

**Tetiana  
V. Smirnova**  
Смірнова  
Тетяна  
Віталіївна



**Oleksandr  
M. Drieiev**  
Дреєв  
Олександр  
Миколайович



**Oleksii  
A. Smirnov**  
Смірнов  
Олексій  
Анатолійович



**Yevhenii  
K. Solovykh**  
Солових  
Євгеній  
Костянтинович

УДК 004.67

## METHODS OF OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF RESTORATION OF STEEL COVERINGS

### МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ СТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2019.1\(11\).6](https://doi.org/10.15589/smi2019.1(11).6)

**Tetiana V. Smirnova**

Смірнова Тетяна Віталіївна, канд. техн. наук  
sm.tetyana@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-6896-0612

**Oleksandr M. Drieiev**

Дреєв Олександр Миколайович, канд. техн. наук  
drey.sanya@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-6951-2002

**Oleksii A. Smirnov**

Смірнов Олексій Анатолійович, проф., докт. техн. наук  
dr.SmirnovOA@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-9543-874X

**Yevhenii K. Solovykh**

Солових Євгеній Костянтинович, проф., докт. техн. наук  
sm.tetyana@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-6561-0964

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi*

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький*

**Abstract.** *Aim.* The purpose of this work is to investigate methods of optimization of technological processes of steel coating restoration. *Methodology.* To achieve this purpose, it is necessary to solve the following problems: 1. To formulate the technological process of restoring the surfaces of steel shafts as a chain of technological operations. 2. Investigate methods of technological process optimization. 3. To consider the problem of combinatorial complexity of structural optimization of technological process. 4. Identify approaches to the formation of an intelligent system for optimization of technological process of steel coatings restoration. *Results.* 1. It is determined that the exact solution of the optimization problem, in the form of a complete search of all possible chains of the process, is an unrealistic task because of the high computational complexity. 2. It is determined that in order to solve the optimization problem on the polymorphic chain of technological operations, the information intelligent system of process optimization should use the unification of the technological operation. 3. It is determined that an intelligent information system should support a set of optimization algorithms on a unified set of technological operations. 4. The neural network contained in the intelligent information system must learn from the solutions obtained in other ways. 5. The study showed the lack of development of existing information systems that can be used in cloud computing to optimize the chain of technological operations for the recovery of steel shaft surfaces. Therefore, developing your own information system that meets these requirements is an urgent task that needs to be addressed further. *Scientific novelty.* The study revealed a contradiction between existing approaches to optimizing the technological processes of repairing steel coatings and current requirements for information systems that can be used in cloud computing to optimize the chain of technological operations of repairing surfaces of steel shafts. The scientific task, development of own information system which satisfies the specified requirements is formulated. *Practical significance.* Using the proposed approach will increase the hardness, durability, improve the porosity parameters, reduce the roughness in the restoration of steel coatings.

**Key words:** ship repair, information system, optimization, restoration, surface.

**Анотація.** *Мета.* Метою роботи є дослідження методів оптимізації технологічних процесів відновлення сталевих покриттів. *Методика.* Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) сформулювати технологічний процес відновлення поверхонь сталевих валів як ланцюг технологічних операцій; 2) дослідити методи оптимізації технологічних процесів; 3) розглянути проблему комбінаторної складності структурної оптимізації технологічного процесу; 4) визначити підходи до формування інтелектуальної системи оптимізації технологічного процесу відновлення сталевих покриттів. *Результати.* 1. Визначено, що точне розв'язання задачі оптимізації у вигляді повного перебору всіх можливих ланцюгів технологічного процесу є

нереальною задачею з причини високої обчислювальної складності. 2. Визначено, що для розв'язання задачі оптимізації на поліморфному ланцюгу технологічних операцій інформаційна інтелектуальна система оптимізації технологічного процесу має використовувати уніфікацію технологічної операції. 3. Визначено, що інтелектуальна інформаційна система має підтримувати на уніфікованій множині технологічних операцій множину алгоритмів оптимізації. 4. Нейронна мережа, яка міститься в інтелектуальній інформаційній системі, має вчитися на розв'язках, які отримані іншими шляхами. 5. Дослідження показало недостатній розвиток існуючих інформаційних систем, які можна використати у хмарних обчисленнях із метою оптимізації ланцюга технологічних операцій відновлення поверхонь сталевих валів. Тому розробка власної інформаційної системи, яка задовольняє зазначеним вимогам, є актуальною задачею, яка потребує вирішення у подальшому. *Наукова новизна.* Проведене дослідження виявило протиріччя між існуючими підходами оптимізації технологічних процесів відновлення сталевих покриттів та сучасними вимогами до інформаційних систем, які можна використати у хмарних обчисленнях із метою оптимізації ланцюга технологічних операцій відновлення поверхонь сталевих валів. Сформульовано наукове завдання у вигляді обґрунтування необхідності розробки власної інформаційної системи, яка задовольняє зазначеним вимогам. *Практична значимість.* Використання запропонованого підходу дасть змогу підвищити твердість, зносостійкість, покращити параметри пористості, зменшити шорсткість при відновленні сталевих покриттів.

