

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

3 (152) 2024

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА
- МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ
- СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (152). - Дніпро, 2024. – 182 с.
ISSN 1562-9945 (Print).
ISSN 2707-7977 (Online).

Редакційна колегія випуску:

Алпатов А.П. - д.т.н., проф. (відп. редактор)
Архипов О.Є. - д.т.н., проф.
Білозьоров В.Є. - д.ф.-м.н., проф.
Бабічев С.А. (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.
Єрьомін О.О. - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні
технології та організація
сучасного виробництва

Гече Ф.Е. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гуда А.І. - д.т.н., проф.
Гнатушенко Вік.В. - д.т.н., проф.
Скалозуб В.В. - д.т.н., проф.

Математичне
та програмне забезпечення
інтелектуальних систем

Гнатушенко В.В. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гожий О.П. - д.т.н., проф.
Кіріченко Л.О. - д.т.н., проф.
Светличний Д.С. (Польща) - д.т.н., проф.
Хандецький В.С. - д.т.н., проф.

Системні технології
обробки інформації
та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 31.01.2024 р., № 6

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Гагаріна, 4
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. +38(097)6854525
E-mail: st@nmetau.edu.ua
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

© Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
ІБК «Системні технології», 2024

С.В. Аджамський, Г.А. Кононенко, Р.В. Подольський

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СПОСОБІВ

МІНІМІЗАЦІЇ ЗАЛИШКОВИХ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ SLM

*Анотація. Адитивне виробництво (далі –*en.* АМ) є сучасним комплексом технологій, які дають змогу швидко та якісно створювати вироби з унікальною геометрією, яку неможливо або складно виготовити традиційними способами виробництва. Наразі дослідники приділяють увагу двом великим напрямкам, а саме системам якості АМ та пошуку нових закономірностей у вже доволі відомих матеріалах, що виготовлялися традиційним способом. Дана технологія має ряд переваг для виготовлення виробів авіаційно космічного призначення, але, як і всі технології виробництва, дана технологія має ряд недоліків та проблем. Залишкові внутрішні напруження є однією з особливостей металевих матеріалів, виготовлених шляхом пошарового сплавлення за SLM технологією, але вони можуть значно впливати на механічні властивості та геометричні параметри. Їх присутність є особливо важливою для матеріалів АМ, що неминуче призводять до значних внутрішніх напружень. У зв'язку з цим важливою є мінімізація залишкових напружень в процесі виготовлення деталей за технологією SLM. Для запобігання відхилень за геометрією деталі необхідно враховувати співвідношення між щільністю питомої енергії, що підводиться, і її поглинанням під час процесу. Однак, оптимальні технологічні параметри і стратегії побудови SLM процесу для полікристалічних матеріалів складно передбачити, оскільки якість виробу залежить від великої кількості факторів. Пошук шляхів попередньої оцінки і розробка заходів щодо зниження залишкових напружень при виготовленні деталей за технологією SLM є актуальним завданням сучасного матеріалознавства. Таким чином питання зменшення впливу внутрішніх напружень потребує фундаментального розуміння їх впливу на геометричні параметри та службові характеристики матеріалів АМ.*

Ключові слова: адитивне виробництво, залишкові внутрішні напруження, параметри, SLM технологія.

Вступ

В останні роки виробництво металевих виробів за допомогою вихідної CAD-моделі безпосередньо за електронними даними на основі пошарового виготовлення перетворилося з швидкого прототипування в АМ [1-3]. На відміну від традиційних виробничих технологій, АМ пропонує набагато більшу свободу проектування. Вперше конструкція виробів більше не сильно обмежена методом виробництва, тобто окремими деталями високої складності, наприклад

комірчастої конструкції, складна внутрішня структура або охолоджуючі канали можуть бути реалізовані без урахування конкретних правил проектування. Крім того, деталі, розроблені за допомогою комп'ютерних технологій (CAD), можуть бути піддані процедурам топологічної оптимізації [4] і реалізовані без додаткових витрат на технологічне обладнання та операції при виготовленні. Це дає безліч переваг: складна геометрія, зниження ваги, короткий час виконання замовлення, зменшення відходів, інтеграція функцій і т. д. При застосуванні технології SLM метал піддається впливу лазера, що призводить до його плавлення. Коли метал остигає, виникають напруження стиснення, які можуть призводити до зміни початкової форми (викривлення) виробу [5-8]. Будова металу деталей, виготовлених за SLM- технологією, має такі особливості, як дрібнозерниста структура, шаруватість, текстура в напрямку росту чи побудови виробу. Також такі вироби схильні до виникнення внутрішніх напружень через градієнт температур та складну геометрію, перехід від великого перерізу до малого. Наявність внутрішніх напружень може призводити до зниження міцності, корозійної стійкості, втомної міцності та стійкості до корозійного розтріскування. Тому для деталей зі сталі AISI 316L, виготовлених за SLM - технологією, необхідні дослідження для попередження утворення та зменшення залишкових напружень.

В результаті поведінки матеріалу зразків, надрукованих при різних стратегіях побудови, формуються області напружень, що розтягуються або стискаються, які можна представити у вигляді істинної діаграми розтягування (рис. 1), яка б показала відношення між подовженням і напруженням. При перевищенні границі плинності, метал демонструє пластичну поведінку, що характеризується невідновлюваною пластичною деформацією, і залежність деформації від напруження стає нелінійною.

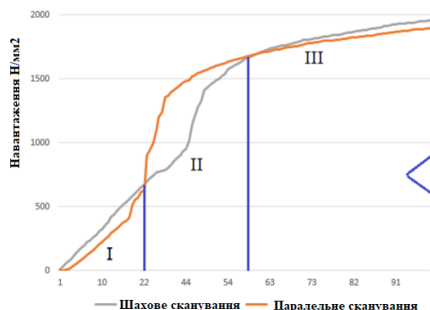


Рисунок 1 – Істинна діаграма розтягування зразків з паралельною і шаховою стратегією сканування: I – ділянка пропорційності, II – ділянка плинності, III – ділянка само зміцнення [9]

При формуванні залишкових напружень крім високих швидкостей охолодження і постійного сусідства рідкого і твердого металу в процесі побудови деталі, важливою є нерівномірність розподілу залишкових напружень, пов'язаних з геометрією: наявність виступаючих частин, переходів від товстого до тонкого перетину, гострокутних елементів та отворів.

При виготовленні деталей за технологією SLM в області контуру (краю) масивного виробу виникають напруження, які можуть призводити до утворення ряду дефектів [10]: зміни вихідної форми (викривлення) виробу [8] (рис. 2, а), утворення пор і розшарування між новим і холонучим металом через зміни його геометрії (рис. 2, б), виникнення мікротріщин (рис. 2, в), формування вираженої текстури, що призводить до зниження механічних властивостей і їх анізотропності.

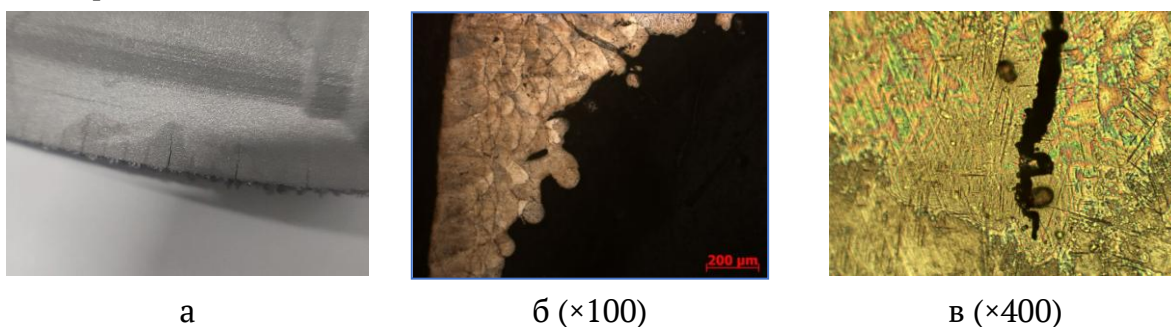


Рисунок 2 – Дефекти, що утворились через залишкові внутрішні напруження
а – викривлення, б – розшарування, в – мікротріщина

У зв'язку з цим важливою є мінімізація залишкових напружень в процесі виготовлення деталей за технологією SLM. Для запобігання відхилень за геометрією деталі необхідно враховувати співвідношення між щільністю питомої енергії, що підводиться, і її поглинанням під час процесу [11]. Однак, оптимальні технологічні параметри [12] і стратегії побудови [13] SLM -процесу для полікристалічних матеріалів складно передбачити, оскільки якість виробу залежить від великої кількості факторів. Пошук шляхів попередньої оцінки і розробка заходів щодо зниження залишкових напружень при виготовленні деталей за технологією SLM є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

Постановка мети і завдань дослідження

Систематизація шляхів мінімізації залишкових внутрішніх напружень керуванням технологічними параметрами виготовлення.

Аналіз останніх років

Якщо розглядати більш детально питання мінімізації внутрішніх залишкових напружень зі збереженням необхідного рівня механічних властивостей шляхом керування параметрами та стратегіями сканування, то існує ряд різних стратегій руху лазерного променя в шарі, який сплавляється [12] (рис. 3).

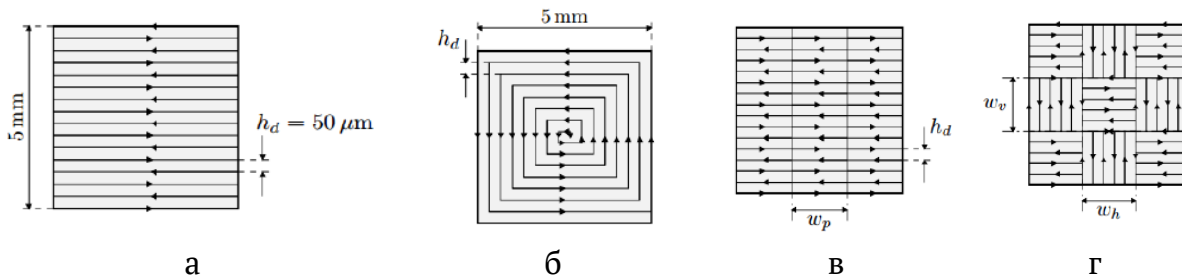


Рисунок 3 – Види стратегії сканування [12]: а – паралельне сканування, б – спіральне сканування, в – різнонаправлене паралельне сканування, г – сканування у шахівному порядку

Автори досліджень [13] змінювали напрямок сканування лазера в кожному новому шарі на певний кут щодо попереднього шару на 90° , 105° , 120° , 135° , 150° . Кращі механічні властивості були у об'єктів, отриманих при куті повороту 105° , коли шари з однаковим напрямком руху лазерного променя повторювалися тільки через 24 шари. В результаті цих досліджень авторами було встановлено, що стратегія сканування відіграє важливу роль у формуванні механічних властивостей, але питанню внутрішніх напружень увагу приділено не було.

Автори роботи [14] провели дослідження на простій фігурі (призма) з розмірами $24 \text{ мм} \times 46 \text{ мм} \times 21 \text{ мм}$, виготовленої зі сталі 316L з метою визначення розподілу внутрішніх напружень на середній висоті шляхом застосування методу рентгенівської дифракції. В рамках цих досліджень було проаналізовано 2 призми, що виготовлені з різними стратегіями сканування, а саме: стратегія спірального сканування (рис 3, б), з направленням заповнення від кордонів до центру та навпаки. В результаті даних досліджень авторами [14] було встановлено, що для двох стратегій сканування спостерігався подібний розподіл внутрішніх напружень розтягування по крайовим ділянкам та стискаючих по центру. Цей розподіл характеризується стискаючими внутрішніми напруженнями в об'ємі, які врівноважується силою внутрішніх напружень розтягування на поверхні (рис. 4).

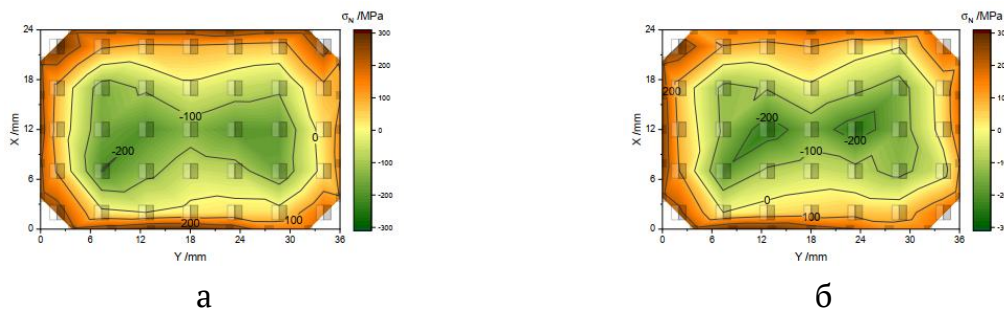


Рисунок 4 – Розподіл внутрішніх напружень в напрямлені побудови з застосуванням стратегії сканування спіральна: а – від центру до кордонів, б – від кордонів до центру [14]

При візуальній оцінці деформації (зміни геометрії зразків) в результаті дії залишкових напружень авторами [9] було відзначено, що при прямолінійному порядку друку з поворотом шарів відносно попереднього на 67° (рис.5, а) через напруження відбувається більше викривлення границі в області тонкого краю в порівнянні із зразками, побудованими при тих самих режимах, але в шаховому порядку (рис.5, б).

Мікроструктура дослідних зразків, виготовлених з різними параметрами процесу і стратегіями друку, представлена на рис. 5. Слід зазначити, що зразки не мали дефектів основного тіла (пористість, висока шорсткість). Сформована ванна розплаву основного тіла під впливом лазерного випромінювання шляхом плавлення порошкового шару і матеріалу підкладки має рівномірне проплавлення, чітко побудовані треки.



Рисунок 5 – Дослідження мікроструктури в області тонкого краю:
а – прямолінійна стратегія заливки шару,
б – заливка шару у шаховому порядку [9]

В результаті автори роботи [9] зробили висновок, що у зразках, надрукованих із стратегією побудови треків в шаховому порядку з поворотом на 67° , спостерігалось менше викривлення, ніж в зразках з прямолінійною стратегією

(рис. 3, а) друку з поворотом на 67° . В результаті було встановлено-високу кореляцію внутрішніх напружень від температурних градієнтів та стратегії сканування під час виготовлення SLM, тому це потребує подальшого систематичного дослідження.

В рамках досліджень [15] авторами було застосовано комплексний підхід для аналізу макронапружень, спричинених адитивним виробництвом, з застосуванням кореляції цифрового зображення (DIC – аналіз) [16-18] у поєднанні з видаленням і розрізом робочої пластини та неруйнівного методу, а саме дифракція нейтронами. В результаті авторами [15] було отримана хороша узгодженість між двома методами вимірювання. Щодо впливу стратегії сканування на внутрішні напруження було встановлено, що зменшення залишкових внутрішніх напружень досягалось шляхом зменшення розміру поля сканування, збільшення повороту поля до 45 градусів і збільшення прикладеної енергії на одиницю довжини (потужність/швидкість лазера).

