матриця опорів контурів ротора;}$$

Матриця потокозчеплень визначається виразом:

$$[\psi] = [L][i],$$

де

$$[L] = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} & B1 & B2 & B3 \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} & B4 & B5 & B6 \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C & B7 & B8 & B9 \\ B1 & B4 & B7 & L_f & M_{f1d} & \\ B2 & B5 & B8 & M_{1df} & L_{1d} & \\ B3 & B6 & B9 & & & L_{1q} \end{bmatrix} \text{--- матриця індуктивностей і}$$

взаємоіндуктивностей контурів СД, де

$$\begin{aligned} B1 &= M_{Af} \cos(p_m \gamma); & B2 &= M_{A1d} \cos(p_m \gamma); & B3 &= M_{A1q} \cos\left(p_m \gamma - \frac{\pi}{2}\right); \\ B4 &= M_{Bf} \cos\left(p_m \gamma - \frac{2\pi}{3}\right); & B5 &= M_{B1d} \cos\left(p_m \gamma - \frac{2\pi}{3}\right); & B6 &= M_{B1q} \cos\left(p_m \gamma - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right); \\ B7 &= M_{Cf} \cos\left(p_m \gamma + \frac{2\pi}{3}\right); & B8 &= M_{C1d} \cos\left(p_m \gamma + \frac{2\pi}{3}\right); & B9 &= M_{C1q} \cos\left(p_m \gamma + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned}$$

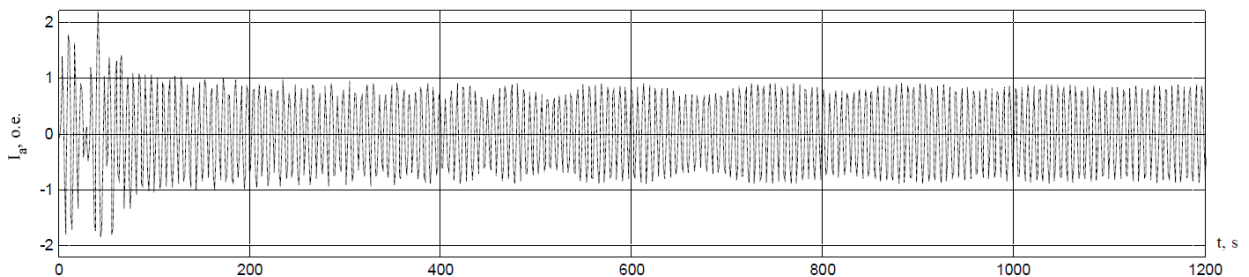
Рівняння механічної рівноваги, що отримано на основі закону збереження енергії та принципу можливих переміщень:

$$M_C = -\frac{J}{p_M} \cdot \frac{d^2 \gamma}{dt^2} + \frac{p_M}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial \gamma} (i_A \psi_A + i_B \psi_B + i_C \psi_C + i_f \psi_f + i_{1ld} \psi_{1d} + \dots + i_{nnd} \psi_{nd} + i_{1lq} \psi_{1q} + \dots + i_{nnq} \psi_{nq}), \quad (2)$$

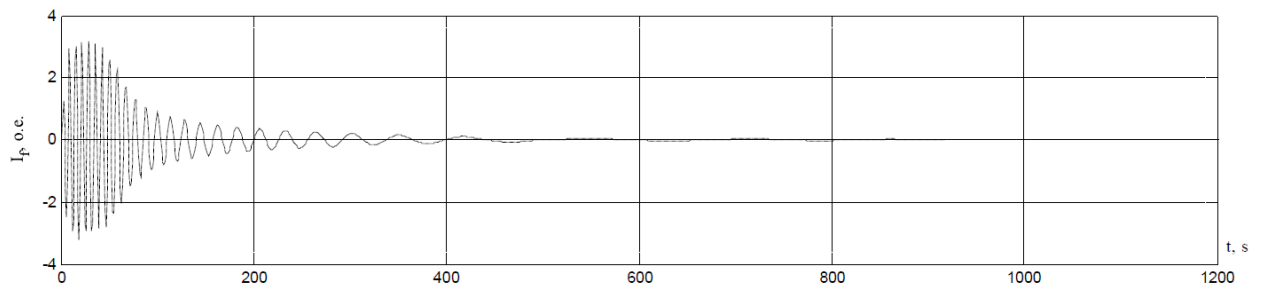
де J – момент інерції системи; M_C – момент зовнішніх сил;

γ – кут між віссю фази А статора і віссю d ротора; p_m – число пар полюсів СД.

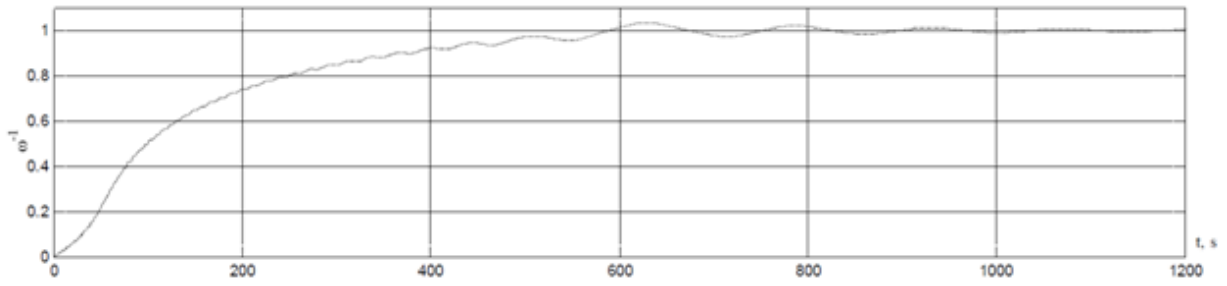
Результати моделювання пускових режимів СД наведені на рис.1.



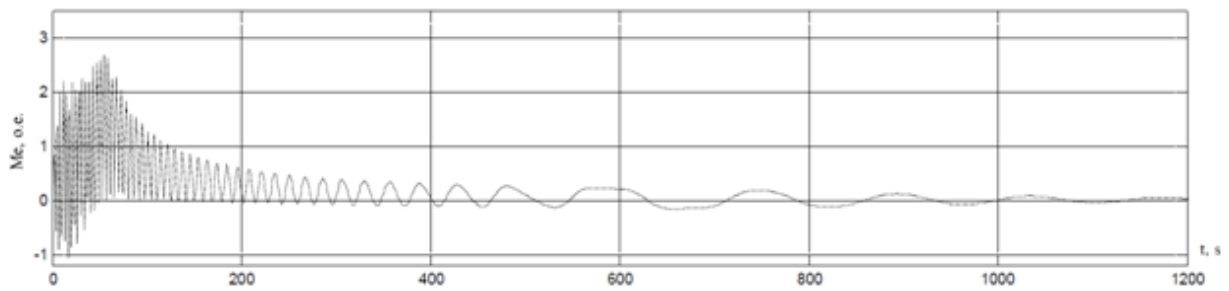
а)



б)



в)



г)

а) струм фази А; б) струм обмотки збудження; в) частота обертання ротора;
 г) електромагнітний момент СД

Рис. 1. Результати моделювання пускових режимів СД

Асп. Шевцов В.Б., к. техн. н. Носов Д.Г.

Дніпровський державний технічний університет

**ІНТЕГРОВАНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ
АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ, ЩО ВРАХОВУЄ ХІМІЧНИЙ СКЛАД,
МІКРОСТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
НАПЛАВЛЕНОГО ШАРУ**

Адитивне наплавлення сьогодні набуває особливої актуальності у сфері відновлення технічних деталей та виготовлення складних конструкцій. Його переваги – висока точність, можливість керування мікроструктурою та економія матеріалу – вже не викликають сумнівів у дослідницькому середовищі. Проте зі збільшенням вимог до властивостей готових виробів зростає і потреба в удосконаленні математичних моделей, що дозволяють не лише описати процес, а й керувати ним. Справжнім викликом стає врахування усієї повноти фізико-хімічних змін, які супроводжують формування шару наплавленого металу.

У рамках нашого дослідження була поставлена мета побудувати інтегровану модель, яка комплексно описує вплив технологічних параметрів на структуру та властивості отриманого матеріалу. Йдеться про модель, що заснована на ґрунтовних фізичних принципах та здатна забезпечити достовірне прогнозування результатів у реальних умовах виробництва.

Фактично, маємо справу зі спробою синтезувати в єдиній обчислювальній структурі хімію розплаву, кінетику тверднення та механічну відповідь матеріалу на навантаження. Цілком можливо, що саме цей підхід у майбутньому закладе основу для створення автономних систем керування технологічними процесами.

Процес моделювання було поділено на три взаємопов'язані блоки. Перший з них дозволяє визначити зміну хімічного складу в залежності від режимів

наплавлення. Тут доцільним виявилось застосування моделей переносу маси з урахуванням випаровування легуючих елементів. Другий блок, в основі якого лежать положення фазової термодинаміки, відображає формування мікроструктури, зокрема зернову морфологію та фазовий склад. Третій рівень моделі встановлює зв'язок між структурними характеристиками та механічними властивостями, такими як твердість, міцність на розтяг, ударна в'язкість.

Усі три частини моделі було об'єднано в єдиний симуляційний контур, побудований на основі системи рівнянь регресійного та диференціального типу. Особливу увагу було приділено розв'язанню задачі багатокритеріальної оптимізації. Технологічний процес часто потребує компромісних рішень: наприклад, досягнення високої твердості може призводити до зниження пластичності. Саме тому застосування методів Парето-аналізу дозволило знайти зони технологічної стабільності, в яких досягається оптимальний баланс між вимогами до різних характеристик.

Результати чисельного моделювання порівнювалися з експериментальними даними, отриманими шляхом наплавлення реальних зразків на різних режимах. Аналіз проводився із застосуванням спектральної мікроскопії, мікротвердоміра та механічних випробувань. Розроблена модель з високим ступенем достовірності відтворює основні тенденції зміни властивостей при зміні технологічних параметрів. У деяких випадках похибка моделювання не перевищувала 5...7%, що дозволяє говорити про її прикладну цінність.

У підсумку, створена інтегрована модель дає змогу не лише прогнозувати результат наплавлення, а й керувати ним у процесі виготовлення. Це відкриває перспективи для створення повноцінних цифрових двійників технологій, які можуть в реальному часі коригувати режим з урахуванням зворотного зв'язку. У подальшій роботі ми плануємо вбудувати в структуру моделі елементи

машинного навчання, що дозволить враховувати нетипові ситуації, зокрема вплив нових сплавів та флуктуацій температури, що не вкладаються в класичні рівняння.

Асп. Шляхов Є.О

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ШТАМПІВ З ПРУЖНОЮ ОСНОВОЮ

Розробка комп'ютерних моделей для опису процесу взаємодії важких штампів з основою, що піддається деформаціям під навантаженням, є складним і багатоаспектним завданням, яке має важливе значення для сучасного будівництва та інженерії. Ця основа зазвичай складається з кількох шарів з різними фізико-механічними властивостями, що можуть змінюватися під впливом зовнішніх чинників, таких як тиск важких об'єктів, зміни температури, сезонні коливання вологості та інші динамічні фактори. Залежно від рівня прикладеного тиску та сили взаємодії з штампом, структура основи може змінюватися локально або на значній глибині, що впливає на її загальну стійкість.

Ці моделі мають важливе практичне значення, оскільки дозволяють прогнозувати поведінку основи під впливом великих навантажень, що є особливо актуальним для будівельних конструкцій і масивних споруд. Надійне прогнозування змін у структурі основи дозволяє заздалегідь оцінити ймовірність таких негативних явищ, як осідання або перекося. Ці явища часто призводять до порушення стійкості будівель і потребують регулярного моніторингу для запобігання можливим аварійним ситуаціям.

Особлива увага приділяється ситуаціям, коли під основою споруд створюються штучні порожнини, такі як підземні сховища для зберігання природного газу або токсичних відходів промислового виробництва. Також підземні комунікації, такі як тунелі метро, каналізаційні та водопровідні системи. Ці порожнини часто призводять до значного перерозподілу навантаження на підземні шари та можуть спричинити осідання верхніх шарів основи, що згодом впливає на цілісність споруд, розташованих на поверхні. Крім того, такі зміни можуть викликати утворення тріщин або навіть сприяти просіданню, що загрожує обвалами або серйозним пошкодженням.

Також важливим аспектом дослідження є вплив природних умов на структуру основи. Наприклад, сезонні зміни, такі як замерзання та відтавання ґрунту, можуть викликати фазові переходи, що призводить до суттєвої зміни властивостей ґрунтових матеріалів.

Таким чином, створення таких моделей є досить складним завданням, яке потребує високої точності та врахування різноманітних факторів. Для вирішення цієї проблеми використовується комплексний підхід. По-перше потрібно поставити зв'язну еволюційну задачу. Для розв'язання поставленої задачі застосовуються варіаційні методи. Використання методу скінченних елементів дозволяє виконати апроксимацію процесу деформації. Метод скінченних елементів обрано, адже він дозволяє моделювати складні геометричні форми, які важко описати аналітичними методами. Що є особливо важливо для об'єктів з нерегулярними контурами, отворами або іншими особливими деталями. Також метод дозволяє адаптивно підвищувати точність у зонах з високими градієнтами напружень чи деформацій, залишаючи більші елементи у менш критичних ділянках.

На першому етапі досліджень розглядається процес зміни тиску та повороти споруди у наслідок видалення матеріалу у околі споруди. Для цього вирішується задача плоскої деформації під дією штампів півплощини з якої

вилучають або до якої додають матеріал. Досліджуються допустимі розміри та розташування ділянок видалення або додавання за яких тіло зберігає свою стійкість.

Важливою складовою цього процесу є розробка відповідного програмного забезпечення, оскільки воно дозволяє проводити численні обчислювальні експерименти, які допоможуть перевірити та уточнити модельні припущення, а також забезпечити точність прогнозів. На основі отриманих результатів матимемо змогу сформулювати практичні рекомендації для інженерних і наукових цілей.

К. техн. н. Шматко Д.З., здоб. освіти Буланій Р.О.

Дніпровський державний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ВВЕДЕННЯ ПРИСКОРЕНИХ РЕЖИМІВ РУХУ АВТОБУСІВ НА МАРШРУТАХ

Прискорені (експресний і швидкісний) режими руху автобусів раціонально вводити на маршрутах з незначним пасажирообміном на проміжних зупинках або з обмеженою кількістю зупиночних пунктів, де є значний пасажирообмін. Практично раціональність організації прискорених режимів руху визначається наявністю пасажирів, які їздять від початкового до кінцевого зупиночного пунктів маршруту по значній частині його тривалості, структурою пасажирських кореспонденцій по маршруті і може бути отримана без проведення трудомістких обстежень на підставі відомої кількості входів і виходів пасажирів на зупиночних пунктах. Для формування комбінації режимів руху автобусів на маршруті необхідно призначити зупиночні пункти для автобусів, які працюють в прискореному режимі, і визначити їх кількість. У даному випадку можуть бути застосовано моделювання раціональних швидкісних і експресних режимів.

Коефіцієнт змінності пасажирів на маршруті представляє собою відношення довжини маршруту до середньої дальності поїздки пасажирів на цьому маршруті

$$K_c = \frac{l_m}{l_n}. \quad (1)$$

Чим менше коефіцієнт змінності пасажирів на маршруті, тим більше питома вага пасажирів, які їздять від початкового до кінцевого зупиночного пункту, або по значній частині довжини маршруту.

Необхідна кількість прискорених рейсів уточнюється по фактичному пасажиропотоку. Наповнення автобусів в прискорених рейсах повинно дорівнювати наповненню автобусів в звичайних рейсах або меншим на стільки, на скільки збільшилась швидкість сполучення

$$K'_n \cdot \frac{v'_c}{v''_c} \leq K''_n \leq K'_n, \quad (2)$$

де K'_n і K''_n – коефіцієнти наповнення автобусів відповідно працюючих в звичайному і прискореному режимах;

v'_c і v''_c – швидкість сполучення на маршруті при звичайному і прискореному режимах руху.

Коефіцієнт наповнення автобусів на найбільш навантаженому перегоні маршруту визначається по формулі

$$K_n = \frac{P_{\text{пер}} \cdot T_{\text{зв}}}{T_{\text{пік}} \cdot A}, \quad (3)$$

де $P_{\text{пер}}$ – пасажиропотік на найбільш навантаженому перегоні маршруту за період піку; $T_{\text{зв}}$ – тривалість зворотного рейсу на маршруті; $T_{\text{пік}}$ – тривалість періоду пік, який розглядається; A – кількість автобусів, які працюють на маршруті.

Якщо після введення прискорених режимів руху на маршруті наповнення працюючих в цих режимах автобусів вища, ніж при звичайному режимі, то кількість прискорених рейсів необхідно збільшити при дотриманні встановлених для звичайного режиму обмежень по максимально припустимому інтервалу руху автобусів. При інтервалі руху автобусів прискореного режиму більше 10 хвилин вводиться рух за відомим пасажиром розкладом, в протилежному випадку – по відомому пасажиром інтервалу.

Список використаних джерел

1. Шматко Д.З., Коробочка О.М., Авер'янов В.С. Вдосконалення та організація транспортної мережі автобусних міських перевезень. Наукове видання. Кам'янське: ДДТУ, 2018. 155 с.

2. Босняк М.Г. Пасажирські автомобільні перевезення. Навчальний посібник. К.: Видавничий дім „Слово”, 2013. 386 с.

Postgraduate student Yashchuk O.O., Ph.D. in Economics Gurzhiy T.O.

Dnipro State Technical University

MATHEMATICAL MODELING OF VECTOR CONTROL FOR INDUCTION GENERATORS IN WIND POWER SYSTEMS

The contemporary stage of energy sector development is characterized by the active implementation of technologies that ensure high energy efficiency and environmental friendliness. Wind power plants are particularly promising, which necessitates the use of sophisticated mathematical models for their design and operational analysis. Research on mathematical methods and models for the synthesis and analysis of energy-efficient vector control systems for induction generators is a relevant direction, enabling significant enhancement of generator efficiency and reduction in energy losses.

Vector control is a modern method of controlling electromechanical systems based on a mathematical model of vector management, providing high dynamic accuracy and efficiency. To synthesize such a system, an induction generator model

described by a nonlinear system of differential equations in the Clarke-Park coordinate transformation form is used:

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s}(u_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_e L_s i_{sq}), \quad (1)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s}(u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_e L_s i_{sd} - \omega_e \psi_r), \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_m - B\omega_r), \quad (3)$$

where i_{sd} , i_{sq} are stator currents in $d - q$ axes; u_{sd} , u_{sq} are stator voltages; ω_e , ω_r are electrical and mechanical rotational speeds; R_s , L_s , ψ_r represent respectively the stator resistance, inductance, and rotor flux linkage; J , B are inertia moment and friction coefficient; T_e , T_m are electromagnetic and mechanical torques.

The electrical power loss function in the system is defined as:

$$P_{loss} = 1.5R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2), \quad (4)$$

where R_s is the stator resistance, and the coefficient 1.5 accounts for the three-phase nature of the machine and ohmic losses in the stator.