**Ключові слова:** судноремонт, інформаційна система, оптимізація, відновлення, поверхня.

## References

- [1] Anfyorov, M.A., Selyvanov, S.H. (1996). *Struktornaia optymyzatsiya tekhnolohycheskykh protsessov v mashynostroenyi*. Ufa, Hylem.
- [2] Selivanov, S.G., Guzairov, M.B., Kutin, A.A. (2008). *Innovatika : uchebnyk dlya vuzov*. [2-e izd., mashinostroyeniye].
- [3] Hlybovets, M.M., Oletskiy, O.V. (2002). *Shtuchnyi intelekt: pidruch. dlia stud. vyshch. navch. zakladiv, shcho navchayutsia za spets. «Kompiuterni nauky» ta «Prykladna matematyka»*. [Vyd. dim «KM Akademiia»]. ISBN 966-518-153-X
- [4] Smirnova T.V. (2019). *Pobudova khmarnykh informatsiinykh tekhnolohii optymyzatsii tekhnolohichnoho protsesu vidnovlennia ta zmitsnennia poverkhon detalei / T.V. Smirnova, Ye.K. Solovykh, O.A. Smirnov, O.M. Driev : zbirnyk naukovykh prats. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk, tekhnichni nauky. Kropyvnytskyi, 2019. Vyp. 32. S. 38–45.*
- [5] Subbotin, S.O. (2008). *Podannia y obrobka znan u systemakh shtuchnoho intelektu ta pidtrymky pryiniattia rishen*. [Navchalnyi posibnyk]. Zaporizhzhia : ZNTU. ISBN 978–966–7809–87–4.
- [6] Retrieved from: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b8/Supercomputing-rmax-graph2.svg/1260px-Supercomputing-rmax-graph2.svg.png>
- [7] Siyu Hea, Yin Lid, Yu Fengd, Shirley Hoa, Siamak Ravanbakhshg, Wei Chenc, and Barnabas Poczoz (2019). *Learning to predict the cosmological structure formation*. Edited by Neta A. Bahcall, Princeton University, Princeton, NJ, and approved May 23, (received for review December 17, 2018) PNAS July 9, vol. 116, no. 28. 13825–13832. Retrieved from: <https://www.pnas.org/content/pnas/116/28/13825.full.pdf>
- [8] Baldin, K.V., Utkin, V.B. (2008). *Informatsionnyie sistemyi v ekonomike*. [uchenik, 5-e izd.]. Izdatelsko-torgovaya korporatsiya «Dashkov i K0».
- [9] *Iskusstvennyiyy intellekt*. Kn. 1. *Sistemyi obscheniya i ekspertnye sistemyi / Pod red. E.V. Popova. M. : Radio i svyaz, 1990.*
- [10] Korneev, V.V., Garev, A.F., Vasyutin, S.V., Rayh, V.V. (2000). *Bazyi danyih. Intellektualnaya obrabotka informatsii*. Nolidzh.
- [11] Kotov, S.A. (2002). *Normirovanie zhiznennogo tsikla programmnoy produktsii*. YuNITI.
- [12] Rayordan, R. (2001). *Osnovyi relyatsionnyih baz danyih*. Russkaya redaktsiya.
- [13] Makarchuk, T.A., Minakov, V.F., Schugoreva, V.A. (2014). *Oblachnyie resheniya postroyeniya informatsionnyih sistem upravleniya resursami organizatsii. Mezhdunarodnyiy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. Research Journal of International Studies*. # 1 (20). S. 68–69.
- [14] Razumnikov, S.V. (2015). *Integralnaya model otsenki effektivnosti i riskov oblachnyih IT-servisov dlya vnedreniya na predpriyatii. Fundamentalnyie issledovaniya*. #. 2-24. C. 5362–5366.
- [15] Razumnikov, S.V., Kurmanbay, A.K. (2015). *Razrabotka modeley otsenki effektivnosti i riskov vnedreniya oblachnyih IT-servisov: sistemnyiy pohod. SCIENCE TIME*. # 9 (21). S. 221–227.
- [16] Mohamed S. Sawas, Mohamed K. Watfa (2015). *The Impact of Cloud Computing on Information Systems Agility. Australasian Journal of Information Systems*. Vol. 19. Pp. 97–112.
- [17] Dr. Ahmed Yass Algrari. (2017). *The Impact of Cloud Based Information Systems on Organization's Performance. IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)* e-ISSN: 2278-0661, p-ISSN: 2278-8727. Volume 19, Issue 2, Ver. II, pp. 42-46. Retrieved from: [www.iosrjournals.org](http://www.iosrjournals.org)

- [18] Wang (2012). Enterprise cloud service architectures. *Information Technology and Management*. 13 (4), 445–454. DOI:10.1007/s10799-012-0139-4.
- [19] HAMDAQA, Mohammad (2012). *Cloud Computing Uncovered: A Research Landscape* (PDF). Elsevier Press, pp. 41–85. ISBN 978-0-12-396535-6.
- [20] Eli Hustad, Dag H. Olsen, Emeli Høvik Jørgensen and Vegard Uri Sørheller, *Creating Business Value from Cloud-Based ERP Systems in Small and Medium-Sized Enterprises, Digital Transformation for a Sustainable Society in the 21st Century*, 10.1007/978-3-030-29374-1\_56, 2019. Pp. 691–703.
- [21] CAE as a Service. Retrieved from: <https://www.cpu-24-7.com/cae/cae-as-a-service/>
- [22] Radu Crahmaluc. (2019). 10 Reasons Why Cloud-Based CAD and CAE are the Better Options. Retrieved from: <https://www.simscale.com/blog/2016/03/10-reasons-why-cloud-cae-is-better/>
- [23] Cloud computing for CAE – The future certainly looks cloudy. Retrieved from: <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cax/cloud-computing-for-cae-the-future-certainly-looks-cloudy>
- [24] Ho SH. (2012) Development of Simulation Service Platform Based on Cloud Computing for Manufacturing Industry. In: Kim JH., Lee K., Tanaka S., Park SH. (eds) *Advanced Methods, Techniques, and Applications in Modeling and Simulation. Proceedings in Information and Communications Technology*. Vol 4. Springer, Tokyo. Pp. 164–169. Retrieved from: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-4-431-54216-2\\_18](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-4-431-54216-2_18)
- [25] Cloud-based CAE software is transforming the design and engineering industry by Tech Wire Asia. Retrieved from: <https://techwireasia.com/2017/05/cloud-based-cae-software-transforming-design-engineering-industry/>