Висновки

В результаті проведеного інформаційного аналізу було встановлено, що під час процесу виготовлення деталей за допомогою SLM фактично характерним є те, що розтягуючі внутрішні напруження розвиваються на поверхнях, які врівноважені стискаючими внутрішніми напруженнями в об'ємі. Так як дослідження проводились на зразках простої форми, то отримані результати важко співставляються з деталями виробів складної геометричної форми, що мають істотні зміни геометричних розмірів по перерізу. Але слід зазначити, що застосовані, розроблені та впроваджені параметри та стратегії сканування дозволяють врівноважити внутрішні напруження, уникаючи викривлень та руйнувань. Проте автори робіт відзначили, що найбільш підходящим методом для досягнення нейтрального напруженого стану є термічна обробка для зняття внутрішніх напружень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Vayre B., Vignat F., Villeneuve F. Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.*, 2012. **13**. P. 89–96.
2. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int. Mat. Rev.*, 2012. **57** (3). P.133–164.
3. Wong K. V., Hernandez A. A review of additive manufacturing, *ISRN Mech. Eng.* 2012. P. 1–10.

4. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. *Proc. SFF Symp. Austin Texas*. 2011. P.348–362.
5. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Вплив технологічних параметрів SLM-процесу на пористість металовиробів. *Автоматичне зварювання*. 2020. 10. С. 14-20. DOI: 10.37434/tpwj2020.10.03
6. Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskiy R. Mechanical properties of heat-resistant superalloy Inconel 718 obtained by selective laser melting and heat treatment under different load directions. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2020. 99 (3). P. 75–85.
7. Кононенко Г. А., Аджамський С. В., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Шпак Е. А. Порівняльні дослідження механічних властивостей зразків сталі 316L, виготовлених на машині ALFA-150 на відповідність світовим аналогам. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. 36. С. 370-378.
8. Аджамський С. В., Подольський Р. В., Кононенко Г. А. Дослідження впливу шорсткості на властивості зразків зі сталі AISI 316L методом реєстрації макролокалізаційних полів. *Системні технології*. 2021. 4 (135). С. 3-11. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-01>
9. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Вплив параметрів SLM-процесу на формування області кордонів деталей з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 6 (133). С. 105–114. DOI: 10.15407/knit2021.06.105
10. Parida A.K., Maity K. Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2018. 21. P. 364–370.
11. Ciales L.E., Arisoy Y.M., Lane B. et al. Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis. *Int J Mach Tools Manuf.* 2017.121. P. 22–36.
12. Wang D. Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *Int J Adv Manuf Technol.* 2012. 58. P. 1189–1199.
13. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*. 2017. 2. P.157–167.
14. Ulbricht A., Altenburg S.J., Sprengel M., Sommer K., Mohr G., Fritsch T., Mishurova T., Serrano-Munoz I., Evans A., Hofmann, M. Separation of the Formation Mechanisms of Residual Stresses in LPBF 316L. *Metals*. 2020. 10. P. 1234.

15. Wu, A.S.; Brown, D.W.; Kumar, M.; Gallegos, G.F.; King, W.E. An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel. *Metall. Mater. Trans. A*. 2014. **45**. P. 6260–6270.
16. Подольський Р. В., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Романова Н. С., Сафронова А. О., Клемешов Е. С. Застосування спеціалізованого програмного забезпечення в матеріалознавстві та термічній обробці металів та сплавів: методичний посібник. Дніпро: УДУНТ, 2022. 65 с.
17. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., Badyuk, S. Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 2022. 116p. DOI: 10.15407/978-966-00-1856-3
18. Кононенко Г. А., Аджамський С. В., Подольський Р. В., Сафронова О. А., Шпак Е. А., Дерягін А. І. Внутрішні залишкові напруження в адитивному виробництві. (Огляд). *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. **37**. С. 434–446. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-434-446>

REFERENCES

1. Vayre B., Vignat F., Villeneuve F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.*. **13**. P. 89–96.
2. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *Int. Mat. Rev.* **57** (3). P.133–164.
3. Wong K. V., Hernandez A. (2012). A review of additive manufacturing, *ISRN Mech. Eng.* P. 1–10.
4. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. (2011). Topology optimization for additive manufacturing. *Proc. SFF Symp. Austin Texas*. P.348–362.
5. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskyi R.V. (2020). Influence of technological parameters of SLM-process on porosity of metal products. *The paton welding journal*. **10**. p.13–19. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.10.03>
6. Adjamskiy S., Kononenko G., Podolskyi R. Mechanical properties of heat-resistant superalloy Inconel 718 obtained by selective laser melting and heat treatment under different load directions. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2020. **99** (3). P. 75–85. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.03
7. Kononenko G. A., Adzhamskiy S. V., Podolskiy R. V., Safronova O. A., Shpak E. A. (2022). Porivnyalni doslidzhennya mehanichnih vlastivostej zrazkiv stali 316L, виготовлених на машині Alfa-150 на відповідність світовим аналогам [in Ukrainian]. *Fundamentalni ta prikladni problemi chornoyi metalurgiyi*, **36**. 370–378. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-370-378>

8. Adzhamskij S. V., Podolskij R. V., Kononenko G. A. (2021). Doslidzhennya vplivu shorstkosti na vlastivosti zrazkiv zi stali AISI 316L metodom reyestratsiyi makrolokalizacijnih poliv [in Ukrainian]. *Sistemni tehnologiyi*, 4 (135), 3-11. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-135-2021-01>
9. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskyi R.V. Influence of SLM-process parameters on the formation of the boundaries of parts of heat-resistant nickel alloy INCONEL 718. *Space Science and Technology*. 2021. 27, 6. c. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>
10. Parida A.K., Maity K. (2018). Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 21. P. 364–370.
11. Ciales L.E., Arisoy Y.M., Lane B. (2017). Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis. *Int J Mach Tools Manuf.* 121. P. 22–36.
12. Wang D. (2012). Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *Int J Adv Manuf Technol*. 58. P. 1189–1199.
13. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C. (2017). Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*. 2. P.157–167.
17. Adjamskiy,S., Kononenko,G., Podolskyi,R., Badyuk,S. (2022). Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 116p. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
18. Kononenko G. A., Adzhamskij S. V., Podolskij R. V., Safronova O. A., Shpak E. A., Deryagin A. I. (2023). Vnutrishni zalishkovi napruzhennya v aditivnomu virobnictvi. (Oglyad) [in Ukrainian]. *Fundamentalni ta prikladni problemi chornoyi metalurgiyi*. 37. S. 434-446. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-434-446>

Received 01.04.2024.

Accepted 02.04.2024.

Analysis of technological methods of minimizing residual internal stresses at slm

Additive manufacturing (hereinafter – en. AM) is a modern set of technologies that make it possible to quickly and qualitatively create products with a unique geometry that are impossible or difficult to produce by traditional production methods. Currently, researchers pay attention to two major areas, namely AM quality systems and the search for new regularities in already well-known materials that were produced in a traditional way. This technology has a number of advantages for the manufacture of aerospace products, but, like all production technologies, this technology has a number of disadvantages and problems. Residual internal stresses are one of the features of metal mate-

rials produced by layer-by-layer fusion using SLM technology, but they can significantly affect mechanical properties and geometric parameters. Their presence is especially important for AM materials, which inevitably lead to significant internal stresses. In this regard, it is important to minimize residual stresses in the process of manufacturing parts using SLM technology. To prevent deviations in the geometry of the part, it is necessary to take into account the ratio between the density of the specific energy supplied and its absorption during the process. However, it is difficult to predict the optimal technological parameters and strategies for building the SLM process for polycrystalline materials, since the quality of the product depends on a large number of factors. The search for ways of preliminary assessment and the development of measures to reduce residual stresses in the manufacture of parts using SLM technology is an urgent task of modern materials science. Thus, the issue of reducing the influence of internal stresses requires a fundamental understanding of their influence on the geometric parameters and service characteristics of AM materials..

Keywords: additive manufacturing, residual internal stresses, parameters, SLM technology.

Аджамський Сергій Вікторович – доктор філософії, головний конструктор ТОВ «Адитивні лазерні технології України», старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна.

Кононенко Анна Андріївна - докт. техн. наук, ст. досл., вчений секретар Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

Подольський Ростислав Вячеславович – доктор філософії, науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Дніпро, Україна.

Adjamskiy Sergey – PhD, chief designer of Additive Laser Technology of Ukraine LLC, senior researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

Kononenko Ganna - Doct. technical science, sen. researcher, scientific secretary of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

Podolskyi Rostislav - PhD, researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

С.С. Василів, О.Л. Токарева

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА З ЕЛЕКТРОПРОВІДНИМИ ПРОДУКТАМИ РЕАКЦІЇ В ПРИЛАДІ ПОСТІЙНОГО ТИСКУ

Анотація. Актуальність тематики даної роботи визначається необхідністю створення науково інформаційної бази процесу горіння твердих ракетних палив, що розробляються для перспективних ракетних двигунів. Мета роботи – розробка методики визначення швидкості горіння твердого ракетного палива з мінімальними похибками, обумовленими надлишковим утворенням електропровідних продуктів реакції в експериментальному приладі. Розроблено експериментальну методику вимірювання швидкості горіння твердого ракетного палива з електропровідними продуктами реакції в приладі постійного тиску (бомбі Кроуфорда). Відпрацювання методики проведено на зразках твердопаливних композицій на основі нітрату калію. Методика може бути використана при визначенні швидкості горіння високоенергетичних матеріалів з надлишковим утворенням електропровідних продуктів реакції в експериментальних приладах постійного тиску.

Ключові слова: тверде паливо, швидкість горіння, електропровідність, експериментальна методика.

Постановка проблеми. Одне з головних завдань проведення експериментальних досліджень полягає у створенні науково-інформаційної бази характеристик процесу горіння твердих ракетних палив (ТРП), що розробляються, для проектування та розробки енергосилових установок і технологічних процесів. Основними характеристиками горіння таких твердих палив стосовно енергосилових установок є залежність лінійної швидкості горіння від тиску, визначення показника ступеню в законі швидкості горіння, одиничний імпульс, рівний приросту величини тяги, що реалізується при згорянні одиниці маси палива, а також склад і характеристики конденсованих продуктів.

Швидкість горіння – основна балістична характеристика твердого палива, необхідна під час проектування двигуна. Вона залежить від багатьох факторів, зокрема тиску в камері згорання, початкової температури заряду, швидкості обдуву поверхні газом. Для проектування необхідно знати залежність швидкості горіння палива від тиску. Для цього в дослідках здійснюють спалювання ма-

лих зразків палива, або досліджують роботу невеликих двигунів при декількох відносно постійних значеннях тиску. При розробці сучасних ракетних рухових установок на основі ТРП велике значення має створення діагностичних комплексів для дослідження процесів горіння ТРП у стаціонарних та нестаціонарних режимах в широкому діапазоні параметрів.

На сьогодні теоретичні моделі не дозволяють розраховувати швидкість горіння з необхідною точністю через те, що відсутнє детальне розуміння механізмів фізико-хімічних процесів, що відбуваються в зоні реакцій. Експериментальні методи дозволяють порівняно просто отримувати необхідні дані в стаціонарному режимі, проте вимірювання в нестаціонарних умовах проводити набагато складніше. Експериментальні дані щодо залежності швидкості стаціонарного горіння від тиску і початкової температури палива використовуються для ідентифікації нестаціонарної швидкості горіння при розробці непрямих методів вимірювання нестаціонарної швидкості горіння ТРП (методи зворотних завдань внутрішньої балістики) [1].

Мета дослідження – розробка експериментальної методики визначення швидкості горіння твердого ракетного палива без похибок, обумовлених надлишковим утворенням електропровідних продуктів реакції в приладі постійного тиску.

Для вивчення закономірностей нормального горіння твердих палив використовується бомба постійного тиску (БПТ) [2]. За допомогою БПТ можна визначити швидкість горіння при різних постійних тисках, залежність процесу горіння від початкової температури, склад продуктів горіння залежно від тиску та профіль температур у зоні горіння. БПТ також може використовуватись для дослідження процесів детонації ТРП. Цей пристрій відомий також під назвою «бомба Кроуфорда».

Для спостереження за ходом горіння та визначення його швидкості використовують різні способи [3-7]. В даний час відомі способи визначення швидкості горіння ТРП з реєстрацією переміщення поверхні горіння методами кіно-або відеозйомки процесу горіння палива, з використанням мікрохвильової техніки, світлореєстраторів, вимірювання ємності або електропровідності продуктів згоряння, а також теоретичні способи визначення швидкості тиску, отриманої при випробуваннях ракетних двигунів, від часу [2].

Всі ці методи мають низку недоліків, одним із головних є недосконалість систем реєстрації переміщення фронту горіння – основного показника для розрахунку швидкості горіння. Недоліком мікрохвильового НВЧ-методу є помил-

ка визначення швидкості горіння, обумовлена невизначеністю діелектричної проникності різних ТРП.

Під час проведення експериментів використовувався спосіб визначення швидкості горіння ТРП з використанням плавких електричних дротяних сигналізаторів. При проходженні фронту горіння через ці сигналізатори вони плавляться і перегорають, що супроводжується стрибкоподібним зростанням опору електричного ланцюга сигналізаторів. Ці моменти фіксуються системою реєстрації. Як правило, через заздалегідь просвердлені отвори в броньованому зразку палива пропускаються тонкі дроти. Кінці дротів, що проходять через верхній отвір, кріпляться до контактних. Контактна пробка вставляється в бомбу і притискається кришкою, що обтулюється. До відповідних контактів приєднуються дроти запалу та дроти, що йдуть до реле, які включають та вимикають електросекундомір. Електрична схема визначення швидкості горіння представлена на рис. 1.

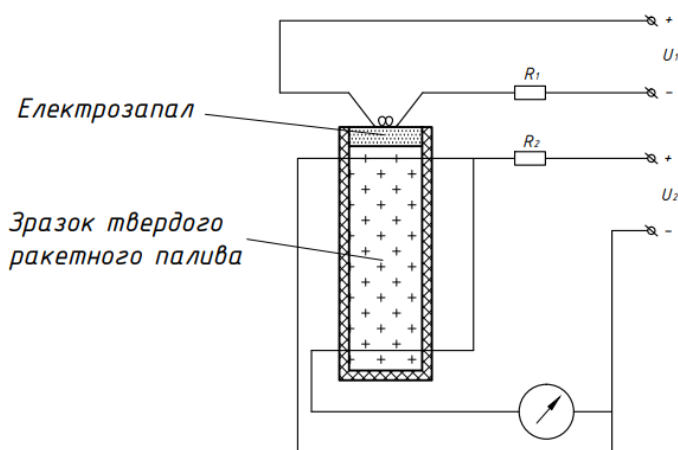


Рисунок 1 – Електрична схема для вимірювання швидкості горіння методом електричних дротяних сигналізаторів

При ввімкненні напруги U_1 нагрівається тонкий провідник і електрозапал підпалює зразок. Струм у вимірювальному колі протікає через резистор R_2 і верхній дріт. При наближенні фронту полум'я, верхній дріт перегорає і тоді струм протікає через резистор і електросекундомір, який починає відлік часу. При перегоранні нижнього дроту, коло розмикається і електросекундомір закінчує відлік часу.

Швидкість горіння визначається із співвідношення:

$$u = \frac{L_0}{t_2 - t_1},$$

де L_0 – відстань між сигналізаторами або база (довжина контрольної ділянки зразка, на якій визначається швидкість горіння); t_1 і t_2 – моменти часу, що відповідають перегоранню першого та другого сигналізаторів. Але у випадку значної провідності продуктів горіння такий метод вимірювання має значні похибки, або навіть перестає працювати.