The goal of control optimization is the minimization of power losses and improvement of system efficiency, mathematically formulated as a minimization problem for the integral loss function:

$$F(u_{sd}, u_{sq}) = \int_0^T (P_{loss}(t))dt \rightarrow \min. \quad (5)$$

Software was developed for optimization modeling (Fig. 1), implementing gradient-based optimization using the L-BFGS-B algorithm to determine optimal control inputs (u_{sd}, u_{sq}) that minimize the integral of power losses over the simulation period. Optimization is performed by discretizing control inputs over time, simulating system behavior with these inputs, calculating total power losses, and iteratively improving the control inputs to reduce losses.

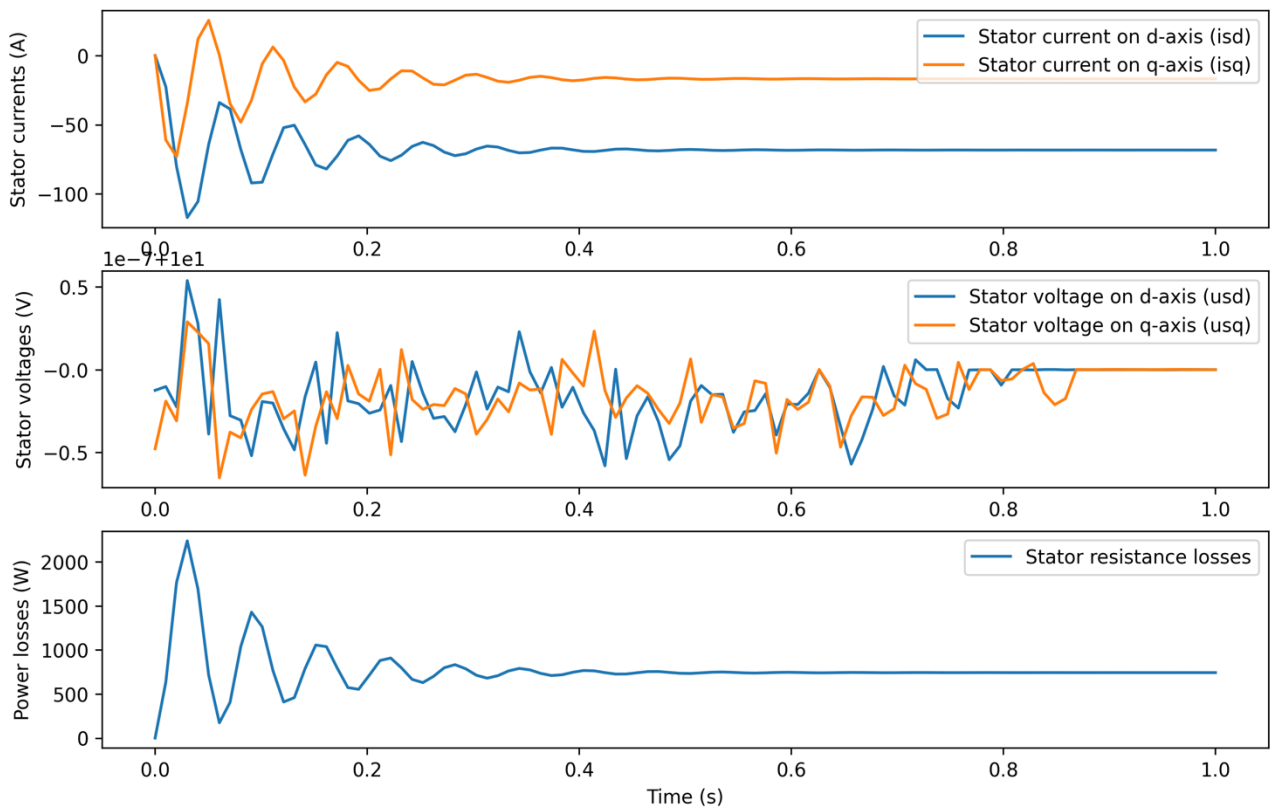


Fig. 1. Modeling and optimization of an induction generator

The proposed approach can be expanded by adding constraints to the optimization problem, implementing more sophisticated control strategies, modeling measurement noise and developing state observers, and introducing relay-vector control logic. Prospective development directions include integration with weather prediction models for wind plants, hybrid control strategies, fault detection systems, coordinated operation of multiple generators in wind farms, and adaptation to changing grid conditions.

Applying the developed mathematical models allows not only qualitative assessment of wind power plant operations but also the prediction of their economic efficiency. Implementing the optimized vector control system can potentially reduce energy losses by 10-15%, significantly decreasing operational expenses and enhancing the investment attractiveness of large-scale projects. These conclusions are

validated by mathematical model analyses, enabling the preliminary evaluation of financial benefits from implementing such control systems.

References

1. Abdessemad, O., Nemmour, A.L., Louze, L., Khezzar, A. Real-time implementation of a novel vector control strategy for a self-excited asynchronous generator driven by a wind turbine. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2021, Vol. 54, No. 2, pp. 235–241. DOI: <https://doi.org/10.18280/jesa.540205> (accessed: 16.05.2025).
2. Qiangqiang Li, Wei Chen, Zhanhong Wei, Zhenyu Kang, Yan Tang. Stability and modal analysis of a DFIG-based wind energy conversion system under stator voltage vector control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, Vol. 162, Article No. 110286. ISSN 0142-0615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110286> (accessed: 16.05.2025).

Секція 3

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ І УПРАВЛІННІ

PhD M. Babenko, Master's student I. Motsnyi, N. Lymar

Dniprovsky State Technical University

DESIGNING AN INTELLIGENT ONLINE STORE SYSTEM USING ONTOLOGICAL TOOLS

An online store is a digital platform where goods are sold directly to consumers (individuals or legal entities), including product delivery. All interactions – such as browsing product information, placing an order, and completing a transaction – take place within the digital environment (on the store's website). Secure protocols, such as HTTPS and other security systems, are implemented to ensure safe user interaction.

Designing a modern online store can be considered part of building an intelligent e-commerce system, where advanced business process development technologies are applied. These include ontologies, artificial intelligence, mathematical and object-oriented modeling within the field of systems design, and the representation of organizational structures.

Modeling electronic commerce involves the creation of theoretical or simulation models that describe how e-commerce operates under various conditions. Such modeling enables the analysis, prediction, and optimization of business processes, customer interactions, logistics, marketing strategies, and other aspects of online sales.

In practice, e-commerce encompasses more than just financial or commercial transactions conducted via networks. It comprises entire chains of global business processes associated with executing those transactions.

With increasing digitalization and the mass shift to online platforms, e-commerce has become a key driver of transformation in the global economy. It is projected that by 2040, 95% of all purchases will be made through online stores.

The most common reasons consumers choose to shop online include: free shipping (53%), promotions and discounts (41%), access to reviews (35%), ease of return (33%), and fast checkout (30%). Additionally, 33.6% of users compare prices between online platforms and physical stores before purchasing, and 81% thoroughly research products online before making major purchases.

E-commerce is moving toward personalization – enabled by intelligent product search and recommendation systems, personal shopping assistants, and other tools. Artificial intelligence can analyze user behavior and preferences to generate personalized recommendations, accounting for individual characteristics. For instance, grocery retailers are already offering product suggestions based on genetic testing and basic health indicators.

An essential aspect of designing an intelligent system is ontological analysis of the domain. This involves structuring and classifying entities, defining relationships, parameters, and characteristics, and developing a domain-specific thesaurus. Ontological analysis not only organizes knowledge but also enhances the overall quality of system design.

An ontology is a formal specification of a given domain and is used as a means of representing knowledge about a specific fragment of the real world. In the context of developing an intelligent online store, ontological tools are especially useful for modeling user behavior. A user profile ontology can include purchase history, preferences, categories of interest, and other attributes. This allows for the generation of personalized product suggestions based on user behavior.

Ontologies can also be applied to model the purchasing process itself, describing each stage – product selection, adding items to the cart, placing an order, payment processing, and delivery. This facilitates automation and decision-making, for example, by enabling the system to predict whether a customer is likely to complete or abandon a purchase.

Ontologies are widely used across various fields. Their extensive application has driven the need for standardized representation methods. As a result, several ontology description languages have been developed—most notably the Resource Description Framework (RDF Schema), the Web Ontology Language (OWL), and Extensible Markup Language (XML Schema). In addition, a wide range of ontology editors has emerged to support the creation and modification of ontologies.

PhD Бажан С.М.

ВСП «Технологічний фаховий коледж ДДТУ»

ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ОБСЛУГОВУВАННЯ КЛІЄНТСЬКИХ ПОТОКІВ БАНКІВСЬКИХ УСТАНОВ

Оптимізація процесів обслуговування клієнтів у банківських установах залишається одним із важливих напрямів досліджень у сфері прикладної математики, комп'ютерного моделювання та системного аналізу. Сучасні банківські сервіси передбачають наявність кількох каналів взаємодії з клієнтом – касові вікна, консультанти, термінали самообслуговування та електронні сервіси. Нерівномірне навантаження на канали обслуговування призводить до формування черг, зростання часу очікування та зниження рівня задоволеності клієнтів. Це вимагає розробки ефективних математичних та алгоритмічних підходів до управління чергами й ресурсами в межах банківського відділення.

Метою дослідження є створення імітаційної моделі черг у багатоканальному банківському середовищі з використанням генетичного алгоритму для оптимізації параметрів функціонування системи, а саме мінімізації загального часу очікування клієнтів. У процесі моделювання розглядаються три основні канали обслуговування: каси, консультанти/менеджери та термінали самообслуговування. У моделі враховано випадкову інтенсивність надходження клієнтів (за розподілом Пуассона), час обслуговування, пріоритети клієнтів, можливість переадресації на інші сервіси, а також розклад роботи персоналу.

Імітаційна модель побудована за принципами дискретно-подієвого моделювання з використанням середовища для імітаційного моделювання, що дозволяє врахувати динаміку змін у системі в реальному часі. В основі оптимізаційного модуля лежить класичний генетичний алгоритм, адаптований до умов обслуговування клієнтів у банку.

Основними елементами алгоритму є хромосома, яка кодує стратегію обслуговування, включаючи кількість відкритих кас, співвідношення клієнтів, що перенаправляються до терміналів самообслуговування, а також структуру графіка змін персоналу. Функція пристосованості визначає ефективність кожної особини або стратегії, беручи до уваги середній час перебування клієнта в системі, максимальну довжину черги та рівномірність завантаження каналів обслуговування. Селекція здійснюється методом турнірного відбору, що сприяє збереженню генетичного різноманіття в популяції. Оператори кросоверу та мутації реалізовані з адаптивною ймовірністю, яка залежить від ступеня збіжності популяції на кожному етапі еволюції.

Було реалізовано імітаційні моделі трьох місцевих відділень представників банків, які входять до найпопулярніших банківських установ країни. Було проведено серію експериментів для банківської установи в умовах різної інтенсивності клієнтських потоків (години пік та стандартний режим роботи). Імітаційні експерименти засвідчили, що застосування генетичного алгоритму дозволяє скоротити середній час очікування клієнтів до 28%, зменшити

максимальну довжину черги в пікові години до 35%, забезпечити більш рівномірне навантаження між різними каналами обслуговування, а також підвищити коефіцієнт ефективності використання персоналу на 15%.

Таким чином, поєднання імітаційного моделювання з методами еволюційної оптимізації створює надійний інструмент для підтримки прийняття рішень у сфері банківського сервісу. Запропонований підхід може бути легко адаптований до інших сервісних систем, таких як центри надання адміністративних послуг, медичні установи чи торгові підприємства.

PhD Бажан С.М., здобувачка Трубіцина А.Р.

ВСП «Технологічний фаховий коледж ДДТУ»

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ЯК ПЕРСОНАЛЬНОГО КОНСУЛЬТАНТА У ВЕБМАГАЗИНІ ПАРФУМІВ

Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ) суттєво трансформує цифровий ландшафт сучасного суспільства, зокрема – інтернет-комерцію. Інтеграція інтелектуальних моделей у вебсередовище вже не є лише експериментальним підходом, а стає одним із визначальних чинників ефективної взаємодії з користувачем. ШІ дедалі частіше застосовується для персоналізації сервісів, оптимізації логістичних процесів, прогнозування потреб споживачів та надання автоматизованих консультацій. Однією з перспективних ніш для впровадження інтелектуальних технологій є ринок парфумерної продукції, де вибір заснований на суб'єктивних вподобаннях, емоційних асоціаціях і стилістичних тенденціях. У цьому контексті постає актуальна задача створення інноваційного інструменту – сайту магазину парфумів із вбудованим модулем штучного інтелекту, що виконує функцію персонального консультанта.

Мета роботи – розробити вебзастосунок, що поєднає класичний функціонал інтернет-магазину парфумів із системою штучного інтелекту, яка надає інтелектуальну підтримку, персоналізовані рекомендації та консультації користувачам під час вибору аромату.

Вебзастосунок реалізовано за допомогою мови програмування PHP, з використанням серверного середовища Apache (платформа XAMPP), системи управління базами даних MySQL, доступ до якої здійснювався через інтерфейс phpMyAdmin. Розробка велась у середовищі Visual Studio Code, що забезпечило гнучкість та інтеграцію різноманітних інструментів розробника.

Графічний дизайн був адаптований до сучасних вимог UX/UI-дизайну, згенерований за допомогою засобів штучного інтелекту, включаючи ChatGPT, Leonardo AI та інші, що поєднує естетику та функціональність. Функціонал сайту включає стандартні модулі реєстрації та авторизації з доступом до особистого кабінету, можливість додавання товарів до списку бажаного, формування кошика та оформлення замовлення.

Для зберігання даних про товари, користувачів, історію покупок та обрані аромати створено базу даних, що дає змогу виконувати запити з високою швидкістю обробки. Розроблений сайт включає в себе структурований каталог продукції, поділений на три основні категорії: жіночі, чоловічі та унісекс аромати. Кожна одиниця товару супроводжується описом нот, бренду, типу аромату, а також зображенням та іншою необхідною інформацією.

Ключовою особливістю стало впровадження інтелектуального консультанта, побудованого на базі моделі LLaMA 3, яка інтегрується через інфраструктуру Groq – сучасну високопродуктивну платформу для виконання запитів до ШІ в режимі реального часу. Застосований підхід забезпечує можливість надання як загальних порад щодо вибору аромату (з урахуванням сезонних трендів, вікових вподобань, стилю життя), так і індивідуального підбору з наявного асортименту магазину на основі запиту користувача.

Наприклад, на запит: «Шукаю легкий, цитрусовий аромат для літа, щось схоже на Dior Homme Cologne», система формує релевантну добірку товарів із внутрішньої бази, підкріплену коротким обґрунтуванням кожного варіанту.

З технічної точки зору була реалізована безперервна взаємодія з інтелектуальним модулем через REST-інтерфейс, що дозволило підтримувати динамічне оновлення рекомендацій без необхідності перезавантаження сторінки. Система консультацій має також функцію навчання – відповіді користувачів на рекомендації враховуються для подальшого уточнення вподобань, що реалізує принцип гібридної адаптивної фільтрації.

Інтеграція штучного інтелекту до сайту дозволяє не лише точніше реагувати на індивідуальні запити користувачів, а й формувати аналітичну картину актуальних уподобань клієнтів. Надається можливість оперативно оновлювати асортимент, орієнтуючись на реальні потреби покупців, додавати популярні позиції запитуваних ароматів. Такий підхід забезпечуватиме гнучке управління товарною базою, підвищуватиме задоволеність клієнтів і сприятиме ефективній адаптації магазину до змін ринку.

Таким чином, розроблений вебзастосунок не лише задовольняє стандартні функціональні вимоги до інтернет-магазину, а й слугує прикладом сучасного підходу до персоналізації клієнтського досвіду завдяки впровадженню штучного інтелекту. Інтеграція таких технологій у сферу електронної комерції відкриває нові можливості для покращення взаємодії з користувачем, розширення аудиторії, підвищення конкурентоспроможності бізнесу.

К. техн.н. Волосова Н.М., здоб. освіти Гноєвой Д.В.

Дніпровський державний технічний університет

GRAPHIC MODEL OF OPTIMAL HOTEL MANAGEMENT ORGANIZATION

Due to rapid changes in the economic, technological and social spheres, hotel business enterprises are in constant transformation. The use of mathematical modeling to study the state, organize optimal activities, predict development strategies and make effective management decisions is one of the most effective methods of optimizing hotel activities.

In the study, using graph theory and time series analysis, a mathematical model of optimal hotel business activities was built. The mathematical model is presented in the form of a graph - a decision tree, the branches of which cover different areas of the enterprise's activities: accommodation, catering, additional services and business services (fig.1)

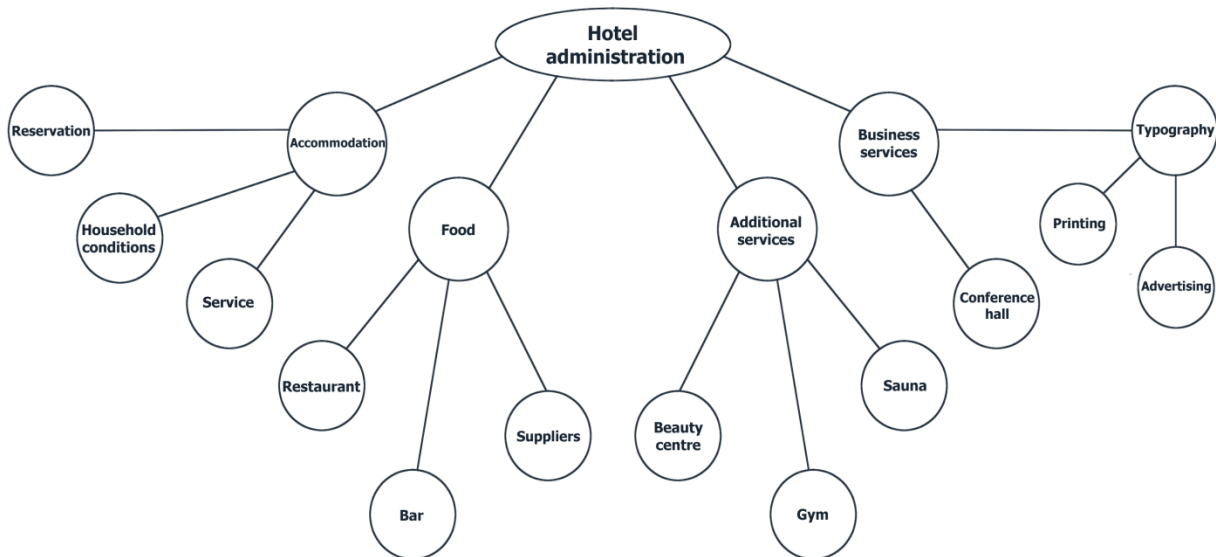


Fig. 1. Decision Tree Graph

The decision tree visualizes both known and processed information obtained during data analysis and processing and used to build a mathematical model, and also

allows you to understand the relevance and sequence of making the necessary subsequent management decisions, predict the necessary changes, and make adjustments to the model taking them into account.