**Постановка задачі.** У судноремонтних роботах актуальною є задача відновлення сталевих поверхонь деталей двигунів та механізмів, яка розв’язується за допомогою ланцюга технологічних операцій відновлення. Процес відновлення може реалізовуватися різними технологіями та, в будь-якому разі, вимагає значних матеріальних і часових витрат. Проте відновлення є значно дешевшим за виготовлення або закупівлю нових деталей, тому зменшення часових та матеріальних витрат за рахунок вибору правильного ланцюга технологічних операцій які виконуються в оптимальному режимі, є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У працях [1–3] визначено поняття оптимізації технологічної операції. У [4] визначено, що в разі неможливості отримати бажані параметри за одну технічну операцію дозволяється використання їх допустимих комбінацій. У [5] визначено технологію систем, заснованих на знаннях, або технологію інженерії знань. У [9] визначені сфери використання інтелектуальних інформаційних систем. Дослідження джерел [22; 23] показало недостатній розвиток існуючих інформаційних систем, які можна використати в хмарних обчисленнях із метою оптимізації ланцюга технологічних операцій відновлення поверхонь сталевих валів. Таким чином, аналіз останніх досліджень та публікацій підтвердив актуальність завдання дослідження методів оптимізації технологічних процесів відновлення сталевих покриттів.

**Виокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Оптимізація технологічного процесу відновлення сталевих поверхонь складається, принаймні, з підготовки поверхні, виправлення та зміцнення верхнього шару і вимагає для планування наявності значного досвіду. Для накопичення досвіду планування відновлювальних операцій та автоматизації планування технологічних операцій використовують інформаційні експертні системи. На сучасних виробництвах доступ до інформаційної системи має

здійснюватися з різних точок виробництва. Це накладає вимогу на експертну систему, яка повинна мати мережеву будову. Як показує досвід використання мережевих інформаційних систем, більшу надійність та функціональність мають розподілені та хмарні системи, де немає виділеного осередку, при вилученні якого інформаційна система перестає функціонувати.

**Мета дослідження** – дослідження методів оптимізації ланцюга відновлювальних технологічних операцій сталевих поверхонь, які можна покласти в основу хмарної інформаційної системи.

**Методи, об’єкт та предмет дослідження.** Основні теоретичні положення роботи отримані з використанням методів теорії оптимізації, теорії складних систем, теорії побудови експертних систем, інформаційного та математичного моделювання технологічних операцій, теорії штучного інтелекту.

Об’єктом дослідження є процес технологічного процесу відновлення сталевих поверхонь.

Предметом дослідження є методи оптимізації технологічного процесу відновлення сталевих поверхонь.

### Основний матеріал (результати)

#### 1. Технологічний процес відновлення поверхонь сталевих валів як ланцюг технологічних операцій

У технологічному процесі відновлення поверхонь сталевих валів використовуються, в тому числі, такі технологічні операції:

- ДО – струйно-абразивна обробка;
- ГТН – газотермічне напилення;
- ЕКЗ – електроконтактне зміцнення;
- МО – механічна обробка;
- ГПН – газопламеневе напилення;
- ЕДН – електродугове напилення;
- ЕКП – електроконтактне припикання;
- ЕКО – електроконтактна обробка;
- ЕКПД – електроконтактне пластичне деформування;

- ІА – іонне азотування;
- ЕІЛ – електроіскрове легування.

Кожна з операцій відповідає за підготовку поверхні до подальшої обробки, основна обробка поверхні валу та доведення зовнішнього шару до вимог шорсткості, твердості та інших параметрів технічних вимог до виробу. Кожна з технічних операцій має вимоги до початкових параметрів поверхні валу, допустимі режими обробки та параметри результату обробки. У разі неможливості отримати бажані параметри за одну технічну операцію дозволяється використовувати їх допустимі комбінації [4]. В результаті постанови мети оптимізації технологічного процесу відновлення сталевих валів маємо задачу створити інформаційну систему забезпечення функціонування експертних систем оптимізації окремих зазначених технологічних операцій та експертної системи оптимізації ланцюга цих операцій.

З метою формалізації поставлених задач створення інформаційної системи побудови оптимізованого ланцюга технологічних операцій потрібно розглянути методи оптимізації, види застосованих експертних систем та методів інформаційного моделювання технологічних операцій. На основі здійсненого огляду формулюється основні вимоги для створюваної інформаційної системи.

Аналіз можливих методів оптимізації технологічного процесу вимагає його формалізації. Тому представимо технологічний процес  $T$  як множину технологічних операцій  $T = \{T_{1a}, T_{2b}, \dots, T_{ic}\}$ , де  $1, 2, \dots, i$  – порядковий номер технологічної операції;  $a, b, \dots, c$  – вид технологічної операції. При цьому кожна з технологічних операцій приймає параметри проведення операції  $x_i$ , що для повного технологічного процесу об'єднується у спільний вектор параметрів  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ , на параметри накладені межі дозволених значень. У результаті вектор параметрів не є постійної розмірності і залежить від обраних у конкретному випадку видів технологічних операцій.

Ефективність технологічного процесу оцінюється скалярною величиною  $F$ , яку потрібно звести до мінімуму, задовольняючи граничні вимоги.

## 2. Методи оптимізації технологічних процесів

Під оптимізацією технологічної операції тут розуміється розв'язання задачі обрання параметрів у допустимих межах проведення операції, при яких досягаються задані критерії з допустимою похибкою, та мінімізується обраний критерій, наприклад собівартість операції [1-3].