Випробування зразків твердого ракетного палива проводилося в зробленій на експериментальній базі Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України бомбі постійного тиску. Принцип її роботи полягає, як вже було описано вище, в торцевому горінні зразка, броньованому по боковій поверхні, і перепалюванні провідників, розміщених на відомій відстані. При цьому через провідники тече струм і реєструється зміна їх провідності при проходженні фронту горіння. Об'єм бомби заповнюється інертним газом (зазвичай азотом), а необхідний тиск підтримується дренажним клапаном. Схема установки показана на рис. 2. Пневмогідросхема установки (рис. 3) забезпечує наддув бомби, підтримку тиску на заданому рівні та дренаж газів з установки.

Для комп'ютерної фіксації даних використовувався аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) Е14-440-М з максимальною частотою реєстрації 400 кГц, з 16 диференційними каналами (32 зі спільною землею).

Проведені експериментальні дослідження швидкості горіння зразків твердого ракетного палива виявили ряд недоліків, що призводять до спотворення даних. Так, в процесі проведення випробувань виявилось, що при горінні зразка палива виділяється велика кількість сажоподібних продуктів реакції на внутрішній броньованій оболонці експериментального приладу. Їх провідність достатня для протікання струму, який фіксується аналого-цифровим перетворювачем. Таким чином, не можливо визначити мітку часу початку, чи кінця горіння базової відстані.



Рисунок 2 – Бомба постійного тиску

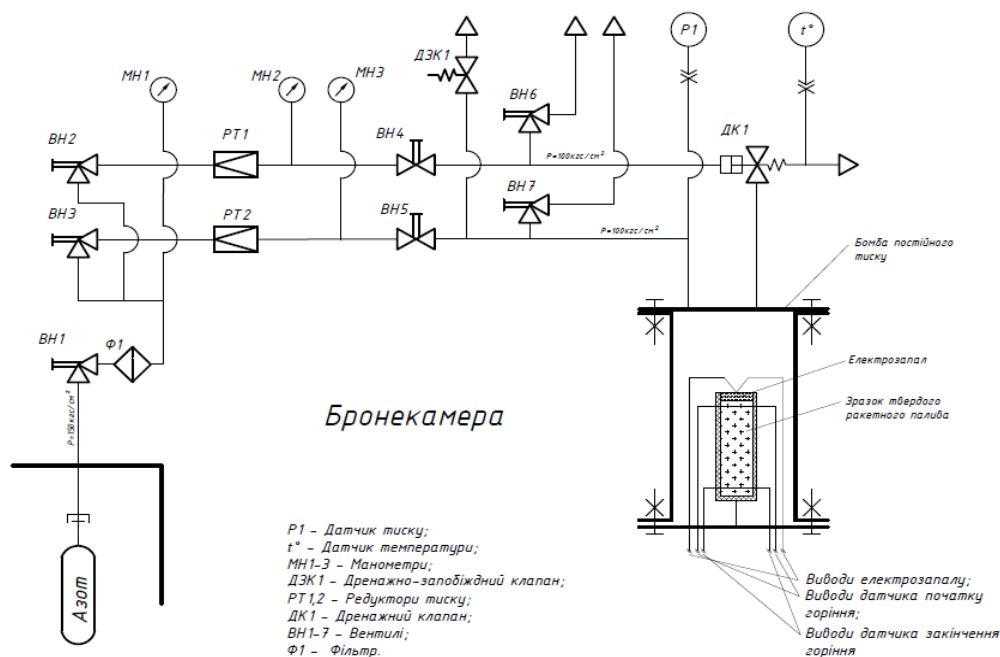
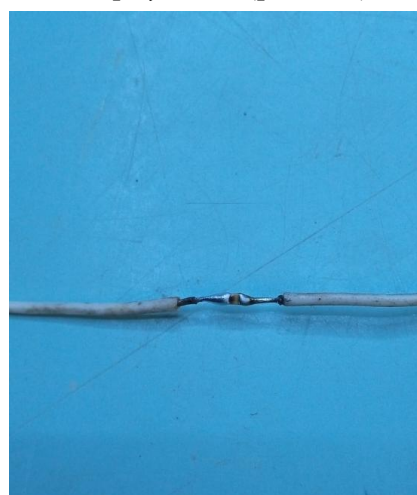


Рисунок 3 – Пневмогідравлічна схема бомби постійного тиску

Для вирішення цієї проблеми було розроблено та втілено технічне рішення. Для цього виготовлено спеціальний прилад (рис. 4 а), який являє собою здвоєний генератор (принципова схема показана на рис. 5), в коливальні контури якого підключалися конденсатори стандарту SMD (рис.4 б).



а)



б)

Рисунок 4 – Здвоєний генератор а), та датчики, виготовлені на основі конденсаторів б) стандарту SMD

Така конструкція вклеюється замість провідників у зразки.

Принцип роботи такого рішення наступний. На виходах генератора формується сигнал у вигляді прямокутних імпульсів. При перепалюванні конден-

саторів не важливо, чи проводять струм продукти горіння, чи залишки зразка палива. Конденсатор виходить з ладу, генератор перестає працювати, а АЦП реєструє вже не імпульси, а постійний струм або його відсутність. Реєстрація АЦП постійного струму використовується як мітка часу завершення експерименту.

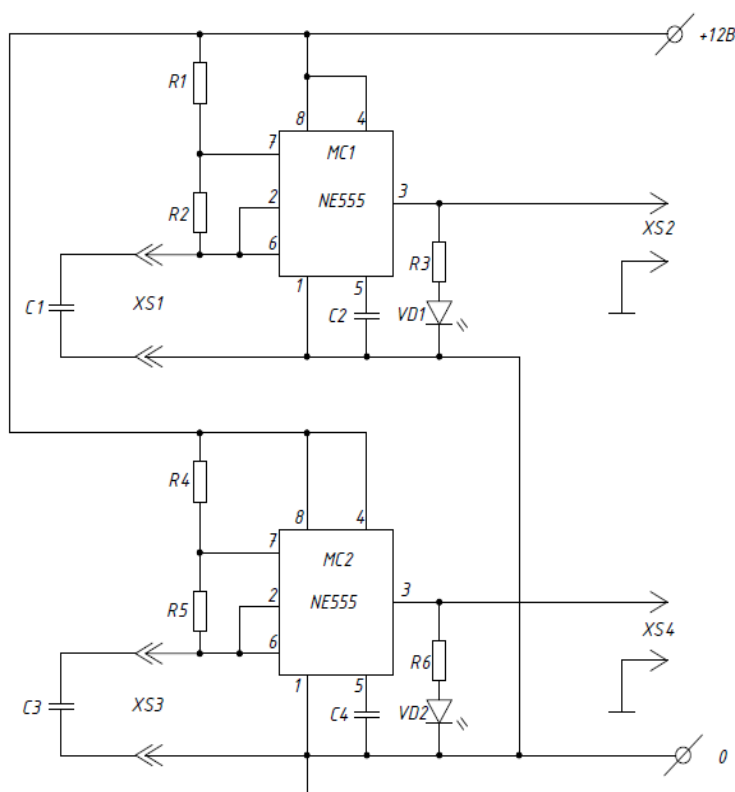


Рисунок 5 – Електрична принципова схема здвоєного генератора

Експериментальну методику відпрацьовано на зразках твердопаливних композицій на основі нітрату калію. Під час проведення експериментів АЦП працював на частоті 20 кГц, тому точність вимірювання часу складає половину від періоду коливань, тобто $\pm 0,0005$ с.

Висновки. Розроблено експериментальну методику вимірювання швидкості горіння зразків твердого палива в бомбі постійного тиску з метою визначення закону швидкості горіння продуктів згоряння твердопаливних композицій. У процесі досліджень розроблено та впроваджено технічне рішення, яке дозволило знизити величину похибки вимірювання, обумовленої надлишковим утворенням електропровідних продуктів реакції в приладі постійного тиску.

Експериментальна методика відпрацьована на зразках твердопаливних композицій на основі нітрату калію та може використовуватися при визначенні швидкості горіння твердих високоенергетичних матеріалів з надлишковим утворенням електропровідних продуктів реакції в експериментальних приладах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основи теорії та проектування РДТП / Габрінець В.О., Горбенко Г.А., Гумницький В.П., Джур Є.О., Кучма Л.Д., Пронь Л.В. – Дніпропетровськ : АРТ-ПРЕС, 2004. – 200 с.
2. J.M. Munoz Tejada, Nicolas de Jong, Guillermo Reales Gutierrez, David Moreno Lopez, Maria Gonzalez Rodriguez, Javier Revilla Veleda. Literature studies and experimental characterization of multiple solid propellant regression rates using Crawford bomb method / 71th International Astronautical Congress. 2020. – 9 p.
3. Gupta G., Jawale L., Mehilal, Bhattacharya B. Various methods for the determination of the burning rates of solid propellants - an overview // Central European Journal of Energetic Materials. – 2015. – 12(3). – P.593 – 620.
4. Zarko V.E. and Kuo K.K. Critical review of methods for regression rate measurements of condensed phase systems // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 1994. – Vol. 3, № 1-6. – P. 600 – 623.
5. Strand L.D., Magiawala K.R., and McNamara R. P. Microwave measurement of solid-propellant pressure-coupled response function // J. Spacecraft. – 1980. – Vol. 17, № 6. P. 483 – 488.
6. Foss D.T., Roby R.J., and O'Brien W. F. Development of dual-frequency microwave burn-rate measurement system for solid rocket propellant // J. Propulsion and Power. 1993. V. 9, N 4.
7. Gaurav Marothiya, Ramakrishna Periyapatna. Effect of mechanical activation of high specific surface area aluminium with PTFE on composite solid propellant // Combustion and Flame. – 2016. – Vol. 166. – P. 203 – 215.

REFERENCES

1. Fundamentals of the theory and design of RDTP / Gabrynets V.O., Horbenko G.A., Humnytskyi V.P., Jur E.O., Kuchma L.D., Pron L.V. – Dnipropetrovsk : ART-PRESS, 2004. – 200 p.
2. J.M. Munoz Tejada, Nicolas de Jong, Guillermo Reales Gutierrez, David Moreno Lopez, Maria Gonzalez Rodriguez, Javier Revilla Veleda. Literature studies and experimental characterization of multiple solid propellant regression rates using Crawford bomb method / 71th International Astronautical Congress. 2020. – 9 p.

3. Gupta G., Jawale L., Mehilal, Bhattacharya B. Various methods for the determination of the burning rates of solid propellants - an overview // Central European Journal of Energetic Materials. – 2015. – 12(3). – P.593 – 620.
4. Zarko V.E. and Kuo K.K. Critical review of methods for regression rate measurements of condensed phase systems // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. – 1994. – Vol. 3, № 1-6. – P. 600 – 623.
5. Strand L. D., Magiawala K. R., and McNamara R. P. Microwave measurement of solid-propellant pressure-coupled response function // J. Spacecraft. – 1980. – Vol. 17, № 6. P. 483 – 488.
6. Foss D.T., Roby R.J., and O'Brien W. F. Development of dual-frequency microwave burn-rate measurement system for solid rocket propellant // J. Propulsion and Power. 1993. V. 9, N 4.
7. Gaurav Marothiya, Ramakrishna Periyapatna. Effect of mechanical activation of high specific surface area aluminium with PTFE on composite solid propellant // Combustion and Flame. – 2016. – Vol. 166. – P. 203 – 215.

Received 03.04.2024.

Accepted 05.04.2024.

Experimental technique for determining the burning rate of solid rocket fuel with electrically conductive reaction products in a constant pressure device

One of the main tasks of conducting experimental research is the creation of a scientific and informational database of the characteristics of the burning process of solid rocket fuels (SRP), which are being developed for the design and development of power plants and technological processes. The main combustion characteristics of such solid fuels in relation to power plants are the dependence of the linear combustion speed on pressure, the determination of the degree index in the combustion speed law, a unit impulse equal to the increase in the amount of traction realized during the combustion of a unit mass of fuel, as well as the composition and characteristics of condensed products.

Today, theoretical models do not allow calculating the burning rate with the necessary accuracy due to the lack of a detailed understanding of the mechanisms of physical and chemical processes occurring in the reaction zone. Experimental methods make it relatively easy to obtain the necessary data in a stationary mode, but it is much more difficult to carry out measurements in non-stationary conditions. Experimental data on the dependence of the steady-state burning rate on the pressure and initial temperature of the fuel are used to identify the non-stationary burning rate in the development of indirect methods for measuring the non-stationary burning rate of TRP (inverse internal ballistics methods) [1].

The purpose of the research is to develop an experimental method for determining the burning rate of solid rocket fuel without errors due to the excessive formation of electrically conductive reaction products in a constant pressure device. To study the regularities of normal combustion of solid fuels, a constant pressure bomb (CPB) is used [2].

An experimental technique for measuring the burning rate of solid fuel samples in a constant pressure bomb was developed in order to determine the burning rate law of the combustion products of solid fuel compositions. In the process of research, a technical solution was developed and implemented, which made it possible to reduce the amount of measurement error due to the excessive formation of electrically conductive reaction products in the constant pressure device. The experimental technique was developed on samples of solid fuel compositions based on potassium nitrate and can be used to determine the burning rate of solid high-energy materials with excess formation of electrically conductive reaction products in experimental devices.

Key words: solid fuel, burning rate, electrical conductivity, experimental technique.

Василів Степан Степанович – старший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України, к.т.н.

Токарева Олена Леонідівна – молодший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

Vasiliv Stepan Stepanovych – senior researcher, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, PhD.

Tokareva Olena Leonidivna – junior researcher, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ПРИРОДНОЇ МОВИ AMAZON LEX V2

Анотація. У сучасних реаліях все більше використовуються системи з розпізнаванням тексту та голосу, бо процес взаємодії з людиною все більше автоматизується. Технологія розпізнавання людської мови є фундаментальним для розвитку штучного інтелекту. Системи, які побудовані на цій технології, мають можливість вирішувати досить велику кількість задач, пов'язаних з аналізом даних, пошуку інформації, виконанням запитів користувачів. Популярними і досить поширеними рішеннями систем з NLP (Natural Language Processing) є голосові помічники, системи розумного дому (такі як Amazon Alexa чи Google Assistant). Дослідження цієї технології та аналіз її інтеграції в хмарних середовищах надає можливість самостійно використати її особливості у якості автоматизованих ад'ютантів, чи наприклад, як частину вже існуючої інтелектуальної системи.

NLP ядро сервісу Amazon Lex V2 надає можливість розгорнути власноручно налаштований чат бот на задану тему, тому з точки зору розробки та дослідження він привертає увагу розробників та аналітиків. Але, перед цим, постає багато питань щодо його можливостей та обмежень, перед якими зіткнеться інтегратор цієї служби.

Ключові слова: Amazon Lex, Amazon Web Services, природня мова, штучний інтелект, розпізнавання, чат бот

Постановка проблеми. Останнім часом приділяється велика увага впровадженню різних типів голосових помічників в бізнесі та медіа. Ця технологія дуже актуальна та швидко розвивається, але існує велика кількість різних рішень для побудови власного чат-боту, тому серед всіх сервісів зі ШІ (штучним інтелектом), який розпізнає природню мову, вибрано саме Amazon Lex V2. Цей сервіс ґрунтується на чат-ботах, які підтримують NLU (Natural Language Understanding) та розпізнавання голосу. Оскільки Amazon Lex є частиною Amazon Web Services, то інші сервіси з цього середовища надають можливість розгорнути готовий додаток одразу в хмарі, що автоматично робить його частиною безсерверної архітектури.