Data processing and necessary numerical calculations were performed in the MathCAD computer mathematics system and MS Excel spreadsheets.

References

1. Волосова Н.М., Гноєвой Д.В. Математичне моделювання оптимальної діяльності підприємства готельного бізнесу //Importance of Soft Skills for Life and Scientific Success: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference, March 6-7, 2025. FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine, 220 p. P. 54-55.
2. Волосова Н.М., Гноєвой Д.В. Mathematical modeling of the development of the hotel business enterprise by means of the method of analysis of hierarchies. *Проблеми математичного моделювання: матеріали Всеукр. наук.-метод. конф., 22-24 травня 2024 р. Кам'янське: ДДТУ, 2024. С. 44-46.*
https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/zbirn_2024.pdf
3. Стеблюк Н., Волосова Н., Небаба Н., Юдіна О., Корнеєв, М., & Журавка, Ф. Economic trends forecasting in the development of hotel business enterprises // *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 5(46), 2022. P. 182–193.
<https://doi.org/10.55643/fcaptp.5.46.2022.3876>

К. техн. н. Волосова Н.М.¹, к.е.н. Стеблюк Н.Ф.²

¹*Дніпровський державний технічний університет*

²*Університет митної справи та фінансів*

MATHEMATICAL MODELING OF THE LOGISTICS SERVICE SYSTEM

In the conditions of growing competition in the services market, the quality of logistics services plays an important role. An important issue is determining the optimal level of service, which will reduce losses in the services market, but also regulate service costs.

The level of logistics service is determined by the following indicators:

- Reliability of supply;
- Optimal time from receipt of order to delivery of a batch of goods;

- Possibility of choosing a delivery method;
- Availability of stocks;
- Possibilities of crediting, payment in installments.

During the study, a mathematical model of the logistics service system was built, which includes the following stages:

- 1) Market segmentation, dividing it into groups of service recipients in accordance with consumption characteristics.
- 2) Determining the most important services for consumers.
- 3) Ranking services.
- 4) Evaluating services, establishing relationships between the level of service and the cost of services provided.
- 5) Determining the level of service necessary to ensure the competitiveness of the company.
- 6) Establishing a reverse connection with consumers to ensure that services meet their needs.

The implementation of the proposed mathematical model will allow the enterprise to attract and retain its consumers.

К. фіз.-мат. н. Гнатів Б.В., к. фіз.-мат. н. Гнатів Л.Б.

Національний університет «Львівська політехніка»

МОДЕЛЬ ЕКОНОМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ ЗАКОНІВ ЕКОНОФІЗИКИ

Одним з основних недоліків класичної економіки є те, що більшість економічних законів формулюється описово. Існує мало методів для кількісного опису важливих економічних законів, таких як продуктивність праці, ціноутворення, розподіл ресурсів, тощо. Для вирішення таких проблем економікою зацікавилися представники інших професій. Одними з таких

представників стали фізики. Зацікавлення фізиків до економічної теорії привело до зародження нової дисципліни – еконофізики.

Проблеми, які постають перед еконофізиками, здебільшого пов'язані з аналізом великих масивів кількісних даних, до яких відносяться:

- Розподіл доходів фірм і статистичні властивості швидкості їх росту.
- Вивчення взаємодії економічних агентів по аналогії із взаємодією елементарних часток.
- Статистичні властивості економічної активності країн.
- Прогнозування економічних криз.
- Аналіз нерівномірності розподілу доходів.
- Вивчення коливань економічної активності і темпів економічного росту.
- Економічна система відноситься до складних систем, відмінністю яких є те, що результат має неоднозначну функціональну залежність від вхідних даних.

Для побудови математичної моделі використано методи теорії динамічних систем, що використовують при моделюванні систем які розвиваються. Накопичення членів кожної групи – $U_i, i=1, \dots, 6$, та ціна продукту p є динамічними змінними для даної моделі.

Суспільство розділене на 6 груп (пенсіонери, працівники промисловості, бюджетники, працівники сфери послуг, працівники сировинної промисловості, власники підприємств).

Рівняння для накопичення груп являють собою баланс доходів і витрат.

Ціна продукту p визначається з умови балансу попиту і пропозиції на ринку. Рівняння для ціни p має вигляд

$$dp/dt = \gamma \left[\sum_{i=1}^5 (N_i \cdot Q(r_i) + N_6 \cdot Q(g \cdot r_6)) - Q_{imp} - N_6 \cdot F \right]$$

де Q_{imp} – та кількість товару, який імпортується на внутрішній ринок країни (од./міс.), γ – визначає на скільки швидко зміниться ціна товару, коли зміниться попит на одну одиницю.

В системі є три процеси. «Швидкий» – з часом τ_p для рівняння ціни, проміжний процес з часом τ_0 - 1 місяць, та «повільний» – з часом τ_0 - 3 місяці.

Згідно з теоремою Тихонова про редукцію системи можна спростити модель, виключивши «швидкий» процес. Тоді рівняння для групи власників матиме вигляд, з якого можна визначити рівняння для ціни p .

$$\sum_{i=1}^5 (N_i \cdot Q(r_i) + N_6 \cdot Q(g \cdot r_6)) - Q_{imp} - N_6 \cdot F = 0$$

Отже, макроекономічна модель має наступний вигляд:

$$\frac{dU_1}{dt} = \bar{P}_1 - p \cdot Q(r_1), \quad \frac{dU_2}{dt} = (1 - k_0) \cdot P_2 \cdot p - p \cdot Q(r_2),$$

$$\frac{dU_3}{dt} = (1 - k_0) \cdot \bar{P}_3 \cdot p - p \cdot Q(r_3), \quad \frac{dU_4}{dt} = (1 - k_0) \cdot P_4 \cdot p - p \cdot Q(r_4),$$

$$\frac{dU_5}{dt} = (1 - k_0) \cdot \bar{P}_5 - p \cdot Q(r_5), \quad \frac{dU_6}{dt} = (\mu \cdot F - Q(g \cdot r_6)) \cdot p,$$

$$\sum_{i=1}^5 (N_i \cdot Q(r_i) + N_6 \cdot Q(g \cdot r_6)) - Q_{imp} - N_6 \cdot F = 0,$$

$$P_2 = P_4 = \frac{n_6}{n_2 + n_4} \cdot \frac{h}{\tau} \cdot (1 - g) \cdot r_6,$$

де $\bar{P}_1, \bar{P}_3, \bar{P}_5$ – розмір доходів пенсіонерів, бюджетників і працівників промисловості відповідно (у гривнях), $Q(r_i)$ – споживання продукту од./міс.,

$r_i = \frac{U_i}{p}$ – купівельна спроможність, U_i – накопичення, p – ціна продукту (в

гривнях), k_0 – податок на прибуток, n_i – чисельність групи.

	Група	n_i (млн.)
1	Пенсіонери	11.7
2	Працівники промисловості	1.8
3	Бюджетники	5.2
4	Працівники сфери послуг	2.9
5	Працівники сировинної промисловості	5
6	Власники підприємств	1.9

Обчислювальний експеримент проводився при значеннях параметрів:

$$k_0 = 0.18, \quad Q_1 = 1, \quad Q_2 = 3, \\ r_1 = r_2 = 1, \quad r_{min} = 3, \quad r_{max} = 200, \\ h = 0.5, \quad \mu = 0.5, \quad g = 0.05, \\ \lambda = 0.16, \quad \varepsilon = 0.1,$$

та початкових значеннях задачі Коші: $U_1(0) = 3000$,
 $U_2(0) = 7000$, $U_3(0) = 4000$,
 $U_4(0) = 6500$, $U_5(0) = 7000$,

$$U_6(0) = 17000, \quad p(0) = 0.1.$$

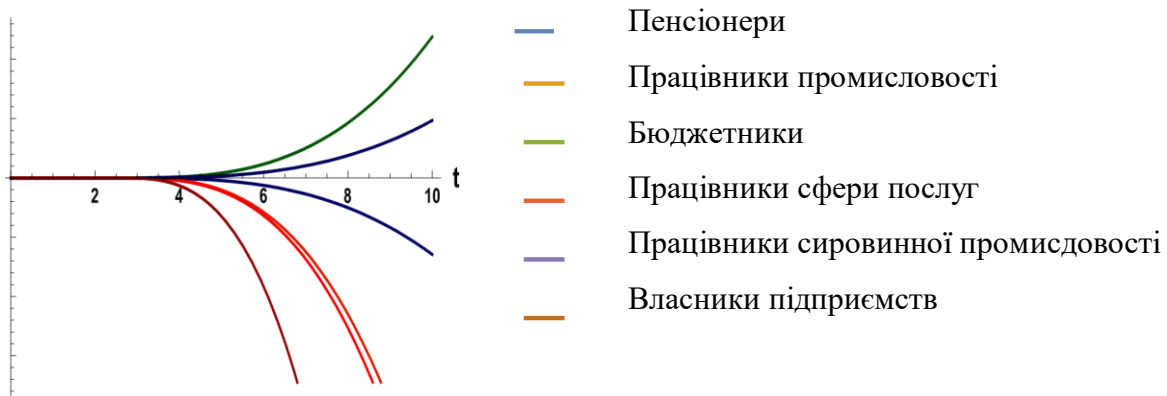


Рис.1. Графіки розв'язку системи для кожної з груп населення

Власники отримують більший прибуток, якщо «жертвувати» затратами (тіньова економіка) на оплату праці працівників.

К.е.н. Гуржий Т.О.

Дніпровський державний технічний університет

РИЗИКИ ВИКОРИСТАННЯ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ У ФІНАНСОВИХ РОЗРАХУНКАХ

В останні роки використання Великих Мовних Моделей (Large Language Models, LLM) проникає у всі сфери життя, і доки в одних сферах це прискорює виконання рутинних задач, надає нові можливості у творчих задачах та загалом оптимізує більшість видів робіт, використання LLM може мати негативні наслідки.

Процес роботи LLM у спрощеному вигляді відбувається наступним чином:

1) вхідний текст перетворюється на послідовність токенів (певний набір символів перетворюється на певний токен).

2) LLM на основі токенів утворених з вхідного тексту використовуючи статистичні методи записує у якості продовження послідовності ті токени, що на основі тренувальних даних є найімовірнішим продовженням.

3) утворена послідовність токенів перетворюється на текст (певний токен перетворюється на певний набір символів).

Через такий механізм роботи LLM не може виконувати арифметичні дії з точністю, яку зазвичай очікують від цифрових технічних засобів, бо замість проведення розрахунків вона статистично передбачує їх результат.

Це несе високі ризики: від частково неправильних результатів (наприклад - зайве округлення/неправильне округлення), до повністю неправильних результатів, особливо у багатокрокових арифметичних задачах, тобто тих, що складаються з багатьох арифметичних операцій.

З плином часу користувачі звикають вирішувати свої рутинні задачі за допомогою LLM і більшість з них вважає прості арифметичні задачі саме рутинними і не складними.

Це може мати наслідки у будь-якій сфері з математичною складовою, включаючи наступні: природничі науки, технічні науки, медицина, комп'ютерні технології, будівництво, фінанси і т.і.

Використання результатів математичних розрахунків, виконаних LLM без контролю і перевірки спеціалістами слід вважати потенційною проблемою, над якою необхідно працювати і про яку необхідно інформувати користувачів.

Як приклад можна розглянути наслідки нераціонального використання LLM у сфері фінансів, з урахуванням вірогідності похибок, що може призводити до наслідків у економічній сфері:

- **Фінансові збитки:** Найбільш очевидним наслідком є прямі фінансові втрати. Неправильні розрахунки можуть призвести до недоотримання прибутку, зайвих витрат, помилкових інвестиційних рішень тощо.

- **Порушення платоспроможності:** У важких випадках неправильні розрахунки можуть призвести до нездатності підприємства виконувати свої фінансові зобов'язання, що в свою чергу може призвести до банкрутства.

- **Зменшення конкурентоспроможності:** Помилки у фінансових розрахунках можуть призвести до неправильної цінової політики, що може знизити конкурентоспроможність підприємства на ринку.

- **Погіршення інвестиційного клімату:** Неправильні фінансові показники можуть відштовхнути інвесторів, що ускладнить залучення додаткового фінансування для розвитку бізнесу.

- **Порушення податкового законодавства:** Неправильні розрахунки податків можуть призвести до додаткових фінансових санкцій та репутаційних втрат.

- **Порушення трудового законодавства:** Помилки у розрахунку заробітної плати та інших виплат можуть призвести до конфліктів з працівниками та судових позовів.

- **Складнощі при укладенні договорів:** Партнери можуть відмовитися від співпраці з підприємством, яке має сумнівну репутацію у фінансовій сфері.

У сфері юриспруденції:

- **Адміністративна відповідальність:** Порушення фінансового законодавства може призвести до накладення штрафів та інших адміністративних стягнень.

- **Кримінальна відповідальність:** У деяких випадках, особливо при умисному прихованні фінансової інформації або шахрайстві, може наставати кримінальна відповідальність.

- **Цивільна відповідальність:** Потерпілі від неправильних розрахунків можуть подавати цивільні позови з вимогою відшкодування збитків.

Список статей, що можуть бути порушені або є пов'язаними (у тому числі про покарання) з неправильними результатами фінансових розрахунків:

- п. 36.1 ст. 36 Податкового кодексу України Податковим обов'язком визнається обов'язок платника податку обчислити, задекларувати та/або сплатити суму податку та збору в порядку і строки, визначені цим Кодексом, законами з питань митної справи.

- ст. 111 Податкового кодексу України Відповідальність за порушення законів з питань оподаткування та іншого законодавства, контроль за дотриманням якого покладено на контролюючі органи

- ст. 50 Податкового кодексу України, внесення змін до податкової звітності

- п. 123.1 ст. 123 Податкового кодексу України Штрафні (фінансові) санкції (штрафи) у разі визначення контролюючим органом суми податкового зобов'язання та/або іншого зобов'язання, контроль за сплатою якого покладено на контролюючі органи, зменшення бюджетного відшкодування або виявлення фактів використання податкових пільг не за цільовим призначенням чи всупереч умовам чи цілям їх надання

- п. 164.2 ст. 164 Кодекс України про адміністративні правопорушення Порушення законодавства з фінансових питань

• п. 164.1 ст. 164 Кодекс України про адміністративні правопорушення
Порушення порядку подання декларації про доходи та ведення обліку доходів і витрат

• ст. 89 Господарський кодекс України Управління господарським товариством

• ч. 8 ст. 9 Закон України Про бухгалтерський облік та фінансову звітність в Україні

• ч. 7 ст. 8 Закон України Про бухгалтерський облік та фінансову звітність в Україні

• ч. 6 ст. 8 Закон України Про бухгалтерський облік та фінансову звітність в Україні

• Положення про документальне забезпечення записів у бухгалтерському обліку, затвердженим наказом Міністерства фінансів України від 24.05.95р. №88

Як більш раціональний спосіб використання LLM можна назвати використання замість запитів на вирішення фінансової задачі запити на створення комп'ютерної програми, а саме коду комп'ютерної програми яка б вирішувала обрану задачу з подальшою перевіркою коду спеціалістом/користувачем, а саме математичної складової.

Список використаних джерел

1. Maltoni, D., Ferrara, M. Arithmetic with language models: From memorization to computation. Neural Networks, Department of Computer Science and Engineering, University of Bologna, Italy. 2024. №179 (106550). <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2024.106550>
2. Gambardella, A., Iwasawa, Y., & Matsuo, Y. Language Models Do Hard Arithmetic Tasks Easily and Hardly Do Easy Arithmetic Tasks. In Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 2: Short Papers), pages 85–91, Bangkok, Thailand. Association for Computational Linguistics. 2024
3. Loeber, J. Everything we know about LLMs doing Arithmetic. Substack[Електронний ресурс]. 2024. №21. <https://loeber.substack.com/p/21-everything-we-know-about-llms>
4. Reid, T. Why can't LLMs do simple maths. Medium2024. Режим доступу: https://medium.com/@thomas_reid/why-cant-llms-do-simple-maths-b509090e774a

Здоб. освіти Омельченко І.В., канд. ф.-м. н. Сафронова І.А.

Дніпровський національний університет ім. Олесь Гончара

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ВИБОРУ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

У процесі прийняття рішень часто виникає ситуація, коли інформація про альтернативи, зовнішні умови або переваги однієї особи, яка приймає рішення, є неповною. У таких випадках стандартні методи оптимізації або процедури багатоцільового вибору зазвичай не дають бажаних результатів [1]. Таким чином, виникає потреба в побудові моделей, які можуть функціонувати в умовах фрагментації інформації, дозволяючи приймати обґрунтовані рішення, незважаючи на відсутність повного знання.

Побудова багаторівневої моделі дозволить формально моделювати прийняття рішень в умовах недосконалої інформації. Очікується, що модель реагуватиме на нову отриману інформацію і водночас допомагатиме у пошуку компромісного рішення, яке буде збалансованим [2].

Розглянемо набір альтернатив, виражений як $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ та набір індивідів $G = \{g_1, \dots, g_m\}$, які є носіями або джерелами інформації. Для кожного агента задано бінарний показник доступності даних $I_{ij} \in \{0,1\}$ та значення корисності U_{ij} , що є невизначеною випадковою величиною з частково відомим або відомим розподілом D_{ij} . Мета полягає у виборі альтернативи a^* , яка мінімізує загальну невизначеність та забезпечує критерії достатності інформації.

Для кожного агента існує міра ентропії, позначена через H_i , яка вимірює рівень невизначеності, пов'язаної з його рейтингами [3]:

$$H_i = - \sum P(a^{\otimes} | o_i^{\otimes}) \log P(a^{\otimes} | o_i^{\otimes});$$
$$w_i^{\otimes} = \frac{1}{1 + H_i(a^{\otimes})},$$

де w_{ij} – вага або довіра агента g_i до оцінки альтернативи a_i .

Запропоновано адаптивне оновлення стратегії вибору

$$s_i(t + 1) = \arg \max [\hat{U}_i(t) - \lambda H_i(t) - \mu D_i(t)],$$

де $\hat{U}_i(t)$ – оцінка очікуваної корисності альтернативи на момент t , $D_{ij}(t)$ – інформаційна відстань, дивергенція Дженсена – Шеннона між думками агентів, λ, μ – коефіцієнти, що задають вагу невизначеності й розбіжностей.

Варіант вважається прийнятним, якщо його значення не гірше за інші в межах деякого ε -відхилення, і в такому значенні більше впевненості, ніж в деякому фіксованому пороговому значенні τ . Це дозволяє виключити рішення, які, хоча і здаються бажаними, але не підкріплені достатньою інформацією.

Для підтвердження працездатності моделі її було модифіковано до задачі стратегічного планування розвитку підприємства в умовах відсутності точних прогнозів. Незважаючи на те, що було доступно лише близько 30% повномасштабних даних, вдалося визначити пріоритетні стратегії з необхідним ступенем достовірності, що підтверджує ефективність методу в реальних умовах.