Задача оптимізації технологічного процесу полягає у такому:

- визначається критерій, який треба звести до максимального або мінімального значення. Якщо таких критеріїв кілька, то проводитиметься багатокритеріальна оптимізація;

- визначається множина вхідних параметрів, які характеризують вхідну сировину, порядок технологічних операцій та режими їх проведення  $X$ . На цьому етапі на вхідні параметри накладають обмежен-

ня, тобто значення, при яких технологічна операція є можливою. Проводиться відкидання параметрів, які не впливають на величину  $F$ , яка оптимізується;

- формується цільова функція  $F=F(X)$ . Цільова функція має вертати скалярне значення, для якого існує відношення порядку, бо лише в цьому випадку можна вводити поняття максимуму та мінімуму. У випадках повернення векторної величини, тобто коли проводиться багатокритеріальна оптимізація, вектор приводиться до скалярної величини, часто шляхом використання лінійної комбінації компонентів вектора, де коефіцієнти підбирають відповідно до важливості того чи іншого критерію;

- наступним кроком є пошук екстремумів цільової функції та її граничних значень на множині визначення, з яких залишають ті, де критерій  $F$  має мінімальне (максимальне) значення. При цьому має отримуватися відповідний ланцюг технологічних операцій, які формують технологічний процес.

Для зазначених технологічних операцій відновлення поверхні сталевих валів є можливим оптимізувати окрему технологічну операцію, а також є змога змінювати кількість та порядок цих технологічних операцій. Відповідно, вимогами до інформаційної системи оптимізації технологічного процесу є змога виконувати як параметричну, так і структурну оптимізацію. Структурна оптимізація вимагає складної формалізації, яка буде враховувати значно більшу гнучкість, бо в результаті менш оптимальна операція, в локальному розумінні, може скоротити загальний ланцюг технологічних операцій і значно скоротити весь ланцюг операцій, що на виході забезпечить більшу близькість до оптимального технологічного процесу. У результаті врахування структурної оптимізації інформаційна система має забезпечувати:

- уніфікацію технологічної операції;
- формування шляхів на графі можливих комбінацій технологічних операцій;
- експертну систему оптимізації виділеного ланцюга технологічних операцій за наявності систем оптимізації окремих технологічних операцій;
- наявність факту, що оптимізація технологічних операцій технологічного процесу рівносильна повній оптимізації (задача розв'язується жадібним алгоритмом) або має систему пошуку оптимальності для повного ланцюга технологічного процесу.

У разі визначеності порядку в технологічному процесі з відомою цільовою функцією використовують аналітичні розв'язки при автоматизації. У разі невизначеності порядку операцій оптимізацію потрібно проводити для кожного пробного ланцюга й обирати більш оптимальний. Однак, кількість можливих ланцюгів може бути непомірно великою, тому в цьому разі потрібно використовувати евристичні методи пошуку оптимального шляху за технологічними операціями для формування технологічного процесу близького до оптимального, бо точного розв'язання можна шукати невизначено довгий час.

Класифікація методів оптимізації технологічних процесів представлено на рис. 1.

У процесі побудови системи оптимізації технологічних процесів потрібна наявність опису технологічної операції, коли з параметрів технологічної операції отримують вихідні параметри та витрати на проведення цієї операції. Для вирішення цієї задачі використовують математичні моделі.

Математична модель – комплекс математичних залежностей і знаково-логічних виразів, що відображають характеристики явища, яке вивчається, з достатньою точністю. Класифікація моделей наведена на рис. 2. Істотно для можливості використання математичних методів пошуку екстремальних значень параметру, який оптимізується, можна використовувати аналітичні, структурні та формальні методи математичного представлення технологічних операцій.

У результаті аналізу придатних для оптимізації ланцюга технологічних операцій обробки поверхні сталевого валу, з причини неоднозначності порядку технологічних операцій і за наявності математичного опису окремих технологічних операцій, доходимо висновку, що інформаційна система повинна мати можливість підтримки структурного опису порядку операцій з аналітичним або формальним представленням окремих операцій. При таких вимогах до представлення технологічних процесів інформаційна система має забезпечувати структурно-параметричну оптимізацію ланцюга технологічних процесів, що має недостатній рівень вивчення.

**3. Проблема комбінаторної складності структурної оптимізації технологічного процесу**

Нехай можливі ланцюги технологічного процесу представлені діаграмою на рис. 3, де кожен