Дослідження Lex та алгоритму його роботи надає можливість визначитись з загальною логікою функціонування подібних сервісів, проаналізувати якість розпізнавання тексту та голосового вводу, доцільність його застосування у програмних рішеннях різного типу, наприклад, банківський помічник.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Документація Lex V2 від Amazon містить вичерпну кількість інформації щодо логіки роботи та інтеграції бота, але найбільше питань викликає саме його ефективність поміж інших ШІ. Серед останніх публікацій, стаття на американському порталі Medium [1] представляє таке поняття, як матриця розмовних ШІ, де описано загальний рейтинг комерційних систем розпізнавання природної мови (див. рис. 1).

↑ Exceptional ↗ Good → Average ↘ Poor									
Chatbot Offerings Rating Matrix	NLU		Graphic Dialog Node Management	Native Code Dialog Node Management	Machine Learning	Hosting	Cost	NLU API Capability	Enterprise Ready Scaling
	Intents	Entities							
IBM Watson Assistant	↗	↗	↑	↗	↗	Commercial Cloud	→	↗	↑
Amazon Lex	↗	↗	↘	↑	↗	Commercial Cloud	↗	↗	↗
Microsoft Azure LUIS Bot Framework Composer / Emulator	↗	↑	↗	↑	↗	Commercial Cloud	↗	↗	↑
Microsoft Power Virtual Agent	→	→	↗	↗	→	Commercial Cloud	↘	↘	→
Rasa	↑	↗	↑	ML Approach	↑	Install Anywhere	Open Source	↑	↑
Cisco MindMeld	↗	↗	↘	↗	↗	Install Anywhere	Open Source	↗	→
Google DialogFlow ES	↗	↗	→	↑	↗	Commercial Cloud	↗	↗	↗
Google DialogFlow CX	↗	↗	↑	↘	↗	Commercial Cloud	↘	↗	↗
NVIDIA Jarvis	↑	↑	↘	↘	↑	Install Anywhere	Dedicated Hardware	↗	↑

Рисунок 1 – Матриця рейтингу розмовних ШІ

Зазначається, що не дивлячись на перевагу Lex у розумінні природної мови, виконанні користувацького коду, та машинному навчанні, є певні недоліки, пов'язані з прив'язкою сервісу до конкретної хмарної інфраструктури – Amazon Web Services. Хмарне середовище Amazon безумовно надає дуже зручні інструменти для розробки та інтеграції з іншими сервісами, але на цьому все і обмежується, як зазначає автор статті. Так, з цим можна погодитись, але перевага цього середовища нівелює всі обмеження.

Серед значних недоліків приведена мала функціональність візуального конструктора чат-бота, але, слід зазначити, що це не зовсім так. Безумовно, порівнюючи з Google DialogFlow, конструктор дійсно має невелику кількість функціоналу, але він все ж таки є, та активно розвивається, особливо в версії V2 (поточній версії Lex).

Як висновок публікації, акцент робиться на обмеженому спектрі використання Lex V2, наприклад, для колл-центру чи в якості консультанта.

Ще одна стаття на ресурсі для розробників dev.to розкриває обмеження лінгвістичного ядра Lex [2]. Сервіс Amazon порівнюється з такими гігантами як ChatGPT чи інші реалізації з інтеграцією OpenAI.

Автор публікації зазначає, що основна проблема Lex обмеженість використання намірів, оскільки під кожен намір повинно бути щонайменше 100 висловлювань, а то і більше, щоб покрити всі можливі варіанти питань від користувачів. Банальна перестановка слів впливає на те, який намір буде використано, що також є проблемою. Тобто, для нормальної якості розпізнавання потрібно пропрацювати велику кількість варіантів відповідь-питання, щоб охопити всі можливі гілки спілкування.

Мета дослідження: об'єкт та предмет дослідження. Метою дослідження є чат-бот Amazon Lex V2 і тестування механізму розпізнавання природної мови. По результатах тестування проводиться аналіз і висновки щодо плюсів та мінусів цієї платформи, доцільності її застосування. Предметом дослідження є Lex V2 та хмарне середовище Amazon Web Services.

Викладення основного матеріалу дослідження. Основні дослідження проводяться у розрізі точності розпізнавання NLP ядра Lex. Послідовність підготовки до тестування наступна:

1. Створюється чат-бот на певну тематику. Наприклад, банківський помічник;
2. Чат-бот заповнюється певною кількістю намірів (темами для розмови). Ці наміри описуються приблизними висловлюваннями, які можуть згенерувати користувачі. Наприклад, поточний курс валют;
3. Через обмеженість можливостей сервісу, основною мовою взаємодії є англійська;
4. Налаштовується Lambda функція (користувацький код), який буде виконуватися ботом під час виконання певних умов.

Після цього короткого списку бот можна тестувати (див. рис. 2).

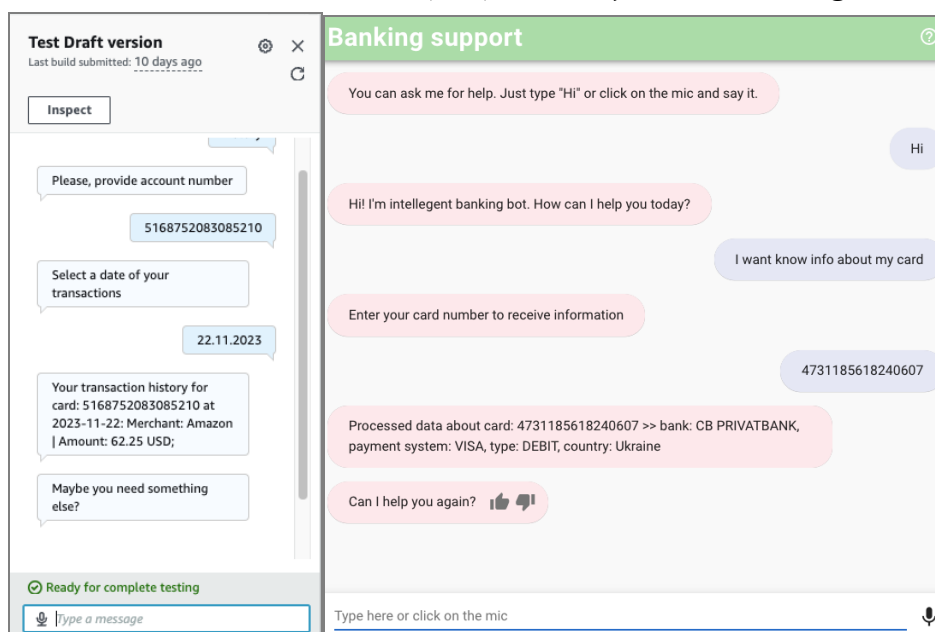


Рисунок 2 – Приклад тестування намірів

Під час обробки кожного запиту від користувача, для ініціалізації якогось наміру, ядро Lex формує список інтерпретацій цього наміру, щоб виставити оцінку достовірності. Намір з найвищою оцінкою (від 0 до 1), найімовірніше, є вірним. Потрібно використовувати показники впевненості для створення тестових сетів, які визначають, чи впливають зміни висловлювань намірів на поведінку бота. Наприклад, отримати показники впевненості для намірів бота, використовуючи набір висловлювань, а потім оновлювати наміри новими висловлюваннями. Потім перевірити показники надійності, щоб побачити, чи відбулося покращення.

Показники достовірності, які повертає Lex, є порівняльними значеннями. Не варто покладатися на них як на абсолютну оцінку. Значення можуть змінюватися залежно від удосконалень бота.

Amazon Lex повертає найімовірніший намір і до 4 альтернативних намірів із відповідними балами в структурі інтерпретацій у кожній відповіді.

За допомогою інструменту Test Workbench створюється тест сет для автоматизації тестування під кожен намір. Якщо проводити в середньому до 10 тестових запусків під кожен намір (під час дослідження їх 6), в якому до 5 висловлювань для розпізнавання, то можна отримати наступний результат: точність розпізнавання текстового вводу від 60% до 99%, голосовий ввід гірше в середньому на 10%, все залежить від чіткості та рівня вимови англійської того, хто робить запит.

Результати дослідження чат-бота

		Оцінка достовірності									
Назва наміру	Тип	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Курси валют	Текст	0,97	0,97	0,96	1	0,55	0,96	0,78	0,91	0,62	0,86
	Голос	0,94	0,96	0,94	1	0	0,96	0,79	0,91	0,62	0,73
Клієнтські дані	Текст	0,82	0,94	0	0,93	0,9	0,85	0,75	0,55	0,92	0,93
	Голос	0,86	0,76	0	0,79	0,81	0,78	0,75	0,54	0,77	0,9
Історія транзакцій	Текст	0,83	0,7	1	0,93	0,73	0,62	0,89	0,79	0,9	0,84
	Голос	0,73	0,7	0,94	0,79	0,51	0,59	0,89	0,61	1	0,83
Перевірка карти	Текст	1	0,91	1	1	0,95	1	1	0,91	0,76	0,64
	Голос	1	0,84	1	1	0,94	0,98	1	0,89	0,74	0,58
Банківська підтримка	Текст	1	1	0,98	1	1	0,72	0,92	0	0,79	0,91
	Голос	1	1	0,92	0,98	0,94	0,65	0,88	0	0,63	0,61
Баланс карти	Текст	0,96	1	0,96	0,95	0,89	1	0,88	0,62	0,84	0,56
	Голос	0,9	1	0,92	0,93	0,8	0,89	0,82	0,42	0,56	0,6

Отримані результати наводять на певні недоліки сервісу:

1. Для більшої точності потрібно більше висловлювань. Оскільки на кожен намір створено по п'ять прикладів висловлювань, які може ввести користувач, точність розпізнавання не така висока, а в деяких випадках, коли немає ключових слів – нульова. Оскільки, кількість висловлювань обмежена в 100 одиниць, це може викликати проблеми при створенні більш складного бота;

2. Голосовий ввід працює гірше. За результатами видно, що тести з участю голосового вводу мають нижчу оцінку достовірності, навіть, коли бот розпізнавав текст з високої точністю. Це пояснюється тим, що інтерпретація голосу в текст не враховує табуляцію (в випадках коли висловлювання співпадає з тестовим вводом), Також на оцінку впливає акцент, оскільки бот інтерпретує деякий ввід зовсім по іншому, ніж говорив користувач.

Інші, більш глобальні проблеми, починаються з обмежень, які AWS Lex NLP Engine накладає на кожного окремого бота. Хоча до порогу обмежень під час тестування не дійшло, але механізм Amazon NLP дозволяє лише 100 намірів на бота, що означає, що бот може обробляти лише 100 різних запитань. Але хіба 100 намірів є достатньою кількістю коли йде мова про enterprise додаток?

Перша проблема полягає в тому, що обмеження в 100 намірів також включає допоміжні (службові) теми, які роблять розмову менш схожою на роботизовану. Щоб зробити розмовних ботів більш схожими на людей, їм також потрібно обробляти такі речі, як привітання та невеликі розмови, тобто мати можливість відповідати на фрази на зразок “як ти сьогодні?”, “котра година?”, “яка погода?” “хто тебе створив?”.

Звичайна розмова займає 20, 30 і навіть 50 намірів, оскільки розробники намагаються врахувати всі речі, про які користувачі запитують цифрових помічників зі штучним інтелектом. І вони часто скаржаться на досвід, якщо чат-бот не може впоратися з цими простими фразами.

Друге питання полягає в тому, що з більш складними бізнес-процесами, такими як обробка замовлення, керування відшкодуванням або вирішення скарги, кількість перестановок навколо того, що клієнт може запитати або з чим може бути пов’язаний процес, часто поглинає багато намірів. Це ще більше зменшує кількість придатних намірів, оскільки розробник враховує перестановки та складність.

Можливо, треба вважати, що насправді, відповідь криється в архітектурі. Якщо потрібно 700 намірів, щоб створити бота, який зможе надати гарний досвід, тоді необхідно принаймні 7 ботів Lex, які працюють разом і кожен обробляє різні частини розмови. Обійти це обмеження можна за допомогою Lex Network of Bots (мережа ботів).

Мережа ботів дозволяє забезпечувати уніфікований досвід роботи для кількох ботів. Завдяки Network of Bots надається можливість додавати кілька ботів до однієї мережі, щоб забезпечити гнучке й незалежне керування життєвим циклом ботів. Мережа надає кінцевому користувачеві єдиний уніфікований інтерфейс і направляє запит до відповідного бота на основі введених користувачем даних [3].

Висновки. На підставі зробленого дослідження можна зробити висновок, що не дивлячись на велику кількість функціоналу, Amazon Lex все ж таки є обмеженим в певних аспектах, наприклад, в лінгвістичному. Він підтримує досить невелику кількість мов. Цю проблему можна вирішити, навчивши власного бота з нуля завдяки іншим сервісам Amazon. Також постає питання в обмеженості намірів.

Незважаючи на те, що обмеження намірів відрізняються залежно від двигунів NLP, деякі з них мають більшу потужність, ніж AWS NLP, переваги використання оркестратора (Network of Bots) все ще діють. Легше створювати

складні розмовні рішення штучного інтелекту, розбиваючи проблему на різні теми, якими можуть керувати експерти з предметної галузі та швидко підтримувати та оновлювати за допомогою архітектури типу мікросервісів. Цей підхід також дозволяє змішувати та поєднувати механізми NLP для вирішення інших обмежень, як підтримка природної мови або заповнення слотів (даних, які вводять користувачі).

Наявність гнучкої архітектури з кількома ботами, яка дозволяє поєднувати найкращі розмовні рішення III, відкриває багато можливостей щодо того, як і де можна розгорнути цю технологію.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. A Critical Assessment Of The Gartner® Magic Quadrant™ for Conversational AI Platforms. URL: <https://cobusgreyling.medium.com/a-critical-assessment-of-the-gartner-magic-quadrant-for-conversational-ai-platforms-6ac538b5fc8c> (дата звернення: 04.02.2024).
2. From Amazon Lex to GPT-4: How to make a bot with your own data? URL: https://dev.to/vladimir_mvs/from-amazon-lex-to-gpt-4-how-to-make-a-bot-with-your-own-data-3cih (дата звернення: 04.02.2024).
3. Creating a network of bots for Amazon Lex V2. URL: <https://docs.aws.amazon.com/lexv2/latest/dg/network-of-bots.html> (дата звернення 04.02.2024).

Received 03.04.2024.

Accepted 05.04.2024.

Research of the Amazon Lex V2 natural language recognition system

In modern realities, systems with text and voice recognition are increasingly used, because the process of interaction with a person is increasingly automated. Human speech recognition technology is fundamental to the development of artificial intelligence. Systems that are built on this technology have the ability to solve a fairly large number of tasks related to data analysis, information search, and fulfillment of user requests. Voice assistants, smart home systems (such as Amazon Alexa or Google Assistant) are popular and quite common solutions for systems with NLP (Natural Language Processing). The study of this technology and the analysis of its integration in cloud environments provides an opportunity to independently use its features as automated assistants, or, for example, as part of an already existing intelligent system.

The NLP core of the Amazon Lex V2 service provides an opportunity to deploy a self-configured chatbot on a given topic, therefore, from the point of view of development and research, it attracts the attention of developers and analysts. But, before that, many

questions arise regarding its possibilities and limitations, which the integrator of this service will face.