В роботі запропоновано новий напрямок формалізації прийняття рішень в умовах невизначеності. Запропонована модель не лише враховує наявний рівень неповноти інформації, але й забезпечує гнучкість, що дозволяє системі «навчатись» на вхідній інформації, що робить її перспективною для застосування в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, соціальному прогнозуванні, а також в управлінських контекстах, де дані є неповними або суперечливими.

Список використаних джерел

1. Грінберг А. Я., Кошкарів А. А. Моделі і методи прийняття рішень в умовах невизначеності // Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Економічні науки. – 2017. – Вип. 24. – С. 34–38.
2. Гордієнко Д. О., Мельник М. Ю. Адаптивне прийняття рішень на основі стохастичних оцінок у соціальних системах // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Математика. Механіка. – 2020. – № 4 (45). – С. 12–20.
3. Jensen R., Shenoy P. Decision making with belief functions: A review // International Journal of Approximate Reasoning, 2004. — Vol. 35. — P. 215–239

Д. ф.-м.н. Пасічник А. М., к. техн.н. Волосова Н.М.,

здобувач Гавріл С.А.

Дніпровський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ

УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВОМ

Успішне управління діяльністю підприємства залежить від ефективності організації управління її логістичними потоками: інформаційними, фінансовими, сервісними і матеріальними та необхідними логістичними операціями. Математичне моделювання логістичних стратегій відображає якісно нові підходи в управлінні підприємством.

В дослідженні побудовано логістичну систему управління підприємства готельного бізнесу, що складається з елементів, поєднаних у процесі управління сервісними та супутніми їм фінансовими та інформаційними потоками, які, у свою чергу, є відображенням потоку споживачів готельних послуг. Інформаційні потоки поділяються на зовнішні (клієнти, компанії – споживачі, посередники, конкуренти) та внутрішні (бронювання, реклама, обробка інформації, виробничі зв'язки).

При формуванні математичних моделей були враховані наступні властивості інформаційних потоків:

- 1) зовнішні інформаційні потоки чинять вплив на керування внутрішніми інформаційними потоками;
- 2) характеристики всіх інших видів логістичних потоків залежать від інформаційних потоків та їх можливостей;
- 3) інформаційні потоки необхідно ранжувати за рівнями та визначити способи впливу на кожний рівень, акцентуючись на зовнішніх інформаційних потоках від споживачів;

4) правильно визначені дії управління на зміни параметрів потоків інформації формують можливості ефективного функціонування підприємства.

Для фінансових потоків при побудові логістичної системи були враховані наступні умови:

- 1) вхідні фінансові потоки є наслідком відповідних вхідних інформаційних потоків;
- 2) вхідні фінансові потоки є первинними по відношенню до відповідних сервісних потоків.
- 3) розподіл фінансових потоків на дохідні та витратні. Основу дохідних потоків становлять платежі від номерного фонду, ресторану, надання додаткових послуг. Основу витратних фінансових потоків становлять витрати на виплату заробітної платні працівникам, податкові відрахування, сплата за комунальні послуги, тощо.

За визначеними вихідними даними інформаційних, фінансових та сервісних потоків формується організаційна структура логістичної системи. Її внутрішнє середовище становлять чотири підсистеми: 1 – Реклама та бронювання; 2 – Статистичні операції з інформацією; 3 – Управління виробничими процесами організації; 4 – Генерування вихідних даних. Зовнішнє середовище системи складають організовані та неорганізовані споживачі, готелі-конкуренти та посередники. Обслуговування інформаційно-фінансових потоків між елементами зовнішнього та внутрішнього середовища логістичної системи готелю здійснюють банки. Логістична діяльність готелю реалізовується завдяки інформаційній взаємодії чотирьох підсистем внутрішнього середовища. Для здійснення оптимального управління потоками логістичної системи готелю, виділяються точки максимального зосередження потоків у певні моменти часу.

У побудованій у дослідженні математичній моделі, логістична система представлена у вигляді графа, у якому вище зазначені точки є центральними

вершинами графа (центром графа). У результаті об'єднання розробленої у вигляді графа G_1 структури логістичної системи готелю з графом G_2 – адміністративною мережею готельного підприємства були визначені точки перетину ресурсопотоків. Як показали результати дослідження центральні вершини отриманого в результаті об'єднання графа $G_3 = G_1 \cup G_2$ є відкритими для постійного управлінського впливу і саме в них повинні зосереджуватися основні ресурси управління готелем (рис. 1).

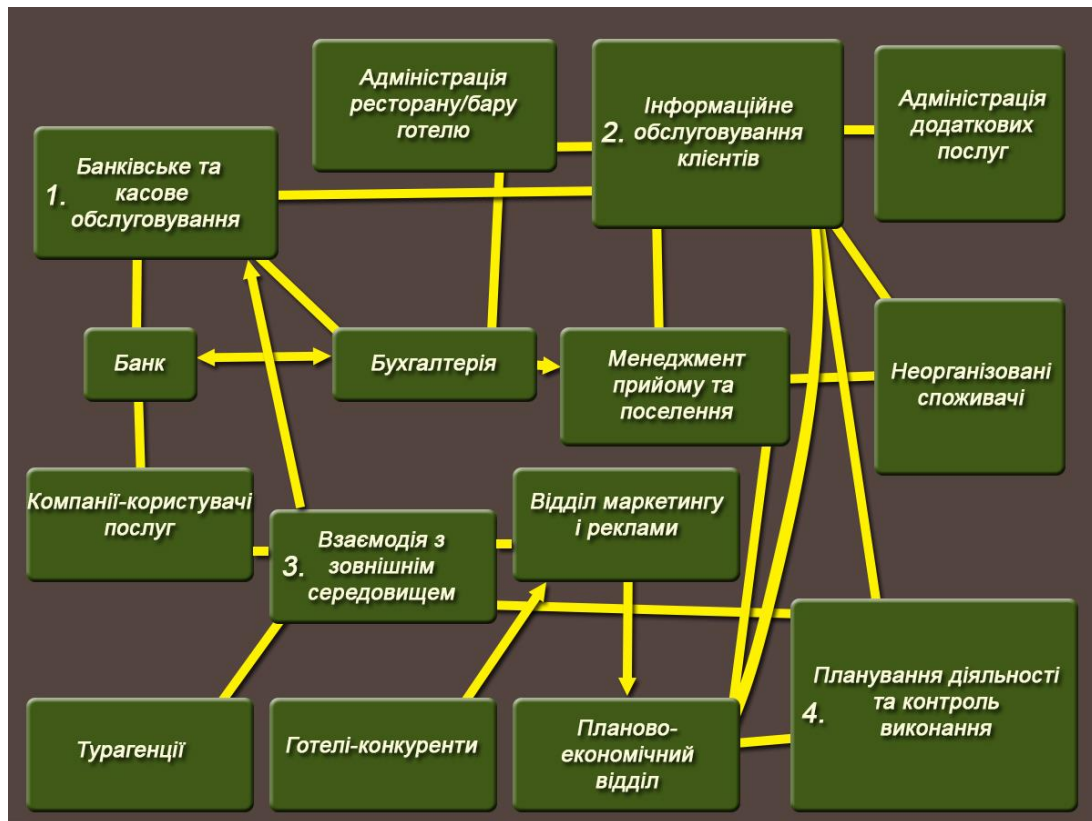


Рис.1. Граф логістичної системи управління готелем

Центр графа формує всю організаційно-управлінську структуру готелю. При побудові математичної моделі стратегічного управління та планування всіх процесів необхідно розробити технології взаємодії представників усіх служб, що зосереджені у центральних вершинах графа. Для цього було застосовано методи обходу графа та алгоритм задачі мережевого планування. Даний підхід дасть можливість підвищити ступінь координації та узгодженість служб,

мінімізувати можливі збої в роботі, ефективніше здійснювати управління ресурсопотоками готелю на кожному етапі логістичного процесу – при плануванні, організації та контролі.

Побудована математична модель логістичної системи управління підприємством готельного бізнесу дозволить організувати оптимальне управління на всіх рівнях і етапах логістичного процесу.

PhD Rozdobudko E.V.¹, PhD Nadryhailo T.Zh.²

¹Interregional Academy of Personnel Management

²Dniprovsky State Technical University

MODERN APPROACHES TO OPTIMIZATION OF BUSINESS PROCESSES MANAGEMENT OF MARKETING ACTIVITIES OF ENTERPRISES

In today's conditions of dynamic market development, increasing competition, and the digitalization of the business environment, the optimization of business processes in the field of marketing activity is of particular importance. Optimization business processes of marketing is not just desirable, but a necessary condition for achieving strategic goals, increasing competitiveness, and ensuring sustainable development of the enterprise. At the same time, there is a growing need to improve approaches to planning, organizing, controlling, and analyzing marketing activities, which requires a systematic approach to optimizing the relevant business processes. Thus, studying and implementing modern approaches to optimizing marketing business processes is an important component of an enterprise's strategic development and its competitiveness in the market.

The concept and features of business processes of managing an enterprise's marketing activities are key to the effective organization of the marketing department and achieving the strategic goals of the enterprise.

Marketing management business processes are a set of interrelated actions, procedures, and decisions aimed at planning, organizing, implementing, and controlling an enterprise's marketing activities to meet consumer needs and achieve competitive advantages, which is especially important in conditions of high competition and digital transformation.

The main marketing business processes include: conducting market research; developing new products and brands; forming pricing policies; planning and implementing advertising campaigns; managing distribution channels; building customer loyalty systems; analyzing results of marketing performance.

The peculiarity of these processes lies in their flexibility, high dependence on external factors, and the need for constant improvement in accordance with changing in the market situation. Therefore, optimizing the business processes of marketing management is a necessary condition for increasing enterprise efficiency, improving customer interactions, and strengthening market positions. It enables a shift from chaotic management to a systematic approach based on analytics, automation, and strategic planning.

To optimize the business processes of managing the marketing activities of an enterprise, various modern approaches are used [1-4], each of which is aimed at achieving specific results.

First, the Business Process Management (BPM) approach formalizes marketing processes through the creation of models such as BPMN and EPC. This allows you to identify bottlenecks, duplicates, and inefficient operations, increase process transparency, optimize costs, improve customer service, provide flexibility in changing marketing strategies, and integrate marketing activities with IT systems and CRM.

The second approach is automation process and digitalization, which includes the implementation of IT solutions, CRM systems, and analytical platforms for managing marketing activities. This helps to speed up information processing, reduce errors, and improve the customer experience.

Outsourcing marketing functions is a third approach. It involves transferring certain marketing tasks to external specialists or companies. This approach allows

you to reduce the burden on internal staff, gain access to professional expertise, and optimize costs.

The next approach is standardization and regulation of processes, which consists in establishing clear standards, instructions and templates for the implementation of marketing operations. The expected result is a reduction in variability, increased quality and simplified control.

Such an important approach as digital transformation involves the comprehensive integration of digital technologies at every stage of marketing activities. This contributes to increased flexibility, rapid response to market changes, and scalability of processes.

Lean-marketing aims to eliminate all types of waste in marketing processes with an emphasis on creating value for the customer. Applying this approach allows you to reduce costs, increase the efficiency of enterprises, and ensure a focus on results.

Finally, controlling of marketing involves the introduction of systems for assessing the effectiveness of marketing decisions based on key performance indicators (KPI), return on investment (ROI), and a balanced scorecard. This approach ensures transparency of processes, improves management decisions, and increases marketing profitability.

Conclusion. Thus, optimizing marketing business processes is a complex task that requires a systematic approach, constant analysis and the use of modern digital tools. Combining strategic vision with technical means allows you to increase flexibility, adapt to changes faster, reduce costs and achieve better results in the marketing activities of the enterprise. The implementation of such approaches will contribute to strengthening the market positions of the enterprise, sustainable development and ensuring long-term efficiency.

References:

1. Doronina M. S. *Business Processes in Enterprise Management Systems*. – Kyiv: Center for Educational Literature, 2019. – 280 p. [in Ukrainian]
2. Afanasyev M. Yu. *Optimization of Enterprise Business Processes // Economics and Management*. – 2021. – No. 3(57). – P. 45–52. [in Ukrainian]
3. Galchynskyi O. *Modern Trends in Optimization of Marketing Activities of Enterprises // Economics and Organization of Management*. – 2023. – No. 2(46). – P. 59–64. [in Ukrainian]
4. Kovalchuk O. V. *Optimization of Business Processes in the System of Enterprise Marketing Management // Bulletin of Economics of Transport and Industry*. – 2021. – No. 74. – P. 108–114. [in Ukrainian]

К. ф.-м. н. Стрєва В.О.¹, д. ф.-м. н. Кісельова О.М.²,

здоб. Тарасюк О.С.

¹Дніпровський державний технічний університет

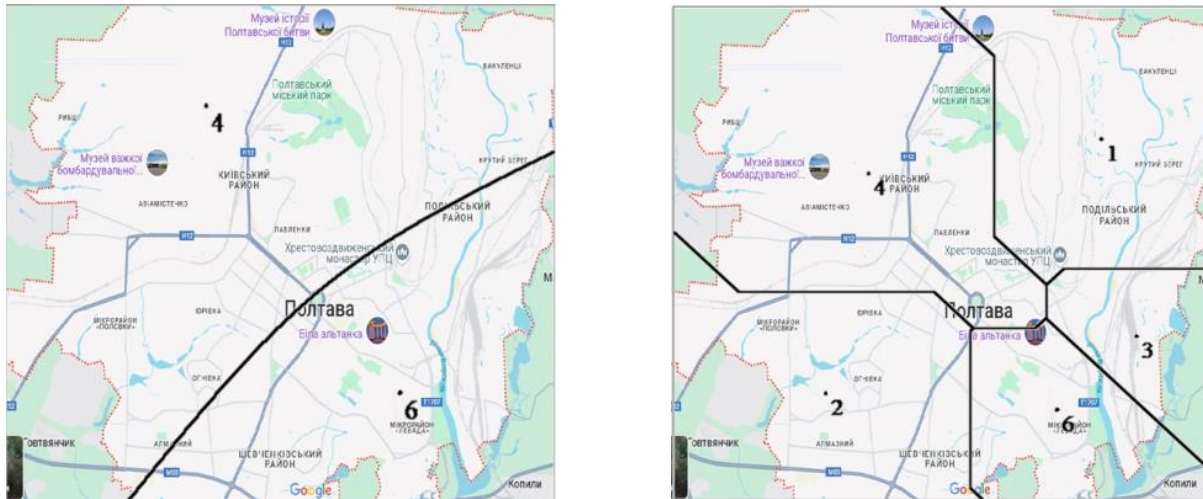
²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ОПТИМАЛЬНЕ РОЗМІЩЕННЯ МЕРЕЖІ СКЛАДІВ ІНТЕРНЕТ МАГАЗИНІВ

Сучасний світ характеризується зростаючою складністю систем, що потребують оптимізації та ефективного управління. В умовах обмежених ресурсів, часу та інформаційної невизначеності, задачі оптимального розподілу ресурсів набувають особливої актуальності. Розв'язання таких задач часто пов'язане з обробкою великих обсягів даних, що робить застосування математичних методів та інформаційних технологій необхідним. У цьому контексті, дослідження методів оптимального розбиття множин (ОРМ) є важливим напрямком, що має значний потенціал для розв'язання різноманітних прикладних задач, зокрема, задач розміщення-розподілу. У роботі проведено аналіз сучасних досліджень та публікацій, присвячених проблемам оптимального розподілу ресурсів та задачам розміщення-розподілу. Розглянуто застосування різних методів та підходів, таких як ройовий інтелект, моделі змішаного лінійно-цілочисельного програмування, географічні інформаційні системи, діаграми Вороного, задача Вебера та інші [1-2]. Особлива увага приділяється методам недиференційованої оптимізації у контексті теорії оптимального розбиття множин, які є потужним інструментом для моделювання широкого кола проблем, пов'язаних з розподілом ресурсів.

У роботі розроблено математичну модель задачі розміщення-розподілу складів інтернет-магазинів, яка враховує обмеження на потужність складів, витрати на транспортування та зберігання товарів, а також попит на різні види товарів. Запропоновано алгоритм розв'язання задачі, що базується на методах ОРМ. Проведено серію чисельних експериментів, проведеного засобами узагальненого програмного продукту [3], які демонструють ефективність

розробленого алгоритму. Зокрема, результати оптимального розміщення складів на території м. Полтава при заданих потужностях складів, нерівномірному розподілі споживачів, по товарам продовольчої та не продовольчої групи отримано у вигляді:



а)

б)

Рис. 1. Оптимальне розміщення складів та розбиття множини споживачів Ω

Розроблена математична модель та алгоритм можуть бути використані для оптимізації логістичних процесів в інтернет-торгівлі, що дозволить знизити витрати та підвищити рівень обслуговування клієнтів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку більш складних моделей, що враховуватимуть додаткові фактори, такі як динаміка попиту, обмеження на пропускну здатність транспортних мереж та інші.

Список використаних джерел

1. Lage M.d.O., Machado C.A.S., Monteiro C.M., Davis C.A. Jr., Yamamura C.L.K., Berssaneti F.T., Quintanilha J.A. Using Hierarchical Facility Location, Single Facility Approach, and GIS in Carsharing Services. Sustainability. 2021. 13(22). P. 240–252.
2. Monteiro C.M., Machado C.A.S., Lage M.O., Berssaneti F.T., Davis C.A., Quintanilha J.A. Optimization of carsharing fleet size to maximize the number of clients served. Comput. Environ. Urban Syst. 2021. Vol. 87.
3. Кісельова О.М., Строева В.О., Притоманова О.М., Строева Г.В. Про програмний продукт розв'язання неперервних задач оптимального розбиття множин. Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем: матеріали XVI міжнар. наук.-практ. конф. м. Дніпро, 21-23 лист., 2018 р. Дніпро: ДНУ, 2018. С. 97-98.

Секція 4

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ

К. техн. н. Дерезь О.Л., магістр. Черненко К.І.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З ДВОМА НАКОПИЧУВАЧАМИ

Математичне моделювання є потужним інструментом вивчення динаміки електроприводів та здобуття досвіду дослідження їх систем керування. Подібність математичного опису електричних кіл та електромеханічних систем дає підстави вважати доцільним первинне ознайомлення фахівців-електромеханіків з принципами та базовими прийомами моделювання на етапі вивчення перехідних процесів у лабораторних роботах з теоретичних основ електротехніки. Відносна простота моделей базових конфігурацій електричних кіл дозволяє, на відміну від традиційних практик, вже на перших роках навчання у вищій школі успішно опанувати цей підхід до вивчення динамічних режимів, використовуючи математичний програмний пакет MatLab Simulink.