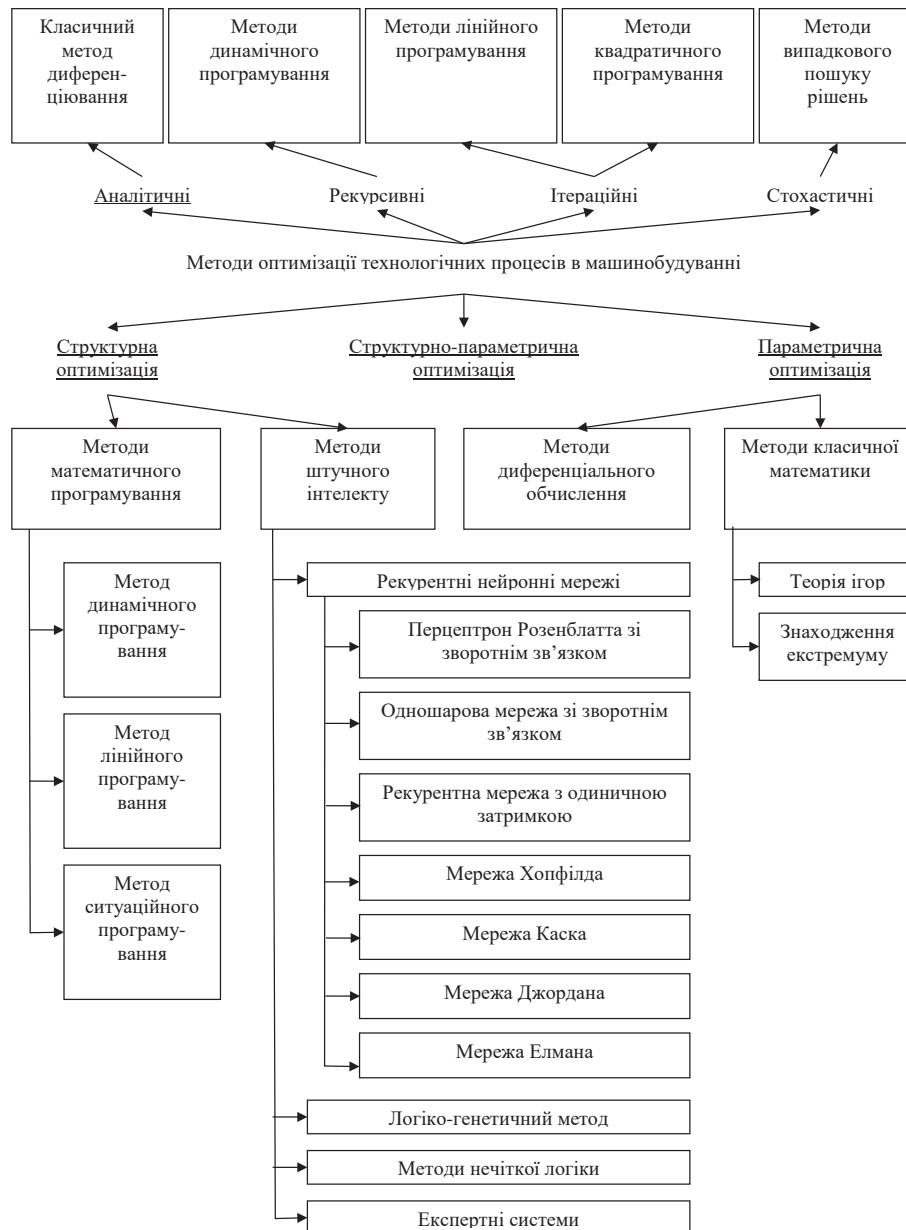


Рис. 1. Класифікація методів оптимізації технологічних процесів [1; 2]

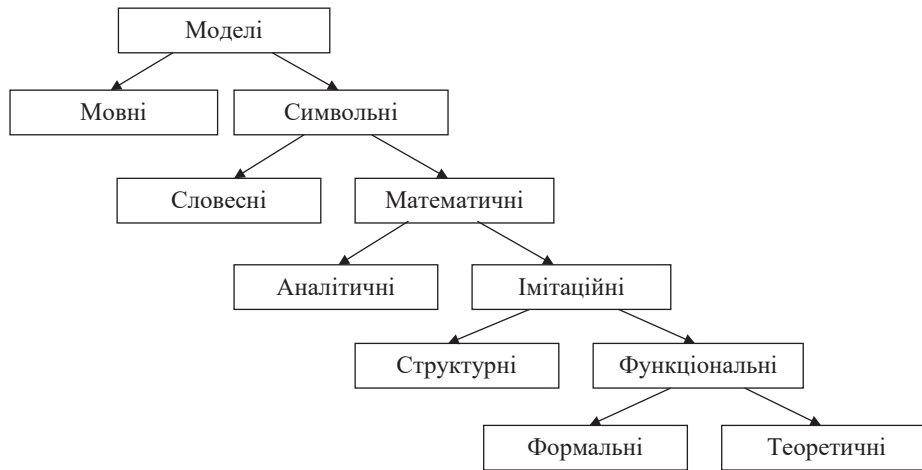


Рис. 2. Класифікація математичного моделювання [3]

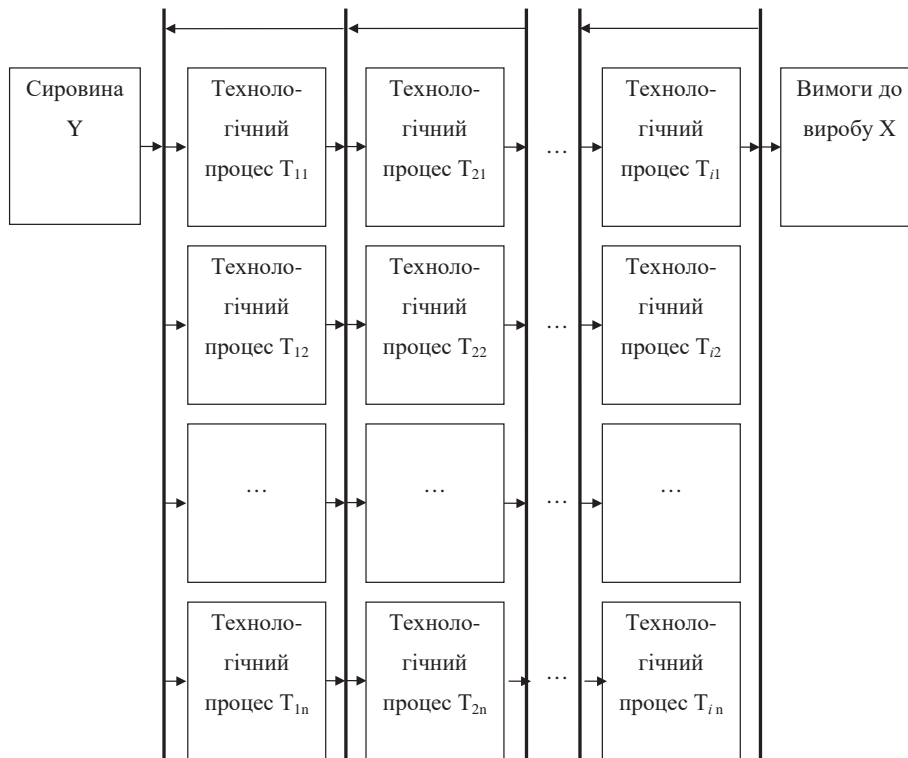


Рис. 3. Формування технологічного процесу з технологічних операцій  $T_{ij}$  [4]