Keywords: Amazon Lex, Amazon Web Services, natural language, artificial intelligence, recognition, chatbot

Носов Валерій Олександрович – магістр кафедри Інформаційних технологій і систем зі спеціальності «Компютерні науки», Український державний університет науки і технологій.

Островська Катерина Юріївна - к.т.н., доцент, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем, Український державний університет науки і технологій.

Nosov Valery Oleksandrovych - master of the Department of Information Technologies and Systems, from the specialty "Computer Science", Ukrainian State University of Science and Technology.

Ostrovska Kateryna Yuriivna - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technology.

В.С. Горбатов, А.О. Журба

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІСНУЮЧИХ АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ
ОБРОБКИ ПРАВИЛ НА ШВИДКОДІЮ СИСТЕМИ
ВІЯВЛЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ ВТОРГНЕНЬ SNORT 3**

Анотація. Системи виявлення вторгнень у мережу (NIDS) є ключовим компонентом кібербезпеки, працюючи на попередженні, виявленні та реагуванні на потенційні загрози в мережі. Вони аналізують мережевий трафік для виявлення аномальних або зловмисних дій, таких як спроби несанкціонованого доступу, віруси, експлуатація програмного забезпечення та інше. Для високої ефективності системи виявлення вторгнень мають виконувати інспекцію пакетів на швидкості кабелю або близько до неї. Швидкість роботи систем виявлення вторгнень має вирішальне значення, оскільки вона дозволяє вчасно виявити потенційні кіберзагрози, забезпечуючи безперервну роботу бізнес процесів. Snort 3 є розвитком однієї з найпопулярніших систем виявлення вторгнень Snort, і є відкритою багатопотоковою системою виявлення вторгнень, яка працює в операційних системах подібних до UNIX.

У цьому дослідженні розглянута архітектура системи Snort 3, а також основні алгоритми оптимізації обробки правил та їх вплив на швидкодію системи в різних сценаріях. Швидкодія системи вимірювалася за часом обробки запису мережевого трафіку, який містить як звичайні робочі пакети, так і шкідливі, на двох різних конфігураціях.

Ключові слова: Snort 3, NIDS, швидкодія, Fast Pattern, Виявлення атак, Правило, Сигнатура, Оптимізація, Алгоритм, Протокол.

Постановка задачі. У світі швидкісних мереж і складних атак, швидкодія систем виявлення мережевих вторгнень (NIDS) стає ключовим фактором у забезпеченні безпеки та функціональності цифрових інфраструктур. Системи виявлення вторгнень сканують мережевий трафік для виявлення аномальних або зловмисних активностей, таких як спроби несанкціонованого доступу, та використання шкідливого програмного забезпечення та експлойтів. Щоб бути високоефективним, NIDS повинні аналізувати пакети вхідного трафіку з максимальною швидкістю, близькою до швидкості каналу передачі даних, тобто мільйони байт в секунду. Швидкодія таких систем виявлення вторгнень є критич-

ною, оскільки затримки у роботі корпоративних мереж можуть призвести до зниження ефективності роботи цілого підприємства.

Системи виявлення вторгнень на основі сигнатур, працюють за принципом аналізу мережевого трафіку та виявлення в ньому певних шаблонів атак, які відомі за попередніми досвідом або базою даних[1]. Вони використовують правила (сигнатури) атак для визначення потенційно небезпечних дій у мережі і надають можливість реагувати на ці загрози у реальному часі. Кожне правило складається з набору умов та текстових шаблонів, які використовуються для перевірки кожного мережевого пакета.

Ці правила організовані у деревоподібні структури, де кожен вузол представляє собою опцію, а тіло правила, яке визначає додаткові умови, розташоване на листках цього дерева. З урахуванням можливості наявності десятків тисяч правил, застосовуються різні техніки оптимізації для звуження області пошуку та забезпечення ефективного функціонування системи. Знання специфіки роботи і впливу цих алгоритмів на систему допоможе досягти максимальної швидкодії системи NIDS при побудові інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найпоширеніших та визнаних інструментів у сфері NIDS є система виявлення вторгнень Snort, що вже зарекомендувала себе як потужний засіб захисту мереж. Snort 3 є оновленою версією цієї системи, і володіє багатопотоковістю, підвищеною швидкістю в порівнянні зі Snort, більшою модульністю та іншими перевагами[2], тож розглядати у контексті цієї статті будемо саме її.

Задача оптимізації роботи NIDS стоїть дуже гостро та розглянута у багатьох проєкціях. Через варіативність та багатфункціональність існуючих систем є широке поле для аналізу та покращення ефективності NIDS як для специфічних задач так і для задач широкого профілю. Так багато робіт розглядають швидкодію Snort 3 у порівнянні з іншими системами виявлення вторгнень[3] у різних типах інфраструктур, що допоможе користувачу знайти найкращий варіант для себе.

Загалом, для звичайного користувача шляхами покращення швидкодії системи є конфігурація, набори правил та написання своїх правил. Більшість авторів надають рекомендації щодо оптимізації саме набору правил, використовуючи різні набори[4] або навіть пропонуючи методи Data Mining для покращення набору правил[5]. Одним з важливих кроків також є системна оптимізація мережевих взаємодій, один із видів якої наведено у статті[6].

Алгоритмічні оптимізації, схожі на ті що описані у цій статті, пропонуються у декількох роботах. Так деякі автори змогли інтегрувати Snort з нейронними мережами[7] або евристичними алгоритмами для зменшення кількості правил що перевіряються[8].

Мета дослідження - розглянути три основні алгоритми оптимізації обробки правил що використовуються у системі Snort 3, а саме Fast Pattern, групування що базується на портах та групування що базується на протоколах. Для них буде описана базова реалізація, модифікації вихідного коду, що необхідні для вимкнення алгоритму а також вплив алгоритму на загальну швидкість системи.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації роботи системи при її локальному розгортанні, при розробці нових алгоритмів оптимізації обробки правил, а також для інтегрування описаних алгоритмів у інші системи.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Обробка пакетів у системі Snort 3 є гнучкою за допомогою підходу, керованого подіями[9], діаграма якого показана на рис. 1.

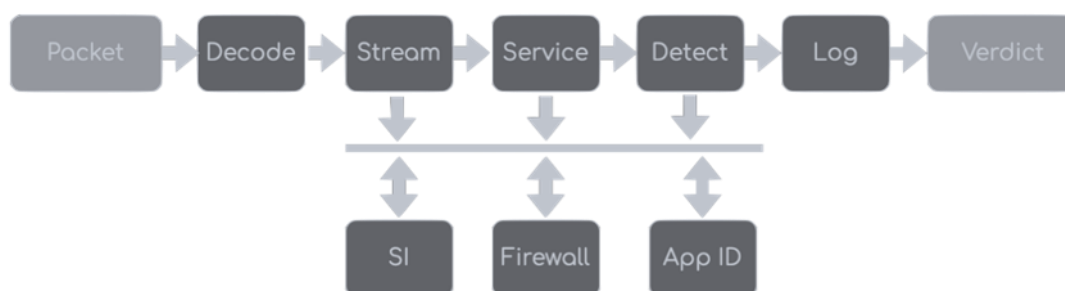


Рисунок 1 – Схема модульної архітектури Snort 3

Основні кроки обробки:

- Декодинг кожного пакету, щоб визначити основні його характеристики.
- Попередня обробка кожного пакету, для дефрагментації повного набору даних (пересбірка TCP сесії).
- Виявлення атак – це етап порівняння правил з бази даних з даними пакету.
- Логування – де система зберігає будь-яку відповідну інформацію, отриману в результаті попередніх кроків[9].

У контексті цієї роботи, нас цікавить саме етап виявлення атак. Так у ньому для кожного шаблону правила створюється дерево параметрів виявлення,

яке дозволяє Snort ефективно обробляти набір правил. Нелистові вузли в цьому дереві посилаються на екземпляр опції для перевірки. А листові вузли описують тіло правила. До листа приєднаний один або декілька RTN, які представляють заголовок правила. Критерії RTN оцінюються в останню чергу, щоб визначити, чи потрібно генерувати подію[10].

Через те що кількість правил у системі Snort 3 може досягати десятків тисяч, кожне з яких містить у собі декілька опцій, загальна кількість нелистових вузлів може досягати сотень тисяч штук. Якщо кожен пакет буде потребувати обробки кожного нелистового вузла, швидкодія системи буде явно не задовільна. Для цього у Snort 3 є декілька алгоритмів звуження пошуку

Основним методом є попередня фільтрація використовуючи Fast Pattern. Fast Pattern це маленький текстовий шаблон, що націлений не на виявлення атаки а на пошук пакета у якому потенційно може бути специфічна атака або набір атак. Fast Pattern є частиною сигнатури і може бути призначений як користувачем так і системою виявлення вторгнень.

Під час конфігурації кожне правило розбирається, і з неї виділяються всі шаблони. Якщо користувач вказав конкретний шаблон для використання як fast pattern, то він буде обраний; в іншому випадку обирається найдовший шаблон. Усі обрані шаблони додаються до загального масиву шаблонів fast pattern, які компілюються в MPSE дерево.

MPSE (багатошаблонний пошуковий двигун) - це система, яка може одночасно шукати декілька шаблонів у даних. У Snort 3 доступні декілька таких систем, зокрема AC_BNFA та Intel Hyperscan. Усі шаблони fast pattern додаються до цієї системи та компілюються у таблицю пошуку за алгоритмом Ахо-Корасіка для AC_BNFA та у константну базу даних для Hyperscan. Після компіляції MPSE дерева для кожного fast pattern формується дерево правил.

Під час роботи, кожен пакет перед пошуком атаки проходить через MPSE, де шукається fast pattern. Якщо шаблон було знайдено, то для цього пакету обробляється відповідне дерево перевірок; в іншому випадку можна припустити, що у пакеті атака відсутня [11].

Також Snort 3 зберігає дерево правил що не мають fast pattern опцій(а саме content, regex або sd_pattern). Вони виконуються на кожен пакет і потребують багато ресурсів.

Розподіл правил на групи за портами використовується для запобігання перевірці правил, RTN яких точно що не може відповідати пакету. Наприклад, усі правила TCP, які використовують порт 80, потраплять до однієї групи, а всі

правила, які використовують порт 22, – до іншої групи[9]. Ці групи правил скомпільовані в MPSE, таким чином система містить в собі не одну велику, а N малих пошукових систем, що працюють базуючись на характеристиках пакету, які є простою класифікуючою функцією.

Основний процес розподілу проходить на етапі конфігурації, де створюється набір таблиць відповідності ідентифікаторів правил та унікального порту або напрямку який ці правила очікують. Далі, після пошуку в правилах Fast Pattern, на основі таблиці створюються порт групи, де до кожного унікального порту додається MPSE система, скомпільована під шаблони Fast Pattern що зустрічаються у правилах які очікують цього порту[10].

Також, система оперує додатковою групою any-any, для правил що націлені на все порти, без залежності на напрямки. Такі правила виділені у групу і перевіряються для кожного пакету.

Розподіл правил на групи за протоколами також використовується, адже порт не завжди може точно характеризувати тип трафіку (адже ніхто не заважає HTTP серверу працювати на порту відмінному від 80). Так NIDS проводить передобробку пакетів, це необхідно з декількох причин, таких як нормалізація даних, виявлення аномалій, та ін. Тож, система завжди знає справжній протокол до якого відноситься пакет, без залежності на порт. Це досягається за допомогою пошуку характеристик у реальних даних пакету. Тож, класифікація правил за протоколом є більш ефективною ніж просто за портами.

У Snort 3 є декілька способів класифікувати правило за протоколом:

- вказати протокол у заголовці правила;
- використати спеціальну опцію service;
- використати один з буферів, специфічних для деякого протоколу.

Далі система використовує реалізацію на основі порт груп, однак замість порту використовується внутрішній ідентифікатор протоколу. Тобто для кожного протоколу та напрямку будується група, кожен пакет перед перевіркою звертається до набору груп і отримує відповідну своєму протоколу групу правил.

Для вимірювання впливу вищеописаних алгоритмів на швидкість системи, було проведено деякі зміни у кодовій базі системи Snort 3, що дозволило вимкнути оптимізації.

Також була проведена валідація змін. Очікується, що кількість спрацювань правил на одному тому ж трафіку та з однаковою конфігурацією не повинна змінитися. Перевірка виконувалася на записі трафіку DEFCON-2003, що

містить як атаки так і звичайний трафік. У якості конфігурації використовувався пакет Talos LightSPD з конфігурацією Maximum Detection[12]. Порівняння відбувалося на Snort 3 версії 3.1.78.0 та версії з відповідними змінами, базуючись на 3.1.78.0.

Для вимкнення розподілення по портам, простіше всього скласти усі правила у одну групу. Для цього можна створити окрему групу, або використати вже існуючу групу any-any. У цій роботі була використана група any-any, адже вона виконується на кожен пакет, тож не потребує багато кодових змін. Тож, була змінена функція формування таблиць портів, так щоб усі правила склались у групу any-any. Валідація показала ідентичність результатів.

Для вимкнення функціоналу протокольних груп був використаний схожий підхід. На етапі створення таблиці сервісів, код був модифікований таким чином, щоб складати усі сервіси в одну групу. Також був модифікований код пошуку групи, що виконується при обробці пакета, так він одну повертає статичну групу.

Валідація показала зміну в кількості спрацювань, на 1434 з 29496 спрацювань. Подібні зміни не є критичними і обумовлені злиттям схожих правил.

Для вимкнення функціоналу Fast Pattern треба зазначити, що створення MPSE для Fast Pattern перевірок проходить після парсингу усіх правил. Для того щоб Snort зрозумів чи є у правилі опція що підтримує Fast Patter, він звертається до вектора шаблонів правила. У випадку коли вектор не пустий, система підбирає відповідний патерн з вектора і додає його в MPSE. Для вимкнення Fast Pattern код було модифіковано таким чином, що перевірка вектора завжди повертає нульове значення, тож правило додається лише у список Non Fast Pattern правил та перевіряється на кожному пакеті.

Валідація показала збільшення кількості спрацювань на 530 штук. Така зміна є очікуваною, адже кількість правил що перевіряються на пакеті зросла, тож вірогідно що деякі додаткові правила спрацюють.

Для замірів швидкодії було підготовлено:

- Сервер для отримання результатів;
- Конфігурації системи виявлення вторгнень;
- Записи трафіку, що включають атаки та звичайний трафік.

У якості машини для проведення бенчмарків був використаний сервер Cisco UCSC C220 M5SX, системні характеристики якого наведено у табл. 1.

Конфігурація серверу для замірів швидкодії

CPU	2 × Intel Xeon Gold 5218 CPU 2.30GHz по 16 ядер, 32 потоки
RAM	128 Gb, 2666 MT/s, 4 канали
OS	Fedora Linux 39 (Server Edition)

Для досягнення максимально точних результатів, системні процеси на сервері було максимально скорочено, та їх обробка була призначена на CPU 1. Таким чином вдалося ізолювати системні процеси на потоках 0-15,32-47 а процес для якого замірялася швидкодія на потоках 16-31,48-63. Також для того щоб виключити можливе вузьке місце у вигляді пропускної здібності диску, усі записи трафіку попередньо було скопійовано у RAM диск зі швидкістю доступу 21.3 GB/s.