Вільні складові перехідних величин перехідних процесів у колах з двома накопичувачами вичерпно характеризують динаміку кіл вищих порядків. Виконаємо побудову математичної моделі RLC кола з джерелом постійної ЕРС. За другим законом Кірхгофа маємо рівняння рівноваги миттєвих значень напруг

$$e = u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + u_C. \quad (1)$$

Розглянемо випадок замикання ключа, що з'єднує джерело ЕРС із навантаженням, при нульових початкових умовах

$$i(0-) = 0, u_C(0-) = 0. \quad (2)$$

Безпосередньо із законів комутації можна визначити основні незалежні початкові умови для напруги ємності u_C та струму i , які найзручніше вважати змінними інтегрування. Розв'яжемо рівняння (1) відносно першої похідної змінної інтегрування, тобто струму:

$$\frac{di}{dt} = \frac{e - u_C - Ri}{L}, \quad (3)$$

та врахуємо диференціальний зв'язок між напругою та струмом ємності

$$i = C \frac{du_C}{dt}, \text{ з якого отримаємо}$$

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{i}{C}. \quad (4)$$

Вирази (2) - (4) описують RLC - коло у формі Коші. Модель на основі інтегруючих ланок, що реалізує ці рівняння для трьох варіантів параметрів, показана на рис. 1. Вона побудована у формі структурної схеми, що є традиційним способом представлення моделей в електромеханіці.

Однією з основних задач, розв'язуваною за допомогою моделювання, є порівняльний аналіз перехідних процесів при різних співвідношеннях параметрів кіл, що зумовлюють різні значення коренів характеристичного рівняння $LCs^2 + RCs + 1 = 0$, де s – комплексна змінна. Це рівняння має корені

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

За умови $\frac{R}{2L} > \frac{1}{\sqrt{LC}}$ корені є дійсними, а вільний процес є аперіодичним.

Якщо $\frac{R}{2L} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, корені є дійсними кратними, вільний процес є критичним. У

випадку, коли $\frac{R}{2L} < \frac{1}{\sqrt{LC}}$, корені є комплексно-сполученими, а вільний процес - коливальним. Цим умовам відповідають комбінації параметрів

$$R=2 \text{ Ом}, L = 0,001 \text{ Гн}, C = 0,002 \text{ Ф}, \quad (5)$$

$$R=2 \text{ Ом}, L = 0,001 \text{ Гн}, C = 0,001 \text{ Ф}, \quad (6)$$

$$R=2 \text{ Ом}, L = 0,001 \text{ Гн}, C = 0,0002 \text{ Ф}. \quad (7)$$

Графіки перехідної напруги конденсатора і перехідного струму для цих трьох варіантів налаштування представлені на рис.2. Вони утворюють сімейства перехідних характеристик, що спрощує візуальне співставлення варіантів протікання процесів з різним характером вільних складових. Якісна оцінка результатів моделювання свідчить про відповідність форми часових діаграм теоретичним уявленням про вигляд аперіодичного (рис.2, криві 1), критичного (рис.2, криві 2) і коливального (рис.2, криві 3) процесів, що підтверджує дієвість застосування математичного моделювання електричних кіл при вивченні електротехнічних дисциплін.

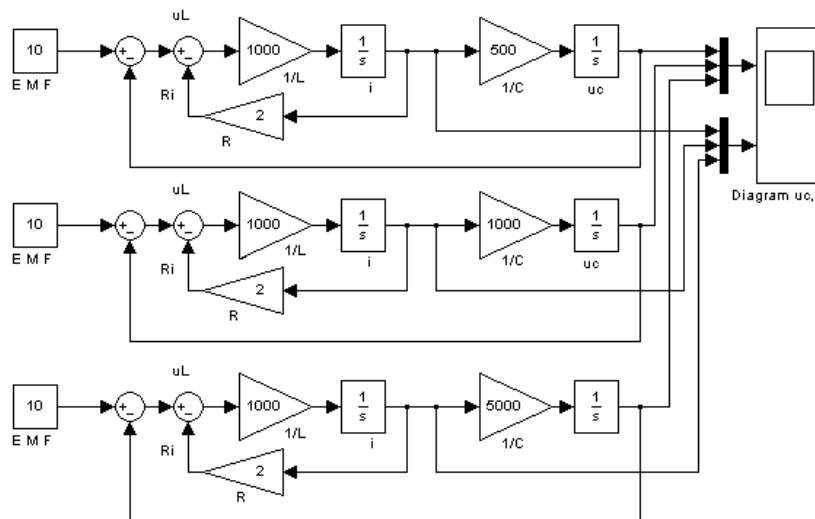
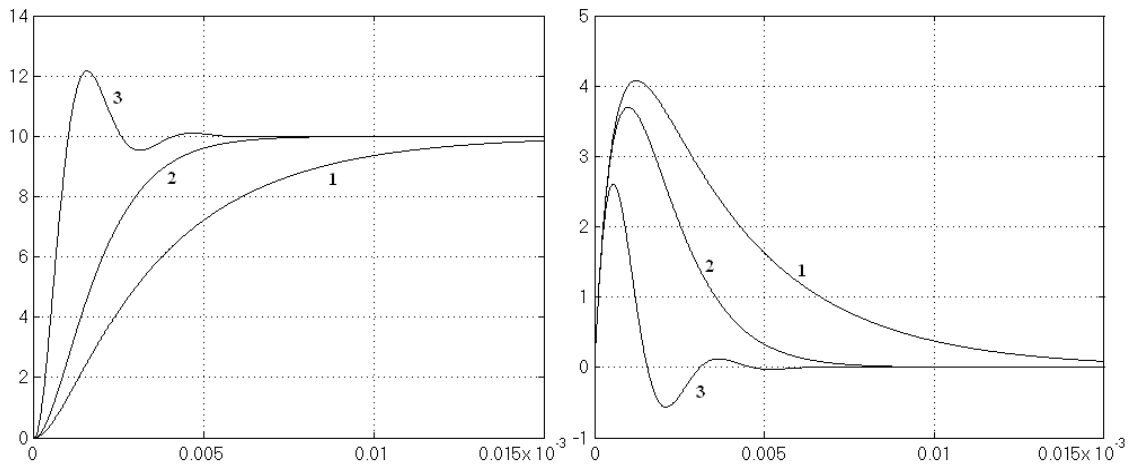


Рис. 1 . Схема моделі RLC кола для варіантів налаштування (5), (6), (7)



а) часові діаграми напруги конденсатора б) часові діаграми струму

Рис. 2. Сімейства перехідних характеристик u_C, i

Список використаних джерел

1. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Кременчук, 2001. 376 с.

Здоб. освіти Жигалева С.П., к. техн. н. Волосова Н.М.

Дніпровський державний технічний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ОСВІТНЬОЇ ТРАЄКТОРІЇ ТА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ЇЇ КОРИГУВАННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПРОМІЖНИХ ТЕСТУВАНЬ

У сучасній освіті дедалі більше уваги приділяється персоналізації навчального процесу. Замість уніфікованих програм, орієнтованих на "середнього учня", на перший план виходить ідея індивідуалізації освітнього маршруту, що враховує унікальні особливості кожного здобувача освіти. У цьому контексті надзвичайно важливо не лише побудувати індивідуальну освітню складову, а також мати дієвий механізм її коригування на основі об'єктивних результатів навчання.

Індивідуальна освітня складова (ІОС) — це частина навчального процесу, що формулюється з урахуванням особистісних освітніх потреб, можливостей, інтересів і темпу навчання конкретного учня чи студента. Вона включає:

- індивідуальні цілі навчання;
- персоналізовані навчальні матеріали;
- адаптивні методи викладання;
- спеціально підібрані форми контролю знань.

У контексті прогнозування успішності здобувачів освіти нечітка логіка дозволяє інтегрувати різні вхідні фактори, такі як результати іспитів, участь у заняттях та інші змінні, для точнішого прогнозування академічної успішності здобувачів. Однак, незважаючи на свій потенціал, розробка систем прийняття рішень на основі нечіткої логіки для прогнозування успішності здобувачів все ще є відносно новою. У виконаному дослідженні застосовуються структуровані та систематичні методологічні етапи. Перший етап включатиме збір даних про успішність здобувачів з конкретного навчального закладу. Ці дані включатимуть різні відповідні вхідні змінні, такі як результати іспитів, участь у заняттях та інші фактори, які можуть впливати на академічну успішність студентів. Наступний етап включатиме моделювання вхідних та вихідних змінних за допомогою нечіткої логіки. Це включатиме визначення функцій належності для вхідних та вихідних змінних, а також формування нечітких множин, що відповідають предметній області. Цей процес дозволяє гнучкіше представляти невизначеність та складність у даних, дозволяючи системі фіксувати більш тонкі нюанси у зв'язках між змінними.

Побудова ІОС здійснюється за алгоритмом:

1. Діагностика початкового рівня знань та потреб. На цьому етапі використовуються тести, опитувальники, бесіди, аналіз портфоліо.
2. Постановка освітніх цілей. Визначаються короткострокові та довгострокові цілі навчання.

3. Формування навчального маршруту. Вибираються теми, ресурси, методи, які найкраще відповідають потребам учня.

4. Реалізація навчального процесу. Навчання відбувається за обраним індивідуальним маршрутом.

5. Проміжне тестування і коригування. Здійснюється моніторинг прогресу з можливістю оперативної адаптації ІОС.

Проміжне тестування — ключовий елемент моніторингу в індивідуалізованому навчанні. Воно дозволяє:

- оцінити рівень засвоєння матеріалу;
- виявити слабкі місця;
- перевірити ефективність застосованих методів навчання;
- визначити необхідність змін у навчальному маршруті.

Важливо, щоб проміжне тестування було не лише інструментом оцінювання, а й засобом формувального оцінювання — джерелом зворотного зв'язку для викладача і здобувача освіти.

Результати проміжного тестування використовуються для прийняття наступних рішень:

- Зміна темпу навчання (прискорення або уповільнення).
- Додаткове опрацювання певних тем.
- Перехід до інших форматів навчання (індивідуальні консультації, мікрокурси, проєктна діяльність).
- Психолого-педагогічна підтримка (у разі емоційного вигорання або втрати мотивації).

При обробці результатів тестів необхідності прийняття рішень, виникає проблема обробки даних нечіткої логіки. Для ефективного прийняття рішень в даних випадках застосовують методи нечітких множин. Теорія нечітких множин створює умови застосування для прийняття рішень неточні та суб'єктивні знання без формалізації їх у вигляді традиційних математичних

моделей. В даному дослідженні були використані нейронні мережі. В якості функції активації була використана сигмоїдна функція:

$$\Psi(s) = \frac{A}{1+e^{-ks}}. \quad (1)$$

У MATLAB існує потужна підтримка для роботи з нечіткою логікою через спеціальні бібліотеки та інструменти, які дозволяють створювати й візуалізувати нечіткі моделі. Для реалізації моделей були використані бібліотеки MATLAB.

Використання нечіткої логіки є доцільним і ефективним підходом до формування індивідуальної освітньої траєкторії здобувача освіти. Такий підхід дозволяє враховувати не лише кількісні показники (оцінки, тести), а й якісні характеристики — мотивацію, самостійність, активність — які важко точно виміряти традиційними методами. Це дозволяє створити систему підтримки прийняття педагогічних рішень, яка є прозорою, адаптивною та ефективною у контексті сучасної цифрової освіти.

Список використаних джерел

1. Гура О. І. Індивідуальна освітня траєкторія учня: сутність, структура та особливості формування // Педагогічні науки. 2019. Вип. 85. С. 45–51.
2. Сухомлинська О. В. Використання методів нечіткої логіки в освітній аналітиці // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Педагогіка. Соціальна робота». 2020. Вип. 48. С. 112–117.
3. Khosravi H., Kitto K., Sarrafzadeh A. Individualized learning pathway through learner knowledge modeling // Educational Technology & Society. 2017. Vol. 20, No. 4. P. 31–43.
4. Zadeh L. A. Fuzzy logic—a personal perspective // Fuzzy Sets and Systems. 2015. Vol. 281. P. 4–20.

К. фіз.-мат. н. Карімов І.К.

Дніпровський державний технічний університет

ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФІЗИЧНОЇ КУЛЬТУРИ І СПОРТУ: ДЕЯКІ МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

Характерною прикметою сьогодення є активне застосування комп'ютерних технологій в усіх сферах суспільного життя, включаючи виробництво, економіку, науку, дозвілля тощо. Не виключенням є і така сфера як фізична культура і спорт.

Використання комп'ютерних технологій суттєво змінило підходи до тренувального процесу. Сучасні комп'ютерні програми дають можливість формувати значні обсяги інформації щодо фізичного та психологічного стану спортсменів, опрацьовувати цю інформацію за допомогою математичних методів і формувати рекомендації щодо тренувань (оптимальна тривалість, частота занять, обсяги навантажень тощо).

Таким чином, комп'ютерні технології знайшли своє місце у фізичному вихованні і спорті, а інформатизація професійної діяльності відповідних фахівців стала складовою інформатизації суспільства в цілому.

Саме тому навчальним планом підготовки здобувачів вищої освіти спеціальності 117 “Фізична культура і спорт” в Дніпровському державному технічному університеті передбачено вивчення вибіркової дисципліни “Інформаційне забезпечення фізичної культури та спорту”. Мета дисципліни - оволодіння здобувачами освіти методами розробки та використання інформаційного забезпечення фізичної культури та спорту. Завдання дисципліни - формування теоретичних знань та практичних навичок у майбутніх фахівців відповідно до поставленої мети.

Реалізація навчання передбачає знайомство з нормативними документами України, які регулюють розвиток фізкультури і спорту в напрямку цифровізації та основними напрямками застосування інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) у сфері фізичної культури і спорту. Одним з

основних напрямків є використання ІКТ для збору, обробки та аналізу фахової інформації; тривалого зберігання в значних обсягах; трансляції та поширення інформації в різних формах, зокрема, за допомогою соціальних мереж.

Прикладом використання комунікаційних можливостей комп'ютерної техніки може бути соціальна мережа ENDOMONDO (www.endomondo.com), яка дає можливість відслідковувати різні види фізичної активності, орієнтовані на певну спортивну дисципліну (біг; ходьба; катання на лижах, байдарках або роликах тощо). На сьогодні таких дисциплін близько 60, причому їх перелік постійно розширюється. Сервіс ENDOMONDO використовує сучасні технології, має додатки для всіх мобільних платформ, що дають можливість записувати дані щодо переміщень. Пройдена відстань, швидкість рухів, рельєф, витрачені калорії відправляються на сайт, де висвітлюється статистика показників. Під час занять можна підтримувати спілкування з друзями і колегами по спорту, чути їх коментарі і поради тощо.

Важлива роль в інформаційному забезпеченні фізкультури і спорту відводиться комп'ютерним програмам для планування та супроводження тренувального процесу, статистичної обробки результатів та прогнозування досягнень, проведення математичного моделювання та педагогічного експерименту.

Прикладом використання комп'ютерного моделювання може бути кількісний аналіз техніки плавання шляхом реалізації гідродинамічної та статистичної моделей, що дає можливість оцінити вплив маси плавця і маси води, сили гребка та його тривалості, темпу, коефіцієнту опору на швидкість і роботу спортсмена [1].

З інших актуальних питань слід відзначити використання віртуальної реальності та комп'ютерних тренажерів в тренувальному процесі, а також кіберспорт.

Список використаних джерел

1. Інформаційні технології у фізичному вихованні: навч. посібник / Н. В. Москаленко, Ю. Ю. Борисова, Т. В. Сидорчук, О. Ю. Лядська. Дніпропетровськ: Інновація, 2014. 127 с.

К. фіз.-мат. н. Карімов І.К., Пододня Г.А., Штим Н.А.

Дніпровський державний технічний університет

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ДІЯЛЬНОСТІ НАВЧАЛЬНОГО ВІДДІЛУ ЗВО

Навчальний відділ є важливим підрозділом будь-якого ЗВО. Він організує управління всією освітньою діяльністю, в т.ч. координує розробку та оновлення навчальних та робочих планів спеціальностей, організує розрахунки навчального навантаження та штатів науково-педагогічних працівників, проводить диспетчеризацію навчального процесу. Різноманіття задач, складність деяких з них і рутинність інших в наш час природно приводить до необхідності їх комп'ютеризації. Комплексний підхід до проблеми характерний для автоматизованих систем управління діяльністю ЗВО, які розробляються спеціалізованими підприємствами (наприклад, [1-3]). Структура таких систем і ступінь проробки окремих питань можуть бути різними. Так, на рис. 1 наведена узагальнена структура АСУ «Вищий навчальний заклад», яка розроблена і підтримується Науково-дослідним інститутом прикладних інформаційних технологій [1].

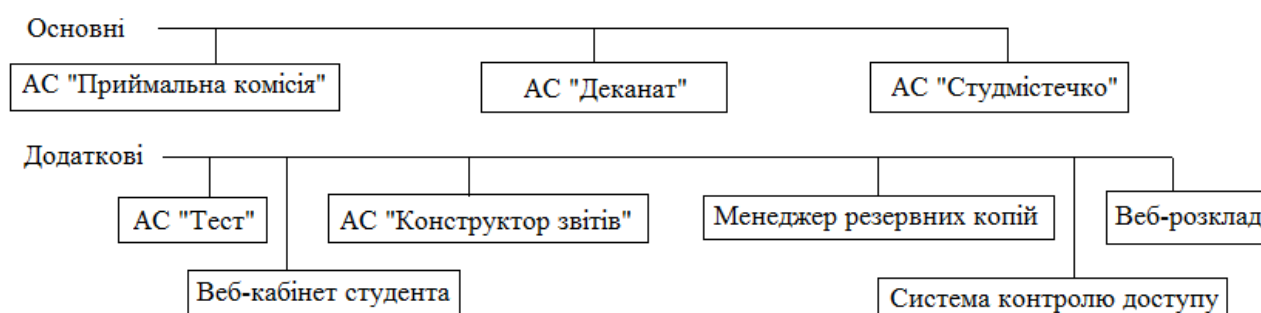


Рис. 1. Компоненти системи АСУ ВНЗ [1]

Структура АСУ «Університет» компанії «UNITEN +» дещо інша [2].

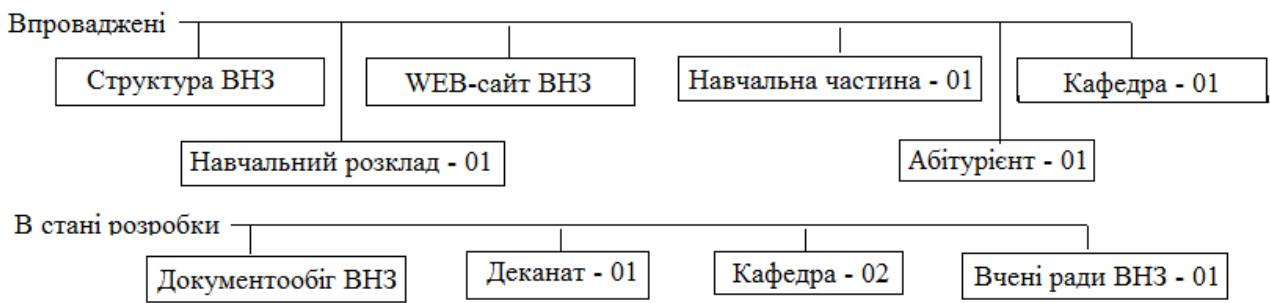


Рис. 2. Модулі АСУ «Університет»

Програмне забезпечення ПП «Політек-Софт» включає в себе кілька пакетів програм: «Деканат», «Колоквіум», «Бібліограф», «ПС-Персонал», «ПС-Абітурієнт» [3]. Зокрема, пакет «Деканат» реалізований в двох варіантах – для ЗВО I-II рівнів акредитації і для ЗВО III-IV рівнів акредитації. Структура останнього показана на рис. 3.