технологічний крок  $1..i$  представлено відповідно  $n, k, \dots, m$  можливими технологічними операціями  $T_{ij}$ . Тоді технологічний процес можна представити  $S=n \cdot k \cdot \dots \cdot m$  варіантами ланцюгів технологічних операцій. Завдання відшукування оптимальної структури можна звести до  $n+k+\dots+m$  локальних оптимізацій технологічних операцій, якщо на кожному кроці шукається оптимальна технологічна операція та результат не впливає на результат попередньої та наступної операцій. Однак, на жаль, це не завжди так.

Також, за умови екстремальних вимог, коли операція може бути багатопрохідна, а сам технологічний процес може мати не сувору послідовність (на

рис. 3 це показано можливими шляхами ліворуч, кількість можливих ланцюгів операцій стає нескінченною):

Наприклад, для ГПН, із метою отримання товстих шарів без порушення термічних режимів шарів відновлювальної деталі, є можливість повторення процедури кілька разів, що в описі технологічної операції може фігурувати як обмеження на товщину напиленого шару за одну операцію.

У таких випадках, коли кількість можливих ланцюгів технологічних операцій стає значною, і повний перебір є або недоцільним або неможливим, потрібно переходити до наближених методів пошуку оптимального шляху технологічного процесу. На

цьому етапі можна виділити методи структурно-параметричної оптимізації:

– випадковий пошук, коли випадковим чином обирається ланцюг технологічного процесу, для якого проводиться параметрична оптимізація. За результатами параметричної оптимізації обраного ланцюга проводиться корекція ймовірності обрання технологічних операцій під час генерування нового випадкового технологічного процесу. У процесі множинного повторення дій виділяється підвищена ймовірність вибору більш корисної операції для необхідного технологічного процесу;

– генетичний алгоритм. Генетичні алгоритми та їх похідні (наприклад мурашиний алгоритм) застосовні на комбінаторних конфігураціях, що досить добре підходить до розв'язання поставленої задачі. Відповідно до алгоритму, процес пошуку оптимального ланцюга операцій вимагає наявності множини допустимих розв'язків, на які вводяться операції комбінування та мутації. Потім проводять «еволюцію» множини розв'язків, до моменту припинення зменшення або сильного зниження швидкості зміни критерію оптимальності;

– жадібний алгоритм. У цьому методі обирається випадковим чином початковий не обов'язково допустимий ланцюг технологічних операцій. Наступним кроком, у довільному порядку, проводиться підбір етапу технологічної операції ( $T_{ij}$  – де  $i$  фіксоване,  $j$  – шукане), який наблизить технологічний процес до можливого або зменшить критерій оптимальності F

усього ланцюга технологічних операцій. Процедура повторюється або циклічно за етапами технологічних операцій, або з випадковим вибором технологічних операцій.

Всі три наведені методи не гарантують досягнення оптимального результату, але дають змогу з певною точністю досягти локального мінімуму оптимізаційної функції.

Відповідно до розглянутих методів наближеного пошуку оптимального ланцюга технологічних операцій, усі методи вимагають проведення значної кількості параметричної оптимізації, що також є затратною задачею. Тому зменшення кількості невдалих спроб підбору послідовності технологічних операцій є актуальною задачею, яку можна покласти на системи штучного інтелекту або на експертну систему.

#### 4. Інтелектуальні системи оптимізації технологічного процесу

З метою обмеження трактування наведеного матеріалу використаємо означення, які наведені в роботі [5]:

– штучний інтелект – кібернетична система, яка вирішує інтелектуальні задачі [5];

– інтелектуальна задача – задача, яка не має відомих точних алгоритмів розв'язання. При цьому під рішенням задачі розуміється будь-яка діяльність, пов'язана з розробкою планів і виконанням дій, необхідних для досягнення визначеної мети [5];

– інтелектуальні системи загального призначення – системи, що не тільки виконують задані процедури,



Рис. 4. Класифікація систем штучного інтелекту [5]

але на основі метапроцедур пошуку генерують і виконують процедури рішення нових конкретних задач. Технологія використання таких систем полягає в тому, що користувач (експерт) формує знання (дані і правила), що описують обране застосування, потім на підставі цих знань, заданої мети і вихідних даних метапроцедури системи генерують і виконують процедуру вирішення конкретної задачі. Цю технологію називають технологією систем, заснованих на знаннях, або технологією інженерії знань [5-7; 9-10];

– спеціалізовані інтелектуальні системи – вирішують фіксований набір задач, визначений при проектуванні системи. Для використання таких систем потрібно наповнити їх даними, що відповідають обраному застосуванню [5; 10].

Загальноприйнята класифікація систем штучного інтелекту наведена на рис. 4 [5]:

У сучасному розвитку комп'ютерної техніки спостерігається тенденція до збільшення обчислювальної потужності. Сьогоднішні домашні системи, які призначені для відтворення відео або ігор, за обчислювальною потужністю можуть зрівнятися з суперкомп'ютерами п'ятнадцятирічної давнини (рис. 5). Відповідно до отриманих обчислювальних потужностей, у широкого кола програмістів з'явилася змога використовувати складні алгоритми обробки великої кількості даних на малих комп'ютерах, які можуть використовуватися на порівняно невеликих інформаційних системах. Це спонукало різкий розвиток нейронних мереж, коли широке коло дослідників отримали змогу проводити навчання глибоких нейронних мереж не лише на високопродуктивних обчислювальних кластерах.