Snort 3 було зібрано використовуючи компілятор clang++ версії 17.0.4 з пакету LLVM через те, що алгоритмічна оптимізація аплікацій зібраних використовуючи clang у більшості випадків краща ніж GCC[13]. Також був використаний максимальний рівень оптимізацій компілятора (O3) і усі плагіни використовували динамічне зв'язування, для зменшення числа кеш-промахів.

Для кожної варіації запису трафіку та конфігурації виконувалось по 50 прогонів. У результаті підготовки серверу стандартне відхилення результатів вдалося знизити до 0.01%.

У якості конфігурацій використовувались Balanced Security And Connectivity та Maximum Detection з пакету Talos lightSPD версії 2024-02-07-001. Цей пакет надає можливість вибрати конфігурації Snort, які більше спрямовані на швидкість або більше на виявлення та глибину перевірки[12]. Перша надає збалансовану конфігурацію, що включає правила для більшості відомих атак, друга, відповідно, надає максимальний рівень захисту з усіма наявними правилами.

Записи трафіку що використовувалися, включаються як звичайну роботу в мережі так і атаки. Для цього були використані наступні записи:

- 2000 DARPA Intrusion Detection Scenario, що включає в себе набір атак на Windows NT [14];
- National CyberWatch Mid-Atlantic Collegiate Cyber. Defense Competition 2012, запис 00008, що містить атаки на вбудовані системи медичного обладнання[15];

• Відокремлену частину(9:20 - 10:42) запису CIC-IDS2017-Thursaday-Working-Hours, що включає Brute Force, XSS та SQL Injection атаки[16].

Далі наведені результати замірів швидкодії системи Snort 3 зі змінами описаними вище. Для кожного варіанту було отримано базовий результат та результат зі змінами. Відсоткова зміна вирахована за формулою (1).

$$\% = \frac{n_2 - n_1}{|n_1|} * 100\% \quad (1)$$

У табл. 2 наведені результати вимірювання швидкодії NIDS з вимкненим функціоналом порт груп. Як можна побачити, у випадку зі збалансованою конфігурацією та трафіком DARPA, швидкодія зросла на майже 5%. Скоріш за все це відбулося через специфіку трафіку і те, що кількість правил що надходила на доволі мала, тож виграш від видалення пошуку групи переважив втрати на MPSE пошук. У всіх інших випадках спостерігається падіння швидкодії до 30%, що зростає при переході на конфігурацію з більшою кількістю правил.

Результати з вимкненим функціоналом протокольних груп наведено у табл. 3. Тут зберігається покращення швидкодії при вимкнених групах у випадку зі збалансованою конфігурацією. На мою думку, причини збігаються з попереднім дослідженням. Також можна побачити падіння швидкодії на 30% та більше у випадку з великою кількістю правил. Таке велике падіння швидкодії логічне, адже кількість правил що використовують протокольні групи більша ніж тих що використовують порт групи.

Таблиця 2

Результати замірів швидкодії з вимкненим функціоналом порт груп

Трафік	Конфігурація Balanced Security and Connectivity			Конфігурація Maximum Detection		
	Базовий результат, с.	Цільовий результат, с.	Різниця, %	Базовий результат, с.	Цільовий результат, с.	Різниця, %
DARPA-2000-Win-NT-attacks	11,051	10,554	-4,71	13,484	19,44	30,64
CIC-IDS2017-Thursaday-attacks	7,554	8,407	10,15	15,412	20,435	24,58
maccdc2012_00008	32,471	42,442	23,49	130,642	163,328	20,01

Таблиця 3

Результати швидкодії з вимкненим функціоналом протокольних груп

Трафік	Конфігурація Balanced Security and Connectivity			Конфігурація Maximum Detection		
	Базовий результат, с.	Цільовий результат, с.	Різниця, %	Базовий результат, с.	Цільовий результат, с.	Різниця, %
DARPA-2000-Win-NT-attacks	11,044	10,72	-3,02	13,447	21,271	36,78
CIC-IDS2017-Thursaday-attacks	7,563	7,104	-6,46	15,423	23,372	34,01
maccdc2012_0008	32,618	32,756	0,42	130,892	188,739	30,65

Вимкнення Fast Pattern, призвело до сильного падіння швидкодії, що можна побачити у табл. 4.

Таблиця 4

Результати замірів швидкодії з вимкненим Fast Pattern

Трафік	Конфігурація Balanced Security and Connectivity			Конфігурація Maximum Detection		
	Базовий результат, с.	Цільовий результат, с.	Різниця, %	Базовий результат, с.	Цільовий результат, с.	Різниця, %
DARPA-2000-Win-NT-attacks	10,985	116,285	958.57	13,481	296,176	2096.98
CIC-IDS2017-Thursaday-attacks	7,539	22,487	198.27	15,389	150,565	878.39
maccdc2012_0008	31,9	148,511	365.55	130,904	2120,38	1519.79

Падіння лінійно збільшується в залежності від кількості правил. Специфіка трафіку теж сильно впливає на падіння швидкодії, адже чим більший середній розмір пакету, тим більше шанс того що при перевірці на ньому будуть оброблятися вузли опцій.

Висновки. Система Snort 3 є однією з найефективніших NIDS на ринку, це досягається шляхом використання великої кількості цікавих алгоритмів оптимізації. У цій роботі були розглянуті три основні алгоритми оптимізації обробки правил(порт та протокольні групи, Fast Pattern) та їх вплив на швидкодію системи при обробці трафіку. Результати показали значний їх вплив а також пряму залежність швидкодії на кількість правил що використовуються.

Деякі результати показали незначне покращення швидкодії при відключенні алгоритмів оптимізації, це відбувається на конфігураціях з невеликою кількістю правил. У більшості випадків помітно явне падіння швидкодії від 10% і вище. Найбільше погіршення швидкодії відбувається при відключенні операцій Fast Pattern, без цього алгоритму погіршення може досягати 20 разів.

Результати роботи можуть бути використані при написанні правил та конфігурацій для NIDS Snort 3, оптимізації самої системи а також для інтеграції цих алгоритмів у інші системи. Схожі алгоритми можуть бути інтегровані у пошукові системи, бази даних, системи аналізу даних, т.д.

ЛІТЕРАТУРА

1. Martin R. Snort: Lightweight intrusion detection for networks. LISA '99 : матеріали Міжн. наук. конф., м. Вашингтон, 7–12 груд. 1999 р. 1999. С. 229–238.
2. Comparing Snort 2 and Snort 3 on Firepower Threat Defense – Cisco [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/security/firepower-ngfw/217617-comparing-snort-2-and-snort-3-on-firepow.html>.
3. Thorarensen C. A Performance Analysis of Intrusion Detection with Snort and Security Information Management : магістерська робота. Linköping, 2021. 84 с.
4. Granberg N. Evaluating the effectiveness of free rule sets for Snort : магістерська робота. Linköping, 2022. 53 с.
5. Khamphakdee N., Benjamas N., Saiyod S. Improving intrusion detection system based on snort rules for network probe attacks detection with association rules technique of data mining. Journal of ICTResearch & Applications. 2015. Т. 8, № 3. С. 11–21.
6. Salah K., Kahtani A. Improving Snort performance under Linux. IET Communications. 2009. Т. 3, № 12. С. 1883–1895.

7. Elshafie H. M., Mahmoud T. M., Ali A. A. Improving the Performance of the Snort Intrusion Detection Using Clonal Selection. International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE) : матеріали Міжн. наук. конф., м. Асуан, 2–4 лют. 2019 р. 2019. С. 104–110.
8. Singh P., Behal S., Kumar K. Performance enhancement of a Malware Detection System using score based prioritization of snort rules. 2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), м. Greater Noida, Delhi, India, 8–10 жовт. 2015 р. 2015. С. 1150-1155.
9. Snort 3 User Manual [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://usermanual.wiki/Document/snortmanual.760997111/view>
10. Snort++ Developers Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.snort.org/downloads/snortplus/snort_devel.html#_detection.
11. Горбатов В. С., Журба А. О. Метод попередньої фільтрації сигнатур для пришвидшення пошуку атак системою виявлення мережових вторгень. Сучасні Інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті: матеріали Міжн. наук. конф., м. Дніпро, 13–14 груд. 2023 р. Дніпро, 2023. С. 136–137.
12. Munshaw J. Soft Release: lightSPD, the new rules package for Snort 3. Snort Blog. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://blog.snort.org/2020/12/soft-release-lightspd-new-rules-package.html>.
13. Performance comparison of GCC and LLVM on the EISC processor / С. Park та ін. 2014 International Conference on Electronics, Information and Communications (ICEIC), м. Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, 15–18 січ. 2014 р. 2014. С. 96-102.
14. 2000 DARPA Intrusion Detection Scenario Specific Datasets | MIT Lincoln Laboratory [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ll.mit.edu/r-d/datasets/2000-darpa-intrusion-detection-scenario-specific-datasets>
15. 2012 MACCDC – MACCDC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://maccdc.org/maccdc-2012/>
16. IDS 2017 | Datasets | Research | Canadian Institute for Cybersecurity | UNB [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html>

REFERENCES

1. Martin Roesch, “Snort: Lightweight intrusion detection for networks”, Lisa 99, vol. 1, 229–238, 1999.
2. Comparing Snort 2 and Snort 3 on Firepower Threat Defense – Cisco. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/security/firepower-ngfw/217617-40>

comparing-snort-2-and-snort-3-on-firepow.html.

3. C. Thorarensen, "A Performance Analysis of Intrusion Detection with Snort and Security Information Management", Independent thesis Advanced level, Linköping University-Department of Computer and Information Science, 2021.

4. Granberg, N.: "Evaluating the effectiveness of free rule sets for Snort". Independent thesis Advanced level, Linköping University-Department of Computer and Information Science, 2022.

5. N. Khamphakdee, N. Benjamas and S. Saiyod, "Improving intrusion detection system based on snort rules for network probe attacks detection with association rules technique of data mining", Journal of ICTResearch & Applications, vol. 8, no. 3, pp. 11–21, 2015.

6. Salah, K.; Kahtani, A., "Improving Snort performance under Linux", IET Communications, vol. 3, no. 12, p. 1883-1895, 2009.

7. H. M. Elshafie, T. M. Mahmoud, A. A. Ali, "Improving the Performance of the Snort Intrusion Detection Using Clonal Selection", 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE), Aswan, Egypt, 2019, pp. 104-110, 2019.

8. P. Singh, S. Behal and K. Kumar, "Performance enhancement of a Malware Detection System using score based prioritization of snort rules", 2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), Greater Noida, India, 2015, pp. 1150-1155, 2015.

9. Snort 3 User Manual.

URL: <https://usermanual.wiki/Document/snortmanual.760997111/view>

10. Snort++ Developers Guide.

URL: https://www.snort.org/downloads/snortplus/snort_devel.html#_detection.

11. Gorbatov V. S., Zhurba A. O. The method of pre-filtering signatures to speed up the search for attacks by the network intrusion detection system. Modern information and communication technologies in transport, industry and education: materials of the international science conference, Dnipro, December 13–14. 2023. Dnipro, 2023. P. 136–137.

12. Munshaw J. Soft Release: lightSPD, the new rules package for Snort 3. Snort Blog. URL: <https://blog.snort.org/2020/12/soft-release-lightspd-new-rules-package.html>.

13. C. Park, M. Han, H. Lee, M. Cho, S. W. Kim, "Performance Comparison between LLVM and GCC Compilers for the AE32000 Embedded Processor," IEIE Transactions

on Smart Processing and Computing, vol. 3, no. 2. The Institute of Electronics Engineers of Korea, 96–102, 2014.

14. 2000 DARPA Intrusion Detection Scenario Specific Datasets | MIT Lincoln Laboratory. URL: <https://www.ll.mit.edu/r-d/datasets/2000-darpa-intrusion-detection-scenario-specific-datasets>

15. 2012 MACCDC – MACCDC. URL: <https://maccdc.org/maccdc-2012/>

16. IDS 2017 | Datasets | Research | Canadian Institute for Cybersecurity | UNB. URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html>

Received 05.04.2024.

Accepted 08.04.2024.

Influence of existing rule processing optimizations on the performance of the snort 3 network intrusion detection system

Network intrusion detection systems (NIDS) are a key component of cybersecurity, working to warn, detect, and respond to potential network threats. They analyze network traffic to detect anomalous or malicious activity such as breach attempts, viruses, use of software exploits, and more. Intrusion detection systems should perform packet inspection at or near cable speed to be highly effective. The speed of intrusion detection systems is critical because it allows timely mitigation of potential cyber threats, ensuring uninterrupted operation of business processes.

One of the most common and recognized tools in the field of NIDS is the intrusion detection system Snort, which has already proven itself as a powerful means of protecting networks. Snort 3 is an updated version of this system, and has multithreading, increased speed compared to Snort, greater modularity and other advantages[2], so we will concentrate on it in the context of this article.

The task of optimizing the operation of NIDS is very acute. Due to the variability and multifunctionality of existing systems, there is a wide field for analyzing and improving the efficiency of NIDS both for specific tasks and for tasks of a broad profile. So many works look at the performance of Snort 3 compared to other intrusion detection systems[3] in different types of infrastructures, which will help the user to find the best option for himself.

The purpose of the study is to consider the three main rule processing optimization algorithms used in the Snort 3 system, namely Fast Pattern, port-based and protocol-based clustering. For them, the basic implementation, modifications of the source code, which are necessary to disable the algorithm, as well as the impact of the algorithm on the overall speed of the system, will be described.

Some results have shown a slight performance improvement when the optimization algorithms are disabled, this is on configurations with a small number of rules. In most cases, a clear drop in performance of 10% or more is noticeable. The biggest deterioration in performance occurs when Fast Pattern operations are disabled, without this algorithm the deterioration can reach 20 times.

Горбатов Віталій Сергійович - аспірант кафедри Інформаційних технологій і систем ІПБТ УДУНТ.

Журба Анна Олексіївна - доцент кафедри Інформаційних технологій і систем ІПБТ УДУНТ.

Gorbatov Vitalii - post-graduate student, Department of information technology and systems, Institute of industrial and business technologies, Ukrainian state university of science and technologies.

Zhurba Anna - assistant professor, Department of information technology and systems, Institute of industrial and business technologies, Ukrainian state university of science and technologies.

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУПРОВОДУ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ В ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Анотація. В роботі описано структуру та функції інформаційної технології супроводу управлінських рішень в прокатному виробництві. Наголошено, що важливу роль при керуванні таким технологічним процесом грає розв'язання задач умовної багатовимірної багатокритеріальної оптимізації. Для вирішення цих задач запропоновано використовувати гібридний еволюційний метод на основі рою часток та моделювання імунної системи людини.

Запропонована інформаційна технологія дозволяє змінювати виробничі завдання в залежності від наявності матеріалів та зміни їх ринкової вартості. Практична цінність розв'язання такої задачі полягає у підтримці собівартості сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими. Також практичну цінність має застосування інформаційної технології до синтезу і мінімізації двох моделей, а саме для відновлення залежностей механічних характеристик готової продукції від хімічного складу сталі до розкислення та для розрахунку потреби у феросплавах в процесі розкислення вуглецевої сталі при її конвертерному виробництві.

Ключові слова: інформаційна технологія, інформаційний супровід, підтримка прийняття рішень, еволюційний алгоритм, шихтування, прогнозування, оптимізація, діаграма діяльності.