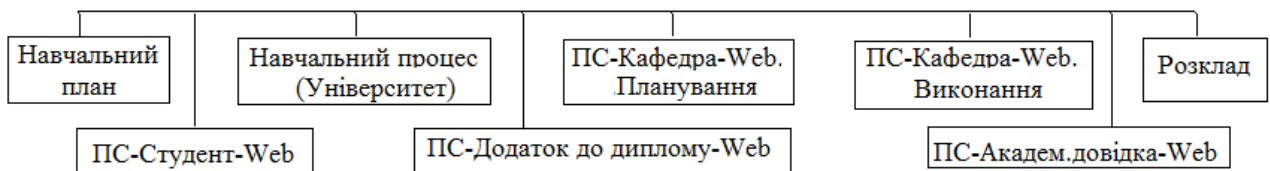


Рис. 3. Програми пакету «Деканат»

Наведені вище автоматизовані системи створювалися як комерційні продукти, тому для них характерне прагнення охопити широке коло питань. Як наслідок, до систем вводилися модулі, які були неактуальними для багатьох ЗВО, але підвищували вартість програмних продуктів, робили їх недоступними для широкого загалу. Більшість закладів вищої освіти намагаються самотужки вирішити це питання шляхом створення власних програмних продуктів для автоматизації окремих задач. Так, наприклад, в Дніпровському державному технічному університеті з 01.01.2024 року впроваджена та функціонує комплексна система автоматизації управління університетом та організації навчального процесу, яка включає наступні модулі: «Бухгалтерія», «Деканат», «Абітурієнт», «Відділ кадрів співробітників», «Відділ кадрів студентів»,

«Навчальні плани та розрахунок навантаження», «Поточний контроль успішності студентів», «Бібліотечна інформаційна система» [4].

Список використаних джерел

1. АСУ ВНЗ. Програмне забезпечення, призначення якого підвищити ефективність управління навчальним закладом та пришвидшити і спростити роботу співробітників ЗВО. [Електронний ресурс]. URL:https://vuz.osvita.net/wp-content/uploads/2021/09/ASU_VNZ.pdf (дата звернення: 22.04.2025).
2. Автоматизована система управління вищим навчальним закладом III-IV рівня акредитації. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.unitex.com.ua/products/commercial-software/automated-system-for-higher-education-institution/> (дата звернення: 22.04.2025).
3. Програмне забезпечення ПП "Політек-СОФТ". [Електронний ресурс]. URL: <http://www.politek-soft.kiev.ua/index.php?do=products> (дата звернення: 22.04.2025).
4. Звіт ректора ДДТУ за 2024 рік. [Електронний ресурс]. URL: https://www.dstu.dp.ua/university/downloads/zvit_2024.pdf (дата звернення: 22.04.2025).

Лимар Н.М.

Дніпровський державний технічний університет

SWEBOOK ЯК ОСНОВА ЯКІСНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ З ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В умовах стрімкого розвитку цифрових технологій і зростаючих вимог до професійних компетентностей розробників програмного забезпечення (ПЗ) перед системою вищої освіти України постає завдання орієнтування фахової підготовки здобувачів на потреби IT-ринку праці, враховуючи міжнародні стандарти програмної інженерії. Одним з ключових інструментів, що дозволяє забезпечити сучасний рівень підготовки здобувачів спеціальності «Інженерія програмного забезпечення (ППЗ)», є міжнародний стандарт Software Engineering Body of Knowledge (SWEBOOK).

Ідея створення стандарту з Інженерії програмного забезпечення (ППЗ) належить Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, IEEE CS), який ініціював створення SWEBOOK у 1999р. У 2004 році була опублікована перша офіційна

версія SWEBOOK 1.0, підтримана IEEE CS та Міжнародною радою з ПЗ. Останній перегляд і актуалізація SWEBOOK були здійснені у 2024 році. SWEBOOK описує систему знань, яка визначає межі, структуру та зміст галузі ПЗ. Він виступає методологічним орієнтиром, який описує ключові галузі знань (Knowledge Areas), пов'язані з усіма етапами життєвого циклу ПЗ, а також основи, методи й практики, що визначають професійну діяльність у цій сфері. На сьогодні SWEBOOK містить опис 15 ключових галузей знань, що представляють узагальнений підхід до розробки ПЗ – починаючи від аналізу вимог до ПЗ і закінчуючи впровадженням обчислювальних, математичних і інженерних рішень для ефективної розробки та підтримки ПЗ. У таблиці 1 наведено опис ключових галузей знань SWEBOOK.

Таблиця 1. Ключові галузі знань SWEBOOK

Назва англійською	Назва українською	Ключові компетентності	Очікувані результати	Основна функціональність
Software Requirements	Вимоги до програмного забезпечення	Збір, аналіз, специфікація, перевірка вимог	Чітко сформульовані, перевірені та відстежувані вимоги	Визначення потреб замовника, підготовка документації вимог
Software Design	Проектування програмного забезпечення	Архітектурне, детальне, інтерфейсне проектування	Створення структурної основи ПЗ	Побудова структури компонентів та взаємозв'язків
Software Construction	Побудова програмного забезпечення	Програмування, кодування, інтеграція	Функціонуючі програмні модулі	Реалізація та об'єднання компонентів
Software Testing	Тестування програмного забезпечення	Тест-дизайн, виконання, валідація, верифікація	Виявлення дефектів, оцінка якості	Забезпечення відповідності ПЗ вимогам
Software Maintenance	Супровід програмного забезпечення	Корекція, адаптація, вдосконалення ПЗ	ПЗ підтримує актуальність та працездатність	Внесення змін після впровадження
Software Configuration Management	Керування конфігурацією ПЗ	Контроль версій, зміни, побудова	Контрольоване середовище розробки	Управління артефактами, версіями та змінами

Метою застосування й впровадження принципів та структури SWEBOOK у навчальний процес підготовки фахівців з ІІЗ є:

1. Системний підхід до навчання. Впровадження запропонованого в SWEBOOK поділу знань ІІЗ дозволяє будувати освітній процес у логічній, зрозумілій послідовності, оскільки кожна ключова галузь знань SWEBOOK описує окрему ланку життєвого циклу ІІЗ. Це забезпечує послідовне формування комплексного представлення про ІІЗ як цілісну дисципліну.

2. Стандартизація знань в галузі ІІЗ. Використання SWEBOOK забезпечує єдине бачення і спільне розуміння термінів і понять серед представників академічної спільноти та галузі ІІЗ.

3. Актуалізація освітніх програм. SWEBOOK відображає сучасний стан галузі ІІЗ, включаючи новітні підходи до проектування, розробки, тестування, управління, забезпечення якості та підтримки програмних систем. Його інтеграція сприяє оновленню змісту дисциплін, гарантуючи відповідність навчання актуальним викликам ІТ-індустрії.

4. Гармонізація з міжнародними стандартами Структура SWEBOOK узгоджується з вимогами міжнародних освітніх та професійних стандартів, зокрема АБЕТ (Accreditation Board for Engineering and Technology). Це забезпечує визнання результатів навчання на глобальному рівні, сприяє академічній мобільності випускників та підвищує їх конкурентоспроможність.

5. Підвищення професійного рівня викладачів. Стандарт слугує також методологічною основою для професійного розвитку викладачів, формування міждисциплінарних курсів та оновлення змісту навчальних дисциплін відповідно до динаміки ІТ-ринку.

Таким чином, стандарт SWEBOOK є не лише систематизованим описом знань в галузі ІІЗ, а й потужним інструментом трансформації професійної освіти. Його впровадження в освітній процес дає змогу визначити очікувані результати навчання, ключові компетентності та професійні функції фахівців, що сприяє формуванню конкурентоспроможних ІТ-фахівців, здатних ефективно діяти в умовах глобальних технологічних змін.

К.е.н. Нужна С. А.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СУЧАСНУ ОСВІТНЮ ПАРАДИГМУ

Сучасна освітня парадигма перебуває на порозі значних трансформацій, зумовлених стрімким розвитком технологій, зокрема штучного інтелекту (ШІ). Якщо раніше комп'ютерні технології виступали переважно як інструменти автоматизації та доступу до інформації, то сьогодні ШІ пропонує якісно нові можливості для індивідуалізації навчання, оптимізації освітніх процесів та формування компетентностей, що відповідають викликам ХХІ століття. Від інтелектуальних систем адаптивного навчання до автоматизованої оцінки знань та створення персоналізованих навчальних траєкторій – потенціал ШІ у сфері освіти є величезним. Проте, інтеграція таких потужних технологій вимагає глибокого осмислення та ретельного планування, враховуючи не лише технічні можливості, але й педагогічні, етичні та соціальні аспекти.

Сьогодні ринок праці вимагає від випускників не лише глибоких знань, а й високого рівня адаптивності, критичного мислення, навичок розв'язання проблем та здатності до безперервного навчання. ШІ може стати потужним інструментом для формування цих компетентностей, готуючи здобувачів до життя та роботи в умовах швидкоплинних технологічних змін. ШІ може автоматизувати рутинні завдання викладачів (наприклад, перевірку робіт, надання зворотного зв'язку, підготовку матеріалів), дозволяючи їм зосередитися на більш креативних та взаємодійних аспектах навчання. Це сприяє підвищенню якості освіти та оптимізації використання ресурсів. Успішна інтеграція ШІ в освіту є ключовим фактором для підготовки висококваліфікованих кадрів, які зможуть ефективно використовувати ці технології для подальшого інноваційного розвитку економіки та суспільства в цілому.

Отже, розглянемо основні напрямки інтеграції технологій штучного інтелекту в сучасну освітню парадигму, висвітлюючи як їхні функції та сценарії використання в освітній діяльності (табл. 1).

Таблиця 1. Поширені інструменти ШІ та їх використання в освітній діяльності

Інструмент	Основні функції	Використання здобувачами освіти
ChatGPT, Claude, Google Gemini	Генерація тексту, пошук, пояснення	Написання чернеток есе, пошук інформації, пояснення складних тем, узагальнення текстів, перефразування текстів, отримання покрокових рішень, генерація навчальних тестів
Grammarly	Написання текстів	Перевірка граматики та орфографії, покращення стилю тексту
Quillbot	Перефразування, Написання текстів	Перефразування тексту для уникнення плагіату, генерація цитат
Otter.ai	Транскрипція, Нотатки	Запис та транскриптування лекцій у реальному часі, автоматичне узагальнення записів, організація нотаток
Quizlet, Studygenie.io, Academia.com	Навчальні інструменти	Створення карток, текстів, навчальних посібників на основі нотаток або відео
Canva, Midjourney, DALL-E2	Генерація зображень, Дизайн	Створення зображень, дизайнів, графічних елементів для дизайну
NotebookLM	Структура текстів	Дозволяє швидко та ефективно структурувати інформацію з джерел та створити логічну послідовність теми
Canvas в Gemini	Представлення інформації	Інструмент підійде для генерації практичного заняття з можливістю редагувати окремі елементи та перетворювати матеріал у різні формати
Gemini Deep Research	Аналіз інформації	Інструмент найбільш ефективно допоможе в аналізі та синтезі інформації з різних наукових джерел
Google AI Studio	Безкоштовний вебінструмент від Google	Тестування запитів та відповідей, налаштування параметрів моделі, створення структурованіх промптів, взаємодія з відео та зображеннями, генерація мультимедійного контенту
GPTZero	Інструмент для виявлення тексту, згенерованого ШІ	Розрізняє текст, створені великими мовними моделями (LLM), такими як ChatGPT, Gemini, Copilot, Meta AI, від тексту, написаного людиною
Turnitin	Виявлення плагіату ШІ	Перевірка текстів на оригінальність (використовується переважно викладачами)

Як видно з Таблиці 1, сучасні інструменти ШІ пропонують здобувачам освіти різноманітні функціональні можливості – від генерації тексту та зображень до аналізу інформації та структуризації матеріалу. Проте, поряд з безперечними перевагами, пов'язаними з підвищенням ефективності навчання

та доступом до знань, їхнє використання вимагає свідомого підходу. Інструменти GPTZero та Turnitin, що призначені для виявлення ШІ-генерованого контенту та плагіату, підкреслюють важливість формування академічної доброчесності та розвитку навичок критичної оцінки інформації у цифрову епоху.

Інтеграція технологій штучного інтелекту в сучасну освітню парадигму є не просто черговим етапом технологічного розвитку, а фундаментальною трансформацією, що переосмислює підходи до навчання, викладання та управління освітою. ШІ відкриває безпрецедентні можливості для персоналізації навчального процесу, дозволяючи адаптувати контент, темп і методику викладання до індивідуальних потреб кожного здобувача освіти. Більше того, ШІ виступає як потужний каталізатор для оптимізації рутинних освітніх завдань. Автоматизація оцінювання, генерування навчальних матеріалів, надання миттєвого зворотного зв'язку та допомога у структуруванні інформації звільняють час викладачів, дозволяючи їм зосередитися на більш креативних аспектах педагогічної діяльності та індивідуальній роботі зі здобувачами. студентами. Це сприяє підвищенню якості викладання та ефективнішому використанню людських ресурсів в освітній системі.

Таким чином, повна реалізація потенціалу штучного інтелекту в освіті вимагає не лише впровадження новітніх технологій, але й глибинних змін у методології навчання, навчальних програмах та системі підготовки фахівців. Лише за умови збалансованого підходу, що враховує як технологічні можливості, так і етичні та соціальні аспекти, можна побудувати інноваційну, адаптивну та інклюзивну освітню систему, що готуватиме майбутні покоління до успішного життя та діяльності у світі, який стрімко змінюється під впливом штучного інтелекту. Це дозволить Україні зайняти гідне місце серед лідерів світової освіти, виховуючи кваліфікованих фахівців, здатних ефективно використовувати передові технології на благо суспільства.

D. P. M. S. Pasichnyk* A.N., C. P. M. S. Pasichnyk V.A.**

** Dniprovsky State Technical University*

*** Software Engineering and Digital Transformation Company Luxoft*

DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELING AND CREATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

The rather intensive development of mathematical theories and the development of new mathematical methods over the last century has significantly increased the effectiveness of their application in various branches of science and technology, providing solutions to various scientific and applied problems. A defining feature of the mathematization of modern science is the transition of many of its branches to the theoretical level of research, the study of deeper internal mechanisms and processes occurring in nature and society.

The results of the mathematization of modern science have created new opportunities for the development of information and communication technologies and automation systems for several aspects of intellectual activity. The main purpose of the functioning of such technologies is the integration of methods, production processes, software and hardware tools for collecting, processing and transmitting data to obtain information of new quality and its use to meet the diverse needs of users. Information and communication technology (ICT) is one of the main components of the scientific, methodological and technological base of the information industry, which combines mathematical methods, information resources and software and hardware tools for the production, transmission, processing and use of information. It should also be noted that the development of ICT has become a powerful catalyst for the further development of mathematical methods and algorithms.

The intensive process of development of information technologies began in the late 1960s and the following main stages of their practical application on the path of informatization of society can be conditionally distinguished:

Stage 1 (1970-80). A characteristic feature of this period is the limited capacity of computing technology, insufficient for processing significant amounts of data.

Stage 2 (1980-90). It is characterized by the emergence of large electronic computers (ECMs) of the IBM 360 / 370 type and the widespread introduction of complex information systems for managing various sectors of economic activity. A feature of this stage is a certain discrepancy between the capabilities of computer hardware and software development.

Stage 3 (1990-2000) - computer technology becomes more accessible to non-professional users, and information systems - a means of supporting and making management decisions. The main problematic issues of application efficiency are associated with the insufficient level of optimization of the obtained solutions, and the imperfection of the user interface with the computer environment.

Stage 4 (2000-2010) - introduction of modern information and communication technologies and distributed data processing systems. The primary issues involve developing standards and protocols for computer communication, as well as ensuring authorized access and information security.

Stage 5 (2010-2020) saw the widespread use of algorithms for processing speech and images, the rise of machine learning and robotic systems, and the introduction of intelligent systems with effective solution optimization.

The 6th modern stage from 2020 is characterized by the intensification of the development and practical use of advanced optimization algorithms and corresponding software for intelligent software and hardware systems.

Currently, such systems provide tasks for several activities at a highly professional level and are classified as artificial intelligence (AI) systems. The sufficiently effective results of the application of ICT achievements have created an illusion among a few experts about the onset of the "technological singularity" as early as 2025-29, when the level of AI can reach human intelligence. This does not take into account the fact that currently there is no mathematical model of human intelligence or an algorithm for its functioning.

Thus, in modern conditions, artificial intelligence systems provide incredible speed of information processing according to a given optimization algorithm and will remain an effective tool for researchers in conducting creative searches and solving both scientific and applied problems for a long time.

Асп. Теплий Я.Б., д. техн. н. Досин Д.Г.

Національний університет «Львівська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ LLM-АГЕНТА ДЛЯ ОНТОЛОГІЧНОГО НАВЧАННЯ

У тезах розглянуто методологію використання агента на основі великої мовної моделі (Large Language Model, LLM) для автоматизованого вивчення елементів онтології з неструктурованого тексту. Онтологія у цьому контексті – це формалізоване подання знань у вигляді **класів** (категорій понять), **властивостей** (атрибутів та відношень) та **екземплярів** (конкретних об'єктів або прикладів). Актуальність підходу обумовлена зростанням обсягів неструктурованої інформації та потребою в її структуризації: побудова онтологій вручну є трудомістким процесом, тоді як сучасні LLM здатні розуміти контекст тексту і можуть автоматизувати виявлення ключових концепцій та взаємозв'язків. Запропонований підхід орієнтований на застосування в освітніх та дослідницьких цілях, де швидке формування онтологій сприятиме ефективній організації знань і підтримці семантичних пошукових та навчальних систем.

Методологія. У роботі запропоновано LLM-агент, який виконує послідовний аналіз тексту для побудови онтології. Методологія включає декілька етапів:

1. **Попередня обробка даних:** неструктурований текст очищується від зайвих символів і за необхідності сегментується на логічні фрагменти (абзаци або речення) для поетапного аналізу.