Одним із досягнень є використання нейронної мережі для імітування розвитку в часі параметрів

народження Всесвіту, коли мережа на параметрах, які не входили до навчальної послідовності, давала задовільні результати точності моделювання з набагато меншою обчислювальною складністю порівняно з іншими алгоритмами розрахунку з подібним порядком точності розрахунків [7]. Це свідчить про значний потенціал узагальнення матеріалу для тренування нейронними мережами. Та хоч нейронні мережі на цей час отримали значного розвитку у структурі та засобах навчання, але вони залишаються лише окремим випадком інтелектуальних систем. Наприклад, сфери використання інтелектуальних інформаційних систем [8-12], які наведені на рис. 6, для 2008 р. вже є застарілими, бо з успіхом нейронні мережі застосовувалися в усіх зазначених сферах, крім систем, заснованих на логічних виводах.

Недоліком інформаційних систем, які ґрунтуються на використанні нейронних мереж, є вимога наявності великої кількості даних для навчання: інформаційних пар «вимоги до результату технологічного процесу» – «параметри технологічного процесу». Тому нейронна мережа на початку експлуатації інформаційної інтелектуальної системи оптимізації технологічного процесу може використовуватися як допоміжний захід, коли оптимізація проводиться іншими методиками евристичного пошуку, а результати використовують у навчанні нейронної мережі. Також за відсутності заявок на обслуговування зі сторони користувачів інформаційної системи інформаційна система проводить самонавчання шляхом генерування валідних вимог до результатів технологічного процесу з подальшим процесом оптимізації евристичними методиками; результати використовують для навчання нейронної мережі. При досягнен-

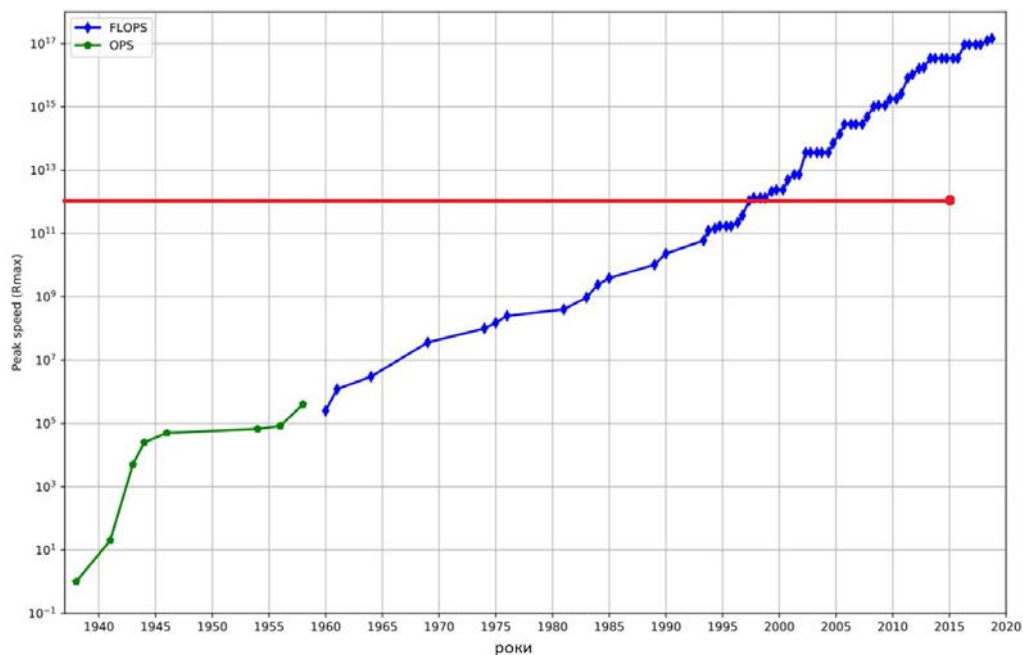


Рис. 5. Продуктивність суперкомп'ютерів в відповідні роки. Точкою позначено продуктивність сучасного домашнього комп'ютера [6]





Рис. 6. Класифікація інтелектуальних інформаційних систем, яку опубліковано у 2008 р. [8]

ні бажаної точності роботи нейронної мережі вона може виступати самостійним високопродуктивним модулем оптимізації, розв'язок якого може бути уточнений за допомогою евристик. За допомогою значного покращення початкового наближення до оптимального технологічного процесу ітераційні процеси оптимізації евристичними проходять значно швидше.

### ВИСНОВКИ

1. Визначено, що оптимізація технологічних операцій не дає гарантії оптимальності технологічного процесу, який складається з послідовності цих операцій. Цей факт вимагає для точного розв'язання задачі оптимізації повного перебору всіх можливих ланцюгів технологічного процесу, що в більшості задач є не реальною задачею з причини високої обчислювальної складності.

2. Для розв'язання задачі оптимізації на поліморфному ланцюгу технологічних операцій інформаційна інтелектуальна система оптимізації технологічного процесу має використовувати уніфікацію

технологічної операції. Це дасть змогу не лише, без втручання до алгоритмів оптимізації, комбінувати технологічні операції, але й змінювати їх порядок, доповнювати їх, використовувати однакові за структурою щодо входу-виходу інформації алгоритми оптимізації.

3. Інтелектуальна інформаційна система має підтримувати на уніфікованій множині технологічних операцій множину алгоритмів оптимізації.

4. Нейронна мережа, яка міститься в інтелектуальній інформаційній системі, має вчитися на розв'язках, які отримані іншими шляхами, у тому числі і доданими до бази даних експертами.