Постановка проблеми. Металургійна промисловість – одна з базових галузей економіки України, основними галузями якої є чорна й кольорова металургія. Частка металургії у ВВП країни становить близько 38%, у промисловому виробництві – 27,3%, експорті – 34,2%. Частка металургії в податкових надходженнях у бюджеті всіх рівнів становить 38% [1]. Одним з найбільш поширених способів виготовлення вуглецевої сталі в Україні і світі є конвертерний, згідно з яким спочатку зі збагаченої руди виплавляють чавун, а потім зменшують вміст у розплаві вуглецю та інших домішок до заданого рівня шляхом продувки через метал кисню під тиском [2]. Такий процес, з використанням конвертерів з верхньою продувкою, використовують на ВАТ «МК «Азов-

сталь», ПАТ «Арселор-Міттал Кривий Ріг», ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», ПАТ «ДМЗ» (Дніпро) і на багатьох інших виробництвах [3].

Математичні моделі, що описують процеси рафінації сталі та її розкислення пов'язують початкові умови (хімічний та ваговий склад шихти, наявність та якість матеріалів тощо) та керуючі впливи (можливі дії оператора) з вимогами до готового продукту, серед яких відсотковий уміст вуглецю, сірки, фосфору, марганцю, та інших легуючих елементів, а також температури, яка має обмеження згори і знизу [4].

Враховуючи поточний стан конвертерного виробництва та вимірювального обладнання на підприємствах України, можна говорити, що процес плавки відбувається на базі складної динамічної недетермінованої системи. Ускладнюють управління процесом велика кількість параметрів, неможливість точної ідентифікації стану системи у кожний момент часу, а також складність прогнозування факторів збурень. Відповідно, актуальною науково-практичною проблемою є розробка інформаційних технологій супроводу управлінських рішень в процесах керування металургійним виробництвом з використанням моделей і методів оптимізації цих процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам інформаційно-аналітичного супроводу прийняття рішень у металургійному виробництві присвячена значна кількість робіт, як вітчизняних дослідників [5,6], так і закордонних [7-12].

У [5] виконано достатньо докладний аналіз існуючих інформаційних систем, що застосовуються на металургійних підприємствах України, наголошено на необхідності реалізації в складі загальної інформаційної системи керування металургійним підприємством елементів реєстрації, систематизації та аналізу даних. Водночас, як і в [6], відзначається що всю діяльність щодо прийняття управлінських рішень має виконувати відповідальний фахівець: менеджер, технолог, оператор, тощо. При цьому наголошено на важливості саме інформаційного зв'язку між окремими системами та комплексами.

Автори [7] пропонують три керовані даними моделі, послідовних процесів рафінації, розкислення та розливки сталі. Згенеровані моделі дозволяють оптимізувати параметри процесу для досягнення оптимальних рівнів продуктивності та якості. Застосовано новий підхід, заснований на ансамблях для вибору ознак і побудови регресії. Найкращий результат забезпечує випадковий ліс, який робить прогнози більш стабільними і менш зміщеними.

В ряді джерел запропоновано використання в металургійних і зокрема прокатних виробництвах технології експертних систем. У [8] йдеться про комплексну експертну систему, що охоплює своїми порадами всі дії оператора плавильного цеху від завантаження шихти до розливки готової сталі, впроваджену на одному з підприємств у Нідерландах. Втім, описана система не охоплює попередні операції і орієнтована на хімічні й механічні властивості рідкої сталі, а не готової продукції. Її доповненням може служити запропонована в [9] експертна система отримання готової продукції у виготовленні титану, якщо її адаптувати до умов виготовлення сталі. Багатоагентна експертна система, описана в [10], вирішує одну з головних економічних задач технологічного процесу виплавки сталі в конвертері – мінімізації собівартості використаних розкислювачів для виведення газових домішок після рафінації. Побудована на навчанні нечіткої нейронної мережі ANFIS, дана система має характерний недолік – неможливість ідентифікації та інтерпретації випадків, які не зустрічалися в навчальній вибірці.

Автори [11] пропонують застосування технологій машинного навчання у складі експертних систем для прогнозування якості готової сталі. Аналогічний підхід, але для прогнозування механічних властивостей готової продукції прокатного виробництва, пропонується в [12]. В обох випадках інформаційна технологія охоплює лише дві послідовні технологічні операції.

Резюмуючи викладене, слід відзначити, що основним недоліком підходу більшості виконавців є обмеження кола розв'язуваних задач рівнем керування однією (іноді двома) технологічними операціями.

Також слід зробити висновок про необхідність застосування методу розв'язання задач оптимізації окремих технологічних операцій. Зокрема, застосування методу багатокритеріальної багатовимірної умовної оптимізації вбачається ефективним для задач шихтування, раціонального використання феросплавів при розкисленні готової сталі, а також при прогнозування механічних властивостей готової продукції. Варіантом такого методу може бути викладений у [13] гібридний метод глобальної оптимізації на основі штучної імунної системи та методу рою часток.

Мета дослідження: розробка інформаційної технології супроводу управлінських рішень в процесах шихтування, розкислення та прогнозування механічних властивостей готової продукції прокатного металургійного виробництва на основі гібридного еволюційного методу багатокритеріальної оптимізації.

Викладення основного матеріалу дослідження. Основою інформаційної технології супроводу управлінських рішень в прокатному виробництві є інтегрована система підтримки прийняття рішень (СППР) керування багатоетапним прокатним виробництвом, підходи до створення якої докладно описані в [14]. До кола задач, які має вирішувати пропонована інформаційна технологія входять оптимізація шихти, оптимізація використання феросплавів та задача прогнозування механічних властивостей готової продукції, яка вирішується як оптимізаційна. У всіх згаданих задачах оптимальні рішення – вектори дійсних чисел, що описують параметри у відповідності до математичної моделі задачі – розраховує згаданий метод HPSO. До функцій інформаційної технології відповідно слід віднести формування, зберігання та передачу математичних моделей задач, а також знаходження, обробку і зберігання даних, що є висхідними для відповідних оптимізаційних задач або ж результатами рішення.

Зокрема, найбільше даних, що описують параметри задачі, обмеження та коефіцієнти цільових функцій, потребує задача оптимізації шихти. Структуру інформаційної технології, що описує розв’язання цієї задачі в складі СППР прокатного виробництва, описує рис. 1.

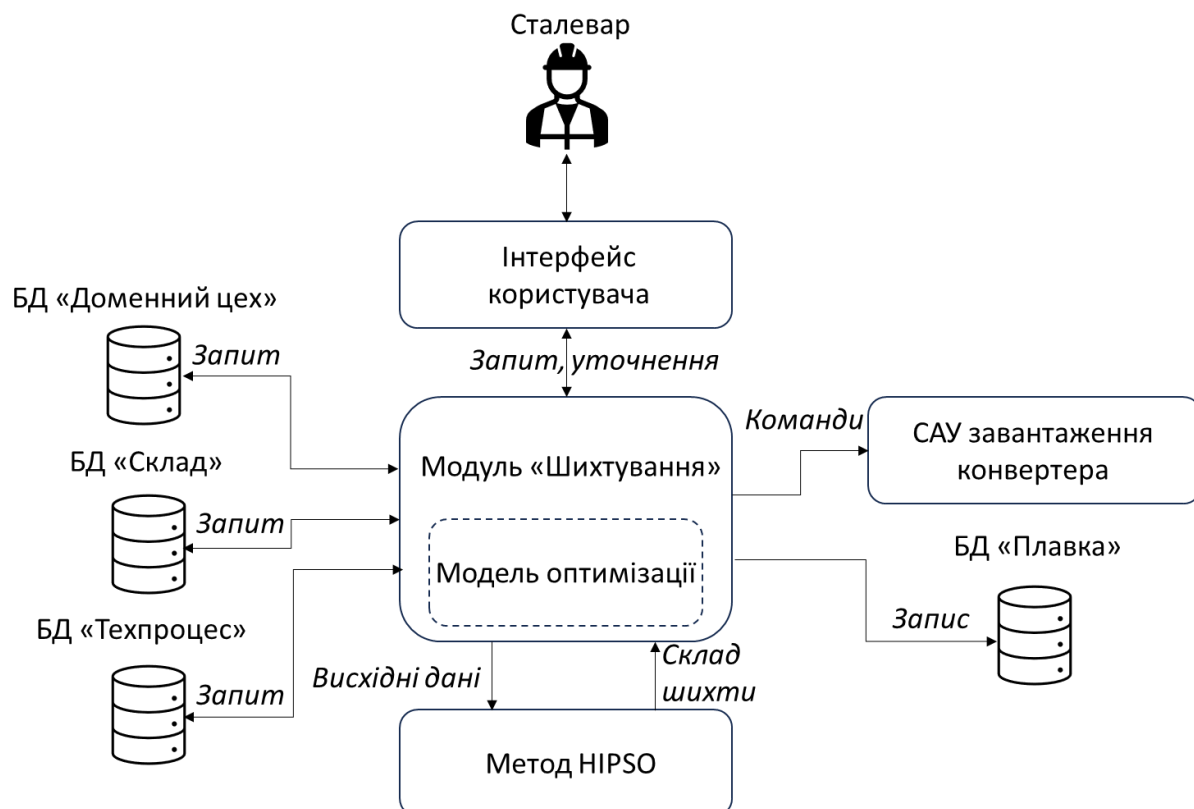


Рисунок 1 - Структура інформаційної технології супроводу управлінських рішень при шихтуванні сталі

Відповідно до наведеної структури, оператор конвертерного цеху, отримує дані про хімічний склад, кількість і температуру чавуну від бази даних (БД) «Доменний цех», про кількість, хімічний склад та вартість всіх складових шихти – від БД «Склад», а також інформацію про поточне замовлення, марку сталі, обсяг металу на виході та багато інших параметрів, необхідних для розв’язання оптимізаційної задачі шихтування – від БД «Техпроцес». Ввівши свої дані, обставини плавки та параметри її ведення, оператор, отримує перелічену інформацію через відповідний інтерфейс.

Запуск розрахунку оптимального складу і обсягу шихти виконується за допомогою гібридного еволюційного методу HPSO, що отримує на вхід модель оптимізації, оснований на трьох критеріях:

- Мінімальної собівартості готової сталі;
- Тепловому балансу плавки;
- Масовому балансу плавки.

Одночасне виконання всіх критеріїв (мінімум собівартості за умови дотримання теплового та енергетичного балансу) є ознакою отримання оптимального шихтування для заданої маси і марки сталі.

Це рішення може бути прийняте оператором або скореговане, виходячи з його досвіду та певних технічних міркувань. Після ухвалення остаточного рішення воно стає завданням для систем автоматичного управління (САУ), які відповідають за завантаження відповідних речовин в конвертер. Водночас, незалежно від того, прийняв оператор рішення, запропоноване методом оптимізації або ні, це рішення зберігається в БД «Плавка» у вигляді набору таблиць, що описують всі дані, відомі й прийняті на момент початку плавки. До бази даних «Плавка» модулем «Шихтування» зберігаються наступні числові дані:

1) Склад шихти (маси рідкого чавуну, брухту чавуну, чавуну в злитках, брухту сталевий і забрудненого, скрапу чавунного і сталевий, шлакометалевої частини, залізовмісних брикетів, вапна, окатишів, вапняку, магнезійних брикетів, плавицевого шпату та доломіту).

2) Розрахункові параметри сталі (марка, температура, маса, вміст вуглецю та решти домішок, лужність).

3) Використані й утворені гази (витрата кисню, маса та об’єм утворених CO , CO_2 , N_2 та залишок кисню).

4) Допуски (кількість міксерного шлаку, забрудненість брухту, відсоток окалини, відсоток допалювання CO до CO_2 , розрахункові втрати заліза, втрати заліза з газами, втрати тепла, вигорання футеровки, втрати тепла через стінки конвертера).

5) Розрахунок шлаку (маса шлаку, його хімічний склад, а також вміст в шлаку FeO та Fe_2O_3).

Після завантаження складових шихти в системі підтримки прийняття рішень можлива корекція виданого завдання, пов'язана із неточністю завантаження тих чи інших складових шихти, а також реальної температури чавуну. Уточнене рішення є остаточним і має сенс сигналу до початку наступної технологічної операції виготовлення сталі – продувки киснем у ванні конвертера.

Описані етапи застосування інформаційної технології при розв'язанні задачі шихтування описує рисунок 2, де наведено діаграму діяльності модулю «Шихтування».

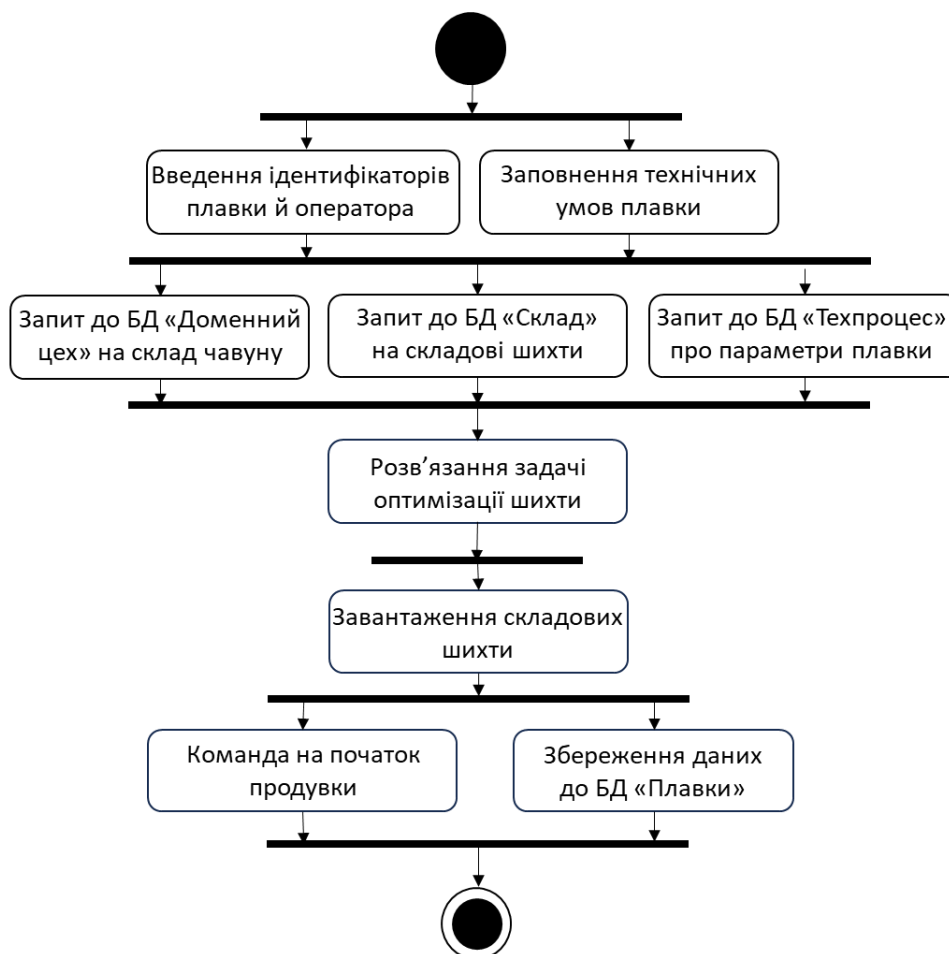


Рисунок 2 - Діаграма діяльності модуля «Шихтування» інформаційної технології супроводу управлінських рішень

Як видно з діаграми діяльності, на початковому інтерфейсі оператор вносить відомості про ідентифікатор плавки (дата, час, ідентифікатори оператора та конвертера) та водночас технічні умови плавки (марка сталі, номер замовлення, розрахункова кількість). На другому етапі виконуються запити до відповідних баз даних, наведених на рис. 1, з метою отримати опис поточних умов і параметрів ведення плавки. Згадані параметри є складовими математичної моделі багатовимірної умовної оптимізації, яка також описана в модулі «Шихтування» і разом з висхідними даними передається методу оптимізації для пошуку найкращого рішення.