2. **Виділення кандидатів на класи:** LLM-агент отримує фрагмент тексту і генерує перелік ключових термінів та понять, які, ймовірно, відповідають **класам** доменної області. Наприклад, аналізуючи текст про Сонячну систему, агент виділяє поняття як-от *планета*, *зоря*, *супутник* тощо – вони становлять потенційні класи.
3. **Визначення властивостей і відношень:** далі агент LLM ідентифікує зв'язки між виділеними класами та їх атрибути. На цьому етапі формуються **властивості** онтології. Так, з того ж тексту про космос модель може встановити, що *планета* має властивість *орбіта* (обертається навколо зорі) або атрибут *період обертання*, а *супутник* пов'язаний з класом *планета* відношенням “обертається навколо”.
4. **Вивчення екземплярів:** агент шукає конкретні приклади об'єктів, згадані у тексті, які належать до визначених класів. Такими **екземплярами** можуть бути власні назви чи конкретні назви об'єктів. У прикладі про Сонячну систему до класу *планета* буде віднесено екземпляри *Земля*, *Марс*, *Юпітер* тощо, до класу *зоря* – екземпляр *Сонце*, а до класу *супутник* – *Місяць*, *Європа* і т. д.
5. **Формування структури онтології:** на основі отриманих класів, їхніх властивостей та екземплярів будується цілісна онтологічна модель. LLM-агент формує структуру, в якій класи можуть організовуватися ієрархічно (встановлюються відносини підпорядкування «*клас–підклас*» при виявленні узагальнень), властивості прив'язуються до відповідних класів, а екземпляри привласнюються своїм класам. Для формального подання результатів можуть використовуватися стандартизовані формати, наприклад, RDF/OWL, або ж проста таблична форма (списки класів з їхніми атрибутами та прикладами).

Зазначена методологія може реалізовуватися як єдиним запитом до LLM, так і через послідовність запитів (кроків 2–4). **Сценарій прямого вивчення**

передбачає, що модель отримує весь текст і одразу генерує повну онтологію за змістом документа. В альтернативному **поетапному сценарії** LLM-агент діє ітеративно: спочатку визначає класи, потім для кожного класу уточнює його властивості та екземпляри. Поетапний підхід дозволяє контролювати кожен вид онтологічних елементів окремо, підвищуючи точність (LLM концентрується на конкретному завданні на кожному кроці) та надаючи можливість проміжної перевірки результатів експертом. У розробленому агенті було реалізовано саме багатоетапний алгоритм із ручним коригуванням проміжних списків понять за потреби. Це допомогло зменшити кількість помилкових або несуттєвих елементів, які іноді генерує LLM через так звані «галюцинації» моделі.

Інтеграція результатів у навчальний та дослідницький процес.

Автоматизоване вивчення онтологій має значний потенціал практичного застосування. У **навчальному процесі** результати роботи LLM-агента можна використовувати для створення семантично насичених навчальних матеріалів. Зокрема, на основі автоматично згенерованої онтології предметної області можливо будувати **концептуальні карти** та діаграми знань, що допомагають студентам краще зрозуміти структуру навчального матеріалу і взаємозв'язки між поняттями. Крім того, такі онтології можуть лягти в основу інтелектуальних навчальних систем: адаптивних підручників, систем тестування знань або чат-ботів-консультантів, які орієнтуються в онтології предмета і надають контекстні пояснення або підказки. У **науково-дослідницькій діяльності** можливість швидко отримувати онтологію з текстового масиву (наукових статей, звітів, веб-джерел) сприяє формуванню оновлених **баз знань** у певній галузі. Це полегшує інформаційний пошук для дослідників, адже вивчені LLM-агентом факти та зв'язки можна інтегрувати у сховища знань або системи підтримки рішень. Таким чином, пропонуваній підхід може прискорити підготовку оглядів літератури, виявлення нових

тенденцій у даній сфері, а також забезпечити кращу сумісність даних через уніфікацію термінології (стандартизацію понять).

Висновки. Запропоновано методологію використання LLM-агента для онтологічного навчання – автоматичного вилучення структурованих знань (класів, властивостей, екземплярів) із неструктурованого тексту. Застосування великої мовної моделі дозволило суттєво автоматизувати процес побудови онтології, зменшивши обсяг ручної роботи експертів. LLM-агент здатний виявляти основні поняття та відношення, завдяки глибокому розумінню контексту. Надалі планується вдосконалювати агента шляхом інтеграції механізмів валідації (наприклад, перевірки узгодженості онтології логічними правилами) та розширення його мовних можливостей для роботи з різними мовами і доменами. Методологія, представлена в тезах, є кроком до спрощення створення онтологічних моделей і може стати основою для розвитку інструментів підтримки освітніх та наукових проектів.

Doctoral student Tolstoi V.V., Doctor of Technical Sciences Sadovoi O.V.

Dniprovsky State Technical University

OVERRELIANCE ON COMPUTER TECHNOLOGIES IN THE STUDYING PROCESS

Problem Statement. In today's world, computer technologies are deeply woven into the education process. Tools like learning management systems, video calls, and messaging apps have made it easier than ever for students and teachers to stay connected, collaborate, and access important materials anytime, anywhere. These communication technologies have become essential, especially in hybrid and online learning environments. However, as schools and universities continue to rely more on digital solutions, there's a growing concern that we may be depending too much on technology, especially on things like AI tools and content-heavy multimedia. This

shift brings up important questions about how such tools affect students' ability to think critically, maintain academic honesty, and truly understand what they're learning.

Problem analysis. Communication technologies: a necessary foundation.

As more classes move online or adopt hybrid formats, it's become clear just how important good communication tools are. Whether it's a live video chat or a message sent hours later, both real-time and delayed forms of communication help students stay engaged and motivated — especially when they're not in the same room. Research of Hrastinski [2] shows that these tools are key to helping learners feel connected. When teachers and students can easily exchange feedback, work together, and access materials, the whole learning experience becomes more supportive and inclusive. That's why strong communication technology isn't just helpful — it's essential to education today.

The Risks of overrelying on automation. While communication tools can greatly enhance how we learn, not all technologies bring the same benefits. Tools like automatic translators or AI writing assistants may seem convenient, but they can also take over parts of the learning process that students should be doing themselves. As Floridi and Chiriatti [1] point out, relying too heavily on AI can reduce students' sense of responsibility and engagement — in other words, the technology starts doing the thinking for them.

Losing touch with deep learning. Building real understanding takes mental effort. Mayer's [3] theory of multimedia learning emphasizes that students need to actively engage with content — picking out what matters, organizing ideas, and connecting them in meaningful ways. But when lessons are packed with videos, animations, and images, students can become passive viewers instead of active learners. Faced with too much information or tempted by shortcuts, they may end up skimming rather than thinking deeply.

Too much screen time, too little balance. Spending more time learning online also means more time staring at screens — and that comes with a cost. Research by Twenge and Campbell [4] shows a clear link between high screen time and mental health struggles like anxiety and poor sleep. This was especially true during the COVID-19 lockdowns, when many students were online all day for school. While technology makes learning more accessible, it's important to stay mindful of its effects on well-being.

Consequences. Convenient communication tools have become a cornerstone of modern education, making it easier than ever for students and teachers to connect, share ideas, and access resources. These technologies have opened up possibilities that would've seemed impossible just a few decades ago. But as we continue to integrate more computer-based tools into learning — especially those that automate thinking or decision-making — it's important to pause and reflect. True learning thrives when technology supports students' minds, not when it replaces them. To build a healthy, sustainable approach to education, we need to make sure tech use stays balanced, ethical, and focused on helping learners grow.

Here are some key concerns to keep in mind:

Reduced Critical Thinking: When students rely too much on quick digital fixes, they may miss out on the value of struggling through problems and thinking things through on their own.

Academic Integrity Risks: Generative AI tools are making it harder to detect plagiarism and ensure fairness, challenging how we assess learning.

Weakened Social Skills: Too much time behind screens can mean less face-to-face interaction — and that can affect important skills like empathy, communication, and collaboration.

Strain on Body and Mind: Long hours spent using tech without proper breaks or attention to posture and well-being can lead to burnout, fatigue, and physical discomfort.

Recognizing these challenges doesn't mean abandoning technology — it means using it more intentionally. Below are some ways educators and institutions can create a more thoughtful, effective approach to digital learning.

Propositions.

To make the most of technology in education, without losing what matters most, we need to be thoughtful about how it's used. Here are a few ways we can do that:

1. **Support Strong Communication Tools:** Schools and universities should continue investing in dependable, easy-to-use platforms that help students stay connected and supported. Every learner should have a chance to ask questions, collaborate with peers, and get timely feedback, no matter where they are.

2. **Teach Smart Use of Technology:** It's not enough to give students access to digital tools — they also need to learn how to use them wisely. Building digital and AI literacy into the curriculum helps students think critically, stay original, and avoid becoming overly dependent on technology.

3. **Keep Learning Hands-On and Varied:** The best learning happens when there's a mix. Offline activities like group discussions, handwritten notes, or even quiet reading should go hand-in-hand with digital tasks. This balance keeps students engaged and strengthens different types of thinking.

4. **Set Clear Guidelines on Tech Use:** As AI tools become more common, education institutions need clear, fair rules about how they should (and shouldn't) be used. Clear policies help protect academic integrity and make sure everyone knows what's expected.

References

1. **Floridi, L., & Chiriatti, M.** (2020). *GPT-3: Its nature, scope, limits, and consequences*. *Minds and Machines*, 30(4), 681–694. <https://doi.org/10.1007/s11023-020-09548-1>
2. **Hrastinski, S.** (2008). *Asynchronous and synchronous e-learning*. *EDUCAUSE Quarterly*, 31(4), 51–55.
3. **Mayer, R. E.** (2001). *Multimedia Learning*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139164603>

4. **Twenge, J. M., & Campbell, W. K.** (2018). *Associations between screen time and lower psychological well-being among children and adolescents: Evidence from a population-based study*. *Preventive Medicine Reports*, 12, 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2018.10.003>

Асп. Торшин В.В., к. техн. н. Рибчак З.Л.

Національний університет «Львівська політехніка»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ПЗ: ШЛЯХ ДО ЕКОНОМІЇ РЕСУРСІВ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ

У тезах розглянуто проблему енергоспоживання програмного забезпечення, яке функціонує на сучасних обчислювальних системах, зокрема в умовах поширення мобільних і вбудованих платформ, а також зростаючих вимог до енергозбереження в дата-центрах. Водночас, питання енергоефективності програм залишається другорядним у процесі підготовки майбутніх фахівців ІТ-сфери. Запропоновані практичні рекомендації для університетських навчальних програм.

Актуальність. Зростаюче енергоспоживання комп'ютерних систем, особливо у сфері хмарних обчислень, мобільних пристроїв і розподілених сервісів, актуалізує питання оптимального використання енергетичних ресурсів. У той час як апаратні рішення (процесори з Е/Р-ядрами, енергоефективна пам'ять, спеціалізовані прискорювачі) вже активно впроваджуються, питання енергоефективності на рівні програмного забезпечення досі залишаються поза фокусом як в індустрії, так і в академічній освіті.

Проблематика. До найпоширеніших проблем програмного забезпечення належать:

1. Ігнорування профайлерів: розробники рідко використовують інструменти, котрі дозволяють визначити “вузькі місця” у кодї, що спричиняють надмірне навантаження на CPU чи пам’ять;

2. Використання загального коду для спеціалізованих задач: відсутність використання SIMD-інструкцій (наприклад, AVX/AVX2/AVX-512/FMA) у критичних обчисленнях; використання застарілих бібліотек;

3. Недостатня адаптація під архітектуру системи: нехтування політиками CPU-affinity та енергоефективними планувальниками ОС;

4. Використання неефективних алгоритмів: зокрема, при обробці великих масивів даних без урахування витрат на кеш-промахів, передавання через шини пам’яті тощо;

5. Неоптимальна конфігурація компілятора: наприклад, відсутність оптимізуючих прапорців (-mavx, -msse) або відмова від векторизації через застарілий код.

У підсумку, програмне забезпечення, створене без врахування енергетичних характеристик, споживає більше електроенергії, швидше виснажує батареї мобільних пристроїв, а в масштабі дата-центрів — спричиняє додаткові витрати на охолодження та обслуговування.

Методологія. Пропонується наступний підхід до формування навчального модуля з енергоефективного програмування:

1. Теоретична база: Основи енергоспоживання цифрових систем; поняття TDP, динамічного споживання енергії, та їхній вплив на терміни служби пристроїв; архітектурні особливості енергоефективних процесорів (E-cores, big.LITTLE, ARM).

2. Інструменти моніторингу та профілювання: знайомство з Intel RAPL, perf, powertop, gprof; Вимірювання та порівняння енергоспоживання програм з різною структурою.

3. **Парадигми енергоефективного написання коду:** написання коду, адаптованого до апаратної архітектури; опції оптимізації компілятором, SIMD-векторизація, cache-aware алгоритми; розділення задач між ядрами залежно від навантаження (наприклад, у Linux через `sched_setaffinity()`).

4. **Проектна робота:** створення невеликого застосунку (наприклад, кодера (encoder) або сортувальника), у якому студент самостійно впроваджує енергооптимізаційні рішення та порівнює результати.

Інтеграція в навчальний процес

1. Включення енергоспоживання як одного з обов'язкових параметрів при оцінюванні лабораторних і курсових проєктів;

2. Запровадження міждисциплінарних курсів, які поєднують ІТ, енергетику й екологію;

3. Створення open-source навчальних проєктів з енергоефективного ПЗ як частини бакалаврських та магістерських програм;

4. Використання існуючих портативних пристроїв (ноутбуків) університетів як тестових платформ для аналізу споживання в реальних умовах;

5. Запрошення фахівців з індустрії (Intel, ARM, AMD, Google) до участі у семінарах і конференціях.

Висновки. Енергоефективне програмування — це не тренд, а стратегічна необхідність. Зміни клімату, обмежені ресурси та зростаючий попит на мобільні та хмарні сервіси вимагають нових стандартів у підготовці фахівців. Впровадження курсів з енергоефективного ПЗ у вищих навчальних закладах дозволить не лише зменшити витрати на експлуатацію ІТ-інфраструктури, а й сприятиме формуванню екологічної свідомості майбутніх інженерів.

К. ф.-м.н., доцент Худа Ж. В., здобувач Нечипоренко А.Л.

Дніпровський державний технічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІЙ КОМПЛЕКСНОЇ ЗМІННОЇ ДО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

У теорії електричних кіл, особливо при аналізі коливальних процесів у колах змінного струму, використання функцій комплексної змінної дозволяє значно спростити як теоретичні викладки, так і практичні розрахунки. Комплексна форма подання напруги та струму забезпечує зручний математичний апарат для моделювання гармонічних процесів. В роботі розглянуто ключові аспекти застосування комплексного аналізу для дослідження електричних кіл. Особливу увагу приділено поняттям комплексного опору, використанню операцій над комплексними числами та застосуванню функції комплексної змінної для аналізу частотних характеристик. Показано, як аналітичні властивості функцій комплексної змінної дозволяють спростити розв'язання задач у теорії електричних кіл.

При вивченні кіл змінного струму з частотою ω , струм та напруга можуть бути представлені як гармонічні функції:

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi), \quad i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta).$$

Ці вирази зручно подати у вигляді комплексних амплітуд:

$$\tilde{U} = U_m e^{j\varphi}, \quad \tilde{I} = I_m e^{j\theta}.$$

Тоді закон Ома для кола набуває вигляду:

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{U}}{Z}, \quad \text{де } Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}.$$

Тут Z — комплексний опір (імпеданс), який залежить від частоти. Імпеданс використовується в електротехніці для опису опору, з яким стикається електричний струм, коли він тече в колах змінного струму. Імпеданс враховує не тільки опір, але і реактивні елементи - ємність і індуктивність. На відміну від

опору, що відноситься тільки до постійного струму. Це забезпечує більш повний опис поведінки струму в ланцюгах змінного струму, де відбуваються такі важливі явища, як зміни фази між напругою та струмом. Імпеданс - це комплексне число, що складається з дійсної частини - опору, а також уявної частини - реактивного опору, яка є результатом наявності конденсаторів і котушок.

Функції комплексної змінної також застосовуються для:

- Аналізу гармонічних процесів у RLC-колах;
- Розрахунку резонансних частот, де реактивні опори компенсуються;
- Обчислення реакцій кіл на сигнали за допомогою перетворення Лапласа (яке ґрунтується на властивостях аналітичних функцій);
- Частотного аналізу фільтрів.

Функції комплексної змінної можна використовувати при розрахунку амплітуди струму. Наприклад, потрібно знайти амплітуду струму у серійному RLC-колі при частоті 1 кГц, якщо $R = 100 \text{ Ом}$, $L = 0.1 \text{ Гн}$, $C = 1 \text{ мкФ}$, а амплітуда напруги складає 10 В.

Розв'язок:

Спочатку обчислюємо кругову частоту: $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 1000 = 6283 \text{ (рад/с)}$.

Тоді комплексний імпеданс розраховуємо за формулою: $Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$,

$$Z = 100 + j \times 628.3 - j \times 159.15 \approx 100 + j 469,15 \text{ (Ом)}.$$

Обчислюємо модуль імпедансу: $|Z| = \sqrt{100^2 + (569,15)^2} \approx 479,8 \text{ (Ом)}$. Тоді

амплітуду струму розраховуємо за формулою: $I = \frac{U}{|Z|}$, звідки маємо

$$I = \frac{10}{479,8} \approx 0,02085 \text{ (А)} \approx 20,85 \text{ (мА)}$$

Відповідь: амплітуда струму становить 20,85 мА.

Комплексні функції є ефективним інструментом для математичного опису електричних кіл. Їх застосування дозволяє скоротити обчислення, забезпечити більш точне моделювання та глибше розуміння фізичних процесів. Функції комплексної змінної — це ключ до ефективного аналізу динамічних процесів у колах змінного струму.

Здоб. освіти Шевченко В. І.

Кам'янський енергетичний фаховий коледж

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ПЛАТФОРМ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ПІДВИЩЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ

У ХХІ столітті цифровізація охоплює всі сфери життя, зокрема й освіту. Інтеграція цифрових платформ та інструментів штучного інтелекту (ШІ) у навчальний процес є не лише трендом, а й необхідною умовою підвищення якості освіти. Метою цієї роботи є аналіз можливостей використання сучасних цифрових технологій для персоналізації навчання, підвищення мотивації студентів та ефективності освітньої діяльності.

Одним із ключових напрямів сучасної цифрової освіти є математичне моделювання навчальних процесів. Це означає створення формалізованих моделей, які дозволяють прогнозувати успішність студента, адаптувати навчальні матеріали до його потреб, оцінювати динаміку прогресу та виявляти індивідуальні особливості засвоєння знань. Таке моделювання стало основою для розробки багатьох освітніх платформ, що працюють за принципами адаптивного навчання. Це особливо важливо в умовах дистанційного або змішаного навчання, коли відсутній безпосередній контакт із викладачем.

Адаптивне навчання – це будь-яка навчальна технологія або віртуальна освітня система, призначена для задоволення потреб студента. Це поєднання

навчального обладнання та програмного забезпечення для освіти у єдине рішення для навчання кожного конкретного учня. Програмне забезпечення для адаптивного навчання, яке найчастіше зустрічається на вебплатформах в інтернеті, може допомогти учню отримувати необхідні знання в персональному форматі, а вчителю допомогти з оцінкою процесу засвоєння знань.

Системи на основі штучного інтелекту аналізують успішність учнів у реальному часі, використовуючи дані для зміни методів навчання. Результатом є індивідуальний, персоналізований досвід навчання, який максимізує потенціал студента для досягнення успіху та підвищує ефективність навчання [1].