5. Дослідження джерел [13-25] показало недостатній розвиток існуючих інформаційних систем, які можна використати у хмарних обчисленнях із метою оптимізації ланцюга технологічних операцій відновлення поверхонь сталевих валів. Тому розробка власної інформаційної системи, яка задовольняє зазначеним вимогам, є актуальною задачею, яка потребує вирішення у подальшому.

### Список літератури:

- [1] Анфёров М.А. Структурная оптимизация технологических процессов в машиностроении / М.А. Анфёров, С.Г. Селиванов. Уфа : Гилем, 1996. 185 с.
- [2] Селиванов С.Г. Инноватика: учебник для вузов, 2-е изд., машиностроение / С.Г. Селиванов, М.Б. Гузаиров, А.А. Кутин. 2008. 721 с.
- [3] Глибовець М.М. Штучний інтелект: підруч. для студ. вищ. навч. закладів, що навчаються за спец. «Комп'ютерні науки» та «Прикладна математика». / М.М. Глибовець, О.В. Олецкий. Вид. дім «КМ Академія», 2002. 366 с. ISBN 966-518-153-X

- [4] Смірнова Т.В. Побудова хмарних інформаційних технологій оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей / Т.В. Смірнова, Є.К. Солових, О.А. Смірнов, О.М. Дреєв. *Збірник наукових праць, Центральноукраїнський науковий вісник, технічні науки*. Кропивницький, 2019. Вип. 32. Ст. 38–45.
- [5] Субботін С.О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. 341 с. ISBN 978–966–7809–87–4
- [6] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b8/Supercomputing-rmax-graph2.svg/1260px-Supercomputing-rmax-graph2.svg.png>
- [7] Siyu Hea, Yin Lid, Yu Fengd, Shirley Hoa, Siamak Ravanbakhshg, Wei Chenc, and Barnabas Poczoz (2019). Learning to predict the cosmological structure formation. Edited by Neta A. Bahcall, Princeton University, Princeton, NJ, and approved May 23, (received for review December 17, 2018) PNAS July 9, 2019. Vol. 116. № 28. 13825–13832. URL: <https://www.pnas.org/content/pnas/116/28/13825.full.pdf>
- [8] Балдин К.В. Информационные системы в экономике : учебник, 5-е изд. / К.В. Балдин, В.Б. Уткин. Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К0», 2008. 395 с.
- [9] Искусственный интеллект. Кн. 1. Системы общения и экспертные системы / Под ред. Э.В. Попова. Москва : Радио и связь, 1990.
- [10] Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В.В. Корнеев, А.Ф. Гарев, С.В. Васютин, В.В. Райх. Нолидж, 2000.
- [11] Котов С.А. Нормирование жизненного цикла программной продукции. ЮНИТИ, 2002.
- [12] Райордан Р. Основы реляционных баз данных. Русская редакция, 2001.
- [13] Макачук Т.А., Минаков В.Ф., Щугорева В.А. Облачные решения построения информационных систем управления ресурсами организации. Международный научно-исследовательский журнал. *Research Journal of International Studies*. 2014. № 1 (20). С. 68–69.
- [14] Разумников С.В. Интегральная модель оценки эффективности и рисков облачных ИТ-сервисов для внедрения на предприятии. *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2-24. С. 5362–5366.
- [15] Разумников С.В., Курманбай А.К. Разработка моделей оценки эффективности и рисков внедрения облачных ИТ-сервисов: системный подход. *SCIENCE TIME*. 2015. № 9 (21). С. 221–227.
- [16] Mohamed S. Sawas, Mohamed K. Watfa (2015). The Impact of Cloud Computing on Information Systems Agility. *Australasian Journal of Information Systems*. Vol. 19. Pp. 97–112.
- [17] Dr. Ahmed Yass Algrari. (2017). The Impact of Cloud Based Information Systems on Organization's Performance. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)* e-ISSN: 2278-0661, p-ISSN: 2278-8727. Volume 19. Issue 2, Ver. II. Pp. 42–46. URL: [www.iosrjournals.org](http://www.iosrjournals.org)
- [18] Wang (2012). Enterprise cloud service architectures. *Information Technology and Management*. 13 (4), 445–454. DOI:10.1007/s10799-012-0139-4.
- [19] HAMDAQA, Mohammad (2012). Cloud Computing Uncovered: A Research Landscape (PDF). Elsevier Press. Pp. 41–85. ISBN 978-0-12-396535-6.
- [20] Eli Hustad, Dag H. Olsen, Emeli Høvik Jørgensen and Vegard Uri Sørheller, Creating Business Value from Cloud-Based ERP Systems in Small and Medium-Sized Enterprises, Digital Transformation for a Sustainable Society in the 21st Century, 10.1007/978-3-030-29374-1\_56, 2019. Pp. 691–703.
- [21] CAE as a Service. URL: <https://www.cpu-24-7.com/cae/cae-as-a-service/>
- [22] Radu Crahmaliuc. (2019). 10 Reasons Why Cloud-Based CAD and CAE are the Better Options. URL: <https://www.simscale.com/blog/2016/03/10-reasons-why-cloud-cae-is-better/>
- [23] Cloud computing for CAE – The future certainly looks cloudy. URL: <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cax/cloud-computing-for-cae-the-future-certainly-looks-cloudy>
- [24] Cho SH. (2012) Development of Simulation Service Platform Based on Cloud Computing for Manufacturing Industry. In: Kim JH., Lee K., Tanaka S., Park SH. (eds) Advanced Methods, Techniques, and Applications in Modeling and Simulation. Proceedings in Information and Communications Technology. Vol 4. Springer, Tokyo. Pp. 164–169. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-4-431-54216-2\\_18](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-4-431-54216-2_18)
- [25] Cloud-based CAE software is transforming the design and engineering industry by Tech Wire Asia. URL: <https://techwireasia.com/2017/05/cloud-based-cae-software-transforming-design-engineering-industry/>