Метод оптимізації на основі моделювання рою часток та штучної імунної системи людини HIPSO [13] є універсальним методом оптимізації в межах даної технології в тому сенсі, що використовується для рішення кількох задач оптимізації функцій багатьох змінних в дійсному просторі. Відтак, він реалізований у вигляді окремого програмного модуля, який активується при передачі йому математичної моделі задачі, що розв'язується, та числових параметрів, що в якості констант входять до цільових функцій або обмежень цієї математичної моделі.

Аналогічно до розв'язання задачі шихтування інформаційна технологія супроводу управлінських рішень в прокатному виробництві відпрацьовує ще дві оптимізаційні задачі – мінімізацію витрат на розкислення сталі в ковші та побудови максимально точної прогностичної моделі для прогнозування механічних властивостей готової продукції за параметрами ведення плавки. Відповідні модулі, названі «Розкислення» та «Сертифікація» також містять в собі математичні моделі задач умовної багатовимірної оптимізації та звертаються до методу HIPSO задля отримання певного набору числових значень, що описують оптимальне для даної задачі рішення.

Критерієм оптимальності рішення для задачі раціонального використання розкислювачів є мінімальна вартість використаних феросплавів, а обмеженнями – обов'язкові хімічні процеси, які мають бути забезпечені. При цьому параметрами, що передаються до математичної моделі оптимізації є марка сталі (точніше - очікуваний хімічний склад), хімічний склад та температура сталі на повалці конвертера, а також собівартість, хімічний склад та наявність феросплавів.

Критеріями оптимальності рішення щодо прогнозування механічних властивостей готової продукції є мінімальна очікувана помилка та мінімальна кількість коефіцієнтів обраних математичних моделей прогнозування

механічних властивостей. Останній критерій пов'язаний з мінімізацією чутливості моделі до випадкових помилок у результатах вимірювання (так званої надійності моделей). В якості прогнозуючої приймається невідомована модель, обрана виходячи з умови, що перший критерій є головним, а на розмірність прогнозуючого поліному накладається штрафна функція.

Для інформаційної технології супроводу управлінських рішень щодо визначення оптимальної кількості феросплавів, а також прогнозування механічних властивостей готової продукції були розроблені структури та діаграми діяльності, аналогічні рис. 1 та 2.

Робота інформаційної технології була досліджена на прикладі рішень, прийнятих оператором конвертерного цеху ПАТ «ДМЗ» м. Дніпро) в період з 2018 по 2019 року (загалом 12039 плавов) з виробництва шести марок сталі. Отримані результати свідчать, що застосування інформаційної технології супроводу управлінських рішень на основі гібридного еволюційного методу оптимізації дозволяє підвищити ряд показників ефективності цього виробництва, зокрема зменшити собівартість сталі.

На розглянутих плавках собівартість сталі, отримана з використанням інформаційної технології, була меншою, ніж при розрахунку шихтування за традиційною методикою, на 2,4-2,5% при виконанні великих замовлень та на 3-4% - при виконанні малих замовлень. Економічний ефект від впровадження інформаційної технології лише на етапі шихтування може становити від 904 до 1 413 тис. грн. за місяць при двозмінній роботі.

Застосування запропонованої інформаційної технології для супроводу управлінських рішень в ході розкислення сталі та встановлення залежностей механічних властивостей готової продукції від хімічного складу розпеченої сталі в кисневому конвертері дозволяє значно підвищити фізичну відповідність моделей сутності процесів. Водночас застосування штрафної функції на розмірність апроксимаційного поліному дозволило отримувати моделі оптимальної складності шляхом самоорганізації. Економічний ефект від економії феросплавів (в цінах 2021 року) на 4013 плавках тестової вибірки становив 4,626 млн. грн., що, в свою чергу, забезпечує місячну економію на рівні 578,18 тис. грн., річну – близько 6,938 млн. грн.

Висновки. В роботі описано структуру та функції інформаційної технології супроводу управлінських рішень в прокатному виробництві. Наголошено, що важливу роль при керуванні таким технологічним процесом грає розв'язання задач умовної багатовимірної багатокритеріальної оптимізації.

Для вирішення цих задач запропоновано використовувати гібридний еволюційний метод на основі рою часток та моделювання імунної системи людини. Запропонована інформаційна технологія дозволяє змінювати виробничі завдання в залежності від наявності матеріалів та зміни їх ринкової вартості. Практична цінність розв'язання такої задачі полягає у підтримці собівартості сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими. Також практичну цінність має застосування інформаційної технології до синтезу і мінімізації двох моделей, а саме для відновлення залежностей механічних характеристик готової продукції від хімічного складу сталі до розкислення та для розрахунку потреби у феросплавах в процесі розкислення вуглецевої сталі при її конвертерному виробництві.

ЛІТЕРАТУРА

1. Украинская металлургия: современные вызовы и перспективы развития / А. И. Амоша, В. И. Большаков, А. А. Минаев, Ю. С. Залознова, Л. А. Збаразская, Ю. В. Макогон и др.; НАН Украины, Ин-т экономики пром-сти. — Донецк, 2013. https://web.archive.org/web/20140517161925/http://iep.donetsk.ua/akadem_sl/sluhannya_po_met/akadem_sluh_met.pdf
2. Основи металургійного виробництва металів і сплавів / Чернега Д. Ф., Богущевський В. С., Готвянський Ю. Я. та ін. ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. — К. : Вища школа, 2006. — 503 с.
3. Panteikov, S.P., Upper blowing devices of oxygen converters in Ukraine: State, problems, development prospects, Sbornik nauchnykh trudov DGTU (tekhnicheskie nauki) (Transactions of DSTU (Technical Sciences)), Dneprodzerzhinsk: Dneprodzerzhinskii Gos. Tekh. Univ., 2005, pp. 22–32.
4. Kolesnikov, Yu.A., Bigeev, V.A., and Sergeev, D.S., Modeling of steelmaking in BOF based on physical, chemical and thermal processes, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Chern. Metall., 2017, vol. 60, no. 9, pp. 698–705. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-9-698-705>
5. Різніченко Л.В. Досвід упровадження корпоративних інформаційних систем управління на вітчизняних підприємствах. Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. 2009. Вип. 4(57). Ч.2. С.184-189.
6. Гейзер Г. К. Проблемы повышения эффективности внутризаводского планирования / Г. К. Гейзер // Проблеми економіки та управління у промислових регіонах : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Маріуполь, 2009. – С. 111–112.

7. Boto, F.; Murua, M.; Gutierrez, T.; Casado, S.; Carrillo, A.; Arteaga, A. Data Driven Performance Prediction in Steel Making. *Metals* 2022, 12(2), 172; <https://doi.org/10.3390/met12020172>
8. Van De Putte, L.; Haers, F.; Haers, L.; Vansteenkiste H. Expert system for the control of liquid steel production at Sidmar / *Rev. Met. Paris*, Vol. 96, Issue 6, (1999), pages 721-728, <https://doi.org/10.1051/metal/199996060721>
9. Stein, E. W.; Pauster, M. C. and May, D. A knowledge-based system to improve the quality and efficiency of titanium melting / *Expert Systems with Applications*. Vol. 24. Issue 2, 239 p. (2003) [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(02\)00152-5](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00152-5)
10. Zarandi, M.H.F.; Avazbeigi, M.; Anssari M.H. and Ganji B. (2010) A Multi-Agent Expert System for Steel Grade Classification Using Adaptive Neuro-fuzzy Systems, *Expert Systems, InTech*, URL: <http://www.intechopen.com/books/expert-systems/a-multi-agent-expert-system-for-steel-grade-classification-using-adaptive-neuro-fuzzy-systems> (дата доступу 18.06.2023).
11. Laha, D.; Ren, Y.; Suganthan, P.N. Modeling of steelmaking process with effective machine learning techniques, *Expert Systems with Applications*, Volume 42, Issue 10, 2015, Pages 4687-4696, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.030>
12. Xie, Q.; Suvarna, M.; Li, J.; Zhu, X.; Cai, J.; Wang, X. Online prediction of mechanical properties of hot rolled steel plate using machine learning, *Materials & Design*, Volume 197, 2021, 109201, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109201>
13. Зіборов, І., Желдак, Т. Еволюційний метод пошукової оптимізації на основі рою часток та моделювання штучних імунних систем. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2023, вип. 4, с. 3–12
14. Зіборов І.К., Желдак Т.А. Розробка інтелектуальної систем підтримки прийняття рішень з самонавчанням для керування технологічними процесами виробництва сталі / І.К. Зіборов, Т.А. Желдак // «Системні технології». 3 (140) 2022. – С. 35-46.

REFERENCES

1. *Ukrainskaia metallurhiya: sovremennyye vyzovy i perspektivy razvitiia* / A. Y. Amosha, V. Y. Bolshakov, A. A. Mynaev, Yu. S. Zaloznova, L. A. Zbarazskaia, Yu. V. Makohon y dr.; NAN Ukrainy, Yn-t ekonomiky promyslovosti. — Donetsk, 2013. https://web.archive.org/web/20140517161925/http://iep.donetsk.ua/akadem_sl/sluhannya_po_met/akadem_sluh_met.pdf

2. Osnovy metalurhiinoho vyrobnytstva metaliv i splaviv / Cherneha D. F., Bohushevskiy V. S., Hotvianskyi Yu. Ya. ta in. ; za red. D. F. Chernehy, Yu. Ya. Hotvianskoho. — K. : Vyshcha shkola, 2006. — 503 s.
3. Panteikov, S.P., Upper blowing devices of oxygen converters in Ukraine: State, problems, development prospects, Sbornik nauchnykh trudov DGTU (tekhnicheskie nauki) (Transactions of DSTU (Technical Sciences)), Dneprodzerzhinsk: Dneprodzerzhinskii Gos. Tekh. Univ., 2005, pp. 22–32.
4. Kolesnikov, Yu.A., Bigeev, V.A., and Sergeev, D.S., Modeling of steelmaking in BOF based on physical, chemical and thermal processes, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Chern. Metall., 2017, vol. 60, no. 9, pp. 698–705. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-9-698-705>
5. Riznichenko L.V. Dosvid uprovalzhennia korporatyvnykh informatsiinykh system upravlinnia na vitchyznianskykh pidpriemstvakh. Visnyk KDPU im. M. Ostrohradskoho. 2009. Vyp. 4(57). Ch.2. S.184-189.
6. Heizer H. K. Problemy povysheniia effektivnosti vnutrizavodskoho planirovaniia / H. K. Heizer // Problemy ekonomiki ta upravlinnia u promyslovykh rehionakh: materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii. – Mariupol, 2009. – S. 111–112.
7. Boto, F.; Murua, M.; Gutierrez, T.; Casado, S.; Carrillo, A.; Arteaga, A. Data Driven Performance Prediction in Steel Making. Metals 2022, 12(2), 172; <https://doi.org/10.3390/met12020172>
8. Van De Putte, L.; Haers, F.; Haers, L.; Vansteenkiste H. Expert system for the control of liquid steel production at Sidmar / Rev. Met. Paris, Vol. 96, Issue 6, (1999), pages 721-728, <https://doi.org/10.1051/metal/199996060721>
9. Stein, E. W.; Pauster, M. C. and May, D. A knowledge-based system to improve the quality and efficiency of titanium melting / Expert Systems with Applications. Vol. 24. Issue 2, 239 p. (2003) [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(02\)00152-5](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00152-5)
10. Zarandi, M.H.F.; Avazbeigi, M.; Anssari M.H. and Ganji B. (2010) A Multi-Agent Expert System for Steel Grade Classification Using Adaptive Neuro-fuzzy Systems, Expert Systems, InTech, URL: <http://www.intechopen.com/books/expert-systems/a-multi-agent-expert-system-for-steel-grade-classification-using-adaptive-neuro-fuzzy-systems>.
11. Laha, D.; Ren, Y.; Suganthan, P.N. Modeling of steelmaking process with effective machine learning techniques, Expert Systems with Applications, Volume 42, Issue 10, 2015, Pages 4687-4696, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.030>

12. Xie, Q.; Suvarna, M.; Li, J.; Zhu, X.; Cai, J.; Wang, Kh. Online prediction of mechanical properties of hot rolled steel plate using machine learning, *Materials & Design*, Volume 197, 2021, 109201, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109201>
13. Ziborov, I., Zheldak, T. Evoliutsiinyj metod poshukovoi optymizatsii na osnovi roiu chastok ta modeliuvannia shtuchnykh imunnykh system. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2023, vyp. 4, s. 3–12
14. Ziborov I.K., Zheldak T.A. Rozrobka intelektualnoi system pidtrymky pryiniattia rishen z samonavchanniam dlia keruvannia tekhnolohichnymy protsesamy vyrobnytstva stali / I.K. Ziborov, T.A. Zheldak // «Systemni tekhnolohii». 3 (140) 2022. – S. 35–46.

Received 08.04.2024.
Accepted 11.04.2024.

Information technologies of management decisions supporting in the rolled metal manufacturing

The purpose of the study is the development of information technology to support management decisions in the processes of charging, deoxidation and mechanical properties forecasting of rolled metallurgy finished products, based on the hybrid evolutionary method of multi-criteria optimization.

The information technology basis for management decisions supporting in rolling production is the integrated decision support system (DSS) for the management of multi-stage rolling production. The DSS approaches are described in detail in [14]. The proposed information technology includes range of tasks to optimize charge, ferroalloys usage, and the mechanical properties of finished products forecasting model. The optimal solutions of defined problems are considered to be real number vectors in the result of the HIPSO method applying, which describe parameters in accordance with the mathematical model of the problem. The functions of information technology, respectively, should consist of the determination, storage, and transfer of mathematical models of problems, as well as receiving, processing and storage of data being the output of appropriate optimization problem or solution result.

The information technology was validated on the example of decisions made by the operator of the converter shop of PLC "DMZ" in Dnipro during 2018 - 2019 (12,039 melting) to produce six steel grades.

At the considered meltings, the cost of steel, obtained by applying information technology, decreased in comparison to calculated charging according to the traditional method, by 2.4-2.5% while performing large orders; by 3-4% - while producing small ones. The economic effect at least at the stage of charging of the information technology

implementation could be at least at the stage of charging from 904 to 1,413 thousand UAH per month for two-shift work.

The implementation of the proposed information technology to support management decisions during the deoxidation of steel and establish the dependence between mechanical properties and finished products on the chemical composition of the heated steel in the oxygen converter allows to significantly increase the physical correspondence of the models to the processes. At the same time, the applied penalty function on the dimension of the approximation polynomial enabled to obtain the models of optimal complexity through self-organization. The economic effect of saving ferroalloys (in 2021 prices) on 4,013 melting of the test sample amounted to UAH 4.626 million, which provides monthly savings at the level of UAH 578.18 thousand