Платформи Coursera, Khan Academy, Duolingo мають вбудовані моделі, що прогнозують, коли студент готовий до наступного рівня матеріалу або в якій темі він має труднощі. Наприклад, Duolingo використовує так звану «модель забування», яка обчислює, коли саме користувач почне забувати вивчений матеріал, і пропонує повторення.

Окрему роль у сучасному навчанні відіграють інструменти штучного інтелекту. ChatGPT, розроблений компанією OpenAI, здатен не лише відповідати на запитання, але й аналізувати помилки, формувати приклади, допомагати з логікою розв'язку задач. Це дозволяє моделювати процес навчання з урахуванням моїх індивідуальних потреб, що є ознакою сучасного, гнучкого підходу до освіти.

Платформи типу Quizizz і Kahoot! реалізують концепцію гейміфікації — застосування ігрових механік для підвищення зацікавленості у навчанні. При цьому також використовуються математичні моделі: наприклад, алгоритми підбору питань за рівнем складності, розрахунок балів, динамічне формування рейтингу учасників. На основі власних спостережень за участю студентів у таких гейміфікованих тестах я помітила, що вони стимулюють змагальний підхід до засвоєння знань, мотивують краще готуватись до занять і знижують стрес у порівнянні з класичним опитуванням.

Сервіс Quizizz заслуговує на увагу завдяки своїй доступності та функціональності. Це цікавий сервіс для створення вікторин та флеш-карток. Особливою перевагою для педагогів є наявність мультимовного інтерфейсу. Він відзначається високим рівнем зручності для користувачів, безкоштовний,

учні можуть користуватись сервісом як в класі, так і вдома, не обов'язково заводити акаунт та реєструватися для того, щоб пройти вікторину [2].

У найпростішому випадку Kahoot! пропонує запитання, а потім необов'язкові відповіді з декількома варіантами. Для більшої інтерактивності можна додати мультимедійні матеріали, такі як зображення та відео. Хоча Kahoot! можна використовувати в класі, він ідеально підходить для дистанційного навчання. Вчителі можуть створити вікторину і чекати на результати, щоб побачити, як учні її виконають. Або ж можна провести вікторину в прямому ефірі, використовуючи відео – за допомогою сторонніх додатків, таких як Zoom або Meet, – щоб викладачі могли бути присутніми під час виконання завдань учнями [3].

Таким чином, цифрові платформи і штучний інтелект виступають не просто додатковими засобами навчання, а важливими елементами освітньої екосистеми, що базується на математичних принципах. Завдяки моделюванню процесів засвоєння знань, аналізу даних і персоналізації навчального середовища ці технології сприяють більш ефективному, гнучкому та доступному навчанню для студентів різного рівня підготовки. Подальше дослідження таких моделей є перспективним напрямом розвитку сучасної освіти.

Список використаних джерел

1. Найкращі предмети для адаптивного навчання. Інструменти та поради. *Promethean*. URL: <https://prometheanworld.com.ua/najkrashhi-predmety-dlya-adaptyvnogo-navchannya-instrumenty-ta-porady/> (дата звернення: 22.05.2025).
2. Сервіс Quizizz для створення вікторин та флеш-карток. *Блог учителя*. URL: <https://viakiev.blogspot.com/2017/11/quizizz.html> (дата звернення: 22.05.2025).
3. Що таке Kahoot! як цифрова навчальна платформа? – FutureNow. *FutureNow – Technologies & Science Blog*. URL: <https://futurenow.com.ua/shho-take-kahoot-yak-tsyfrova-navchalna-platforma/> (дата звернення: 22.05.2025).

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ І МОДЕЛІ

<i>1.Божко В.О., Мацуга О.М.</i> Порівняльний аналіз індексів якості кластеризації для визначення оптимальної кількості кластерів.....	3
<i>2.Гавриленко М.О., Мацуга О.М.</i> Порівняльний аналіз методів-обгортки для відбору ознак у задачі прогнозування офтальмологічних показників.....	6
<i>3. Гнатів Л.Б., Гнатів Б.В.</i> Побудова L-стійких методів типу Розенброка...	9
<i>4. Давидчик О.М.</i> Деякі співвідношення для додатних операторів.....	12
<i>5. Дерезь О.Л., Садовой О.В., Коваль Ю.Р.</i> Математична модель асинхронного електропривода для синтезу релейних систем векторного керування	13
<i>6.Єлісєєв В.І., Кисляков В.Г., Руденко О.Л.</i> Розрахункове моделювання динаміки та розчинення паромангнієвих бульбашок у розплаві чавуну.....	16
<i>7. Завертайло М.В., Мацуга О.М.</i> Порівняльна оцінка індексів якості для кластеризації корелюючих ознак за різних представлень вхідних даних.....	19
<i>8. Загребаєв М. С., Звонецький М. С., Ящук О.О., С'янов О. М.</i> Модель тиристорного регулятора напруги - асинхронний двигун для дослідження перехідних процесів.....	22
<i>9. Зеря С. Ю., Коряшкіна Л.С.</i> Оптимізація розміщення центрів на графі за допомогою генетичного алгоритму	25

<i>10. Косухіна О.С., Авакімян А.С. Застосування генетичного програмування на прикладі задачі про літаючі тарілки.....</i>	29
<i>11. Лубенець Д. Є., Коряшкіна Л.С. Оптимізація матеріальних потоків в ієрархічних транспортно-логістичних системах із розміщенням проміжних розподільчих центрів.....</i>	32
<i>12. Молчанов А.О. Використання потенціалу подвійного шару для покращення наближення потенціальних полів з розривними умовами на границі.....</i>	35
<i>13. Олійник Л.О. Застосування операторного генетичного алгоритму до розв'язання інтегральних рівнянь Фредгольма.....</i>	37
<i>14. Пасічник А. М., Худа Ж. В., Богданенко О.С. Модифікація методу гілок і границь для задачі оптимізації маршрутів автомобільних перевезень з урахуванням об'єму вантажу.....</i>	41
<i>15. Pasichnyk V.A. Structural model of neural networkof optimization of software systems “OPTIMAL_SOFT”.....</i>	44
<i>16. Пеняк Б.О. Блокчейн в електронному урядуванні: глобальний досвід та стратегія для України.....</i>	45
<i>17. Сасов О.О., Боць В.В. Методи математичного моделювання технічного стану автотранспортних засобів.....</i>	47

18. <i>Сохацький А.В.</i> До проблеми математичного моделювання механізму переходу ламінарної течії до турбулентної	49
19. <i>Сугаль Є.О. Яцук О.О.</i> Розробка системи мінімізації втрат потужності асинхронних двигунів в умовах живлення несиметричною напругою	52
20. <i>Топилко П.І., Данканич А.О.</i> Просторове моделювання розташування сонячних панелей за допомогою генетичного алгоритму.....	55
21. <i>Фунтиков М.К., Мацуга О.М.</i> Дослідження структури ознак у медичному наборі даних за допомогою кластеризації.....	57
22. <i>Юр'єв М.В., Мацуга О.М.</i> Методи автоматичного визначення кількості та розташування вузлів кусково-лінійної регресії.....	61
23. <i>Ялова К.М., Ісмаїлов В.В.</i> Аналіз адресних даних в умовах невизначеності на основі алгоритмів нечіткого співставлення.....	64
24. <i>Ялова К.М., Шелюг К.Ю.</i> Вирівнювання мовних сигналів засобами алгоритму динамічного трансформування часу.....	67

СЕКЦІЯ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ТЕХНІЧНИХ НАУКАХ

25. <i>Авер'янов В.С., Шрам Є.С.</i> Модель раціонального варіанту автобусної маршрутної мережі.....	69
26. <i>Бейгул В.О., Часов Д.П., Лінник М.С.</i> Математичне моделювання методу калібрування кругових шпангоутів та циліндрових оболонки.....	72

27. Вєсков Є. В., Довгий С. О., Редчиць Д. О. Порівняльний аналіз чисельних схем апроксимації конвективних членів в OpenFOAM.....	75
28. Волошин Р.В., Турко М.Ю. Розрахунок тривалості плавлення розкислювачів в об'ємі розплаву і на межі шлак-метал.....	78
29. Глазунова О.Е., Клімов Р.О. Моделювання роботи частково децентралізованих систем теплопостачання	81
30. Дерезь О.Л., Садовой О.В., Костенко В.І. Моделювання релейної системи керування положенням з різним типами зворотних зв'язків.....	82
31. Єрьоміна К.А., Бурзаєв В.Б. Закономірності впливу вмісту та хімічного складу сплаву Al-Co на теплофізичні властивості надвисокомолекулярного поліетилену.....	85
32. Кабаков А.М., Кабаков Д.Ю. Математичне моделювання демпфуючих пристроїв.....	88
33. Качура О.В., Количев С.В., Сергієнко М.С. Модель трифазного асинхронного мікродвигуна систем автоматики для дослідження у динамічних режимах.....	91
34. Коровін О.О., Клімов Р.О., Крюковська О.А. Вплив розвинених поверхонь на характеристичні параметри теплообмінників.....	93
35. Кривуляк І.І., Маркович Б.В., Корендій В.М. Застосування LSTM-мереж для прогнозування руху біонічного протеза на основі EMG-сигналів.....	94

36. <i>Кругляк І.В., Сорока Д.В., Чухно С.С., Ткач Є.М., Овод Є.О.</i> Thermodynamic modeling of the gas phase during the preparation of boronized coatings under SHS conditions.....	96
37. <i>Кругляк І.В., Кривко Р.Г., Дерев'янка С.С., Гуменний А.М., Чеченін М.К.</i> Modeling of gas environment during strengthening of hot-rolled mechanical equipment.....	98
38. <i>Кудрін Д.В., Клімов Р.О.</i> Моделювання роботи переривчастих систем опалення	99
39. <i>Кузьменко В.І.</i> Методи умовної оптимізації у моделях технологічних операцій.....	100
40. <i>Makarenko M.V., Nosov D.G.</i> Development of a thermodynamic model for predicting the phase composition of multicomponent metallic alloys used in additive manufacturing.....	101
41. <i>Моргун Є.М., Надригайло Т.Ж.</i> Математичне моделювання процесу рафінування сталі.....	103
42. <i>Огліх В.В., Шаповалов О.В., Лісунова В.В.</i> Застосування методу аналізу відповідностей для моделювання взаємозв'язків у транспортній системі.....	106
43. <i>Пальцун Д.О., Давидюк А.В.</i> Математичне моделювання впливу модифікування на механічні властивості алюмінієвих сплавів.....	109

44. <i>Пасічник А. М., Малий А. М.</i> Математична модель газодинамічного розрахунку технічних параметрів пневматичної мікротурбіни.....	110
45. <i>Peremitko M.V., Nadryhailo T.Zh.</i> Methods of analyzing individual blood pressure measurements: trends, seasonality, and forecasting.....	114
46. <i>Razdobreev V.G., Kluychnikov K.Yu., Leschchenko A.I., Palamar D.G., Ivanov A.P.</i> Mathematical modeling of variable deformation of the strip.....	117
47. <i>Пасічник А.М., Ріна М. Ю.</i> Оптимізація розміщення системи укриттів із застосуванням методу діаграм Лагерра-Вороного.....	120
48. <i>Романюк О.Д., Романюк Я.О., Поліщук В.Ю.</i> Моделювання вибору оптимальної маси зубчастих коліс механічних передач.....	122
49. <i>Романюк О.Д., Романюк Я.О., Жуков Ф.Ф.</i> Використання цільової функції для оптимізації параметрів зубчастих коліс.....	123
50. <i>Романюк О.Д., Романюк Я.О., Невстакай О.С.</i> Методи оптимізації параметрів машинного агрегату.....	124
51. <i>Самохвалов С.Є., Піптюк В.П., Греков С.В.</i> Математичне моделювання тепломасопереносних процесів у ковші при введенні добавок з відмінною від рідкої сталі густиною.....	126
52. <i>Самохвалов С. Є., Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С.</i> Математичне моделювання тепломасопереносних процесів у конвертері, спричинених впливом пиловугільного факелу.....	128

53. <i>Середа Б.П., Зюзін Є.П., Орел В.Г., Глущенко А.О.</i> Modeling of the gas environment during hardening of KAMAZ-6520 engine parts.....	131
54. <i>Середа Б.П., Комендаров К.М., Стасевич О.О., Дробот Д.Я.</i> Thermodynamic modeling of the gas environment during hardening of the car chassis parts KRAZ-7133S4.....	132
55. <i>Середа Б.П., Кіфорук Д.О., Скребков К.О., Краневальд В.О.</i> Gas phase modeling during strengthening of parts of the GAZ-31105 car engine.....	134
56. <i>Середа Б.П., Суслов І.В., Гуляєв К.В., Удод А.М.</i> Modeling of gas environment when strengthening bus steering details.....	135
57. <i>Строєва В.О., Нужна С.А., Пузік А.О.</i> Математичне моделювання проектування зрошувальних систем.....	137
58. <i>Теліпка Л.П.</i> До питання модулювання динаміки промислових висотних споруд.....	139
59. <i>Tkach A.O., Zhulkovska I.I., Zhulkovskyi O.O., Vokhmyanin H.Ya.</i> Typing of programming languages as a factor of reliability of computer modeling.....	140
60. <i>Togobitska D., Belkova A., Khodotova N.E.</i> Specific aspects of applying the harrington desirability function to develop an integrated index for steel desulfurization in a ladle.....	142
61. <i>Тогобицька Д.М., Поворотня І.Р., Шевченко В.М.</i> Моделювання активностей компонентів системи Fe-Mn-P на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку	145

62. <i>Томіна А.-М.В., Попіль О.І., Єрєміна К.А.</i> Оптимізація режимів експлуатації полімерного композиту з бінарним наповнювачем на основі сплаву системи Al-Cr.....	148
63. <i>Торська М.О.</i> Генерування музичних композицій з використанням ланцюгів Маркова.....	150
64. <i>Трубник А.О., Клімов Р.О.</i> Вплив розвинених поверхонь на оптимальну конструкцію повітропідігрівачів.....	153
65. <i>Vernyhora D.V., Karimov I.K.</i> Algorithms and programs for modeling the thermal state of slab structures in the process of local heat treatment.....	155
66. <i>Фостяк В.Т., Маркович Б.В., Афтаназів І.С., Корендій В.М.</i> 3D-локалізація БПЛА з використанням тепловізійної зйомки та тріангуляції на основі спостереження.....	156
67. <i>Циба В. В.</i> Розвиток математичних моделей дослідження балістичної траєкторії польоту артилерійського снаряда.....	159
68. <i>Чернета О.Г., Буланій Р.О.</i> Модель навантаження поршневих кілець після зміцнення.....	161
69. <i>Чернятевич А.Г., Самохвалов С. Є., Сігарьов Є.М., Молчанов Л.С., Похвалітій А.А.</i> Математичне моделювання процесу нагрівання металевого брухту в конвертері обертовою багатосопловою фурмою.....	164
70. <i>Чугунов Д.В., Нізімов В.Б.</i> Моделювання пускових режимів синхронного двигуна з ємнісним накопичувачем енергії в фазних координатах.....	166

71. Шевцов В.Б., Носов Д.Г. Інтегрована модель для оптимізації параметрів адитивного наплавлення, що враховує хімічний склад, мікроструктуру та механічні властивості наплавленого шару.....	170
72. Шляхов Є.О. Комп'ютерне моделювання процесів взаємодії штампів з пружною основою.....	172
73. Шматко Д.З., Буланій Р.О. Моделювання введення прискорених режимів руху автобусів на маршрутах.....	174
74. Yashchuk O.O., Gurzhiy T.O. Mathematical modeling of vector control for induction generators in wind power systems.....	176

СЕКЦІЯ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ І УПРАВЛІННІ

75. Babenko M., Motsnyi I, Lyumar N. Designing an intelligent online store system using ontological tools.....	180
76. Бажан С.М. Використання генетичних алгоритмів для оптимізації обслуговування клієнтських потоків банківських установ.....	182
77. Бажан С.М., Трубіцина А.Р. Інтеграція штучного інтелекту як персонального консультанта у вебмагазині парфумів.....	184
78. Волосова Н.М., Гноєвой Д.В. Graphic model of optimal hotel management organization.....	187

79. <i>Волосова Н.М., Стеблюк Н.Ф.</i> Mathematical modeling of the logistics service system.....	188
80. <i>Гнатів Б.В., Гнатів Л.Б.</i> Модель економічних процесів на основі законів еконофізики.....	189
81. <i>Гуржий Т.О.</i> Ризики використання великих мовних моделей у фінансових розрахунках.....	193
82. <i>Омельченко І.В., Сафронова І.А.</i> Моделювання та аналіз вибору в умовах обмеженої інформації.....	197
83. <i>Пасічник А. М., Волосова Н.М., Гавріл С.А.</i> Математичне моделювання логістичної системи управління підприємством.....	199
84. <i>Rozdobudko E.V., Nadryhailo T.Zh.</i> Modern approaches to optimization of business processes management of marketing activities of enterprises.....	202
85. <i>Строєва В.О., Кісельова О.М., Тарасюк О.С.</i> Оптимальне розміщення мережі складів інтернет магазинів.....	205

СЕКЦІЯ 4. КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ

86. <i>Дерець О.Л., Черненко К.І.</i> Математичне моделювання перехідних процесів електричного кола з двома накопичувачами.....	207
---	-----

87. Жигалева С.П., Волосова Н.М. Математичне моделювання індивідуальної освітньої траєкторії та прийняття рішень щодо її коригування за результатами проміжних тестувань.....	210
88. Карімов І.К. Інформаційне забезпечення фізичної культури і спорту: деякі методологічні аспекти.....	214
89. Карімов І.К., Пододня Г.А., Штим Н.А. Комп'ютерні технології в діяльності навчального відділу ЗВО.....	216
90. Лимар Н.М. SWEBOOK як основа якісної підготовки фахівців з інженерії програмного забезпечення.....	218
91. Нужна С. А. Інтеграція технологій штучного інтелекту в сучасну освітню парадигму.....	221
92. Pasichnyk A.N., Pasichnyk V.A. Dynamics of development of mathematical modeling and creation of artificial intelligence systems.....	224
93. Теплий Я.Б., Досин Д.Г. Використання LLM-агента для онтологічного навчання.....	226
94. Tolstoi V.V., Sadovoi O.V. Overreliance on computer technologies in the studying process.....	229
95. Торшин В.В., Рибчак З.Л. Енергоефективне ПЗ: шлях до економії ресурсів та екологічної відповідальності.....	233

96. <i>Худа Ж. В., Нечипоренко А.Л.</i> Застосування функцій комплексної змінної до розрахунку електричних кіл.....	236
97. <i>Шевченко В. І.</i> Використання цифрових платформ і штучного інтелекту в підвищенні ефективності навчального процесу.....	238

Наукове видання

Мови видання: українська, англійська

ПРОБЛЕМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції
(27-28 травня 2025 року м. Кам'янське)

Доповіді друкуються в авторській редакції

За точність викладеного матеріалу відповідальність покладається на авторів

Учений секретар Волосова Н.М.
Комп'ютерна верстка Волосова Н.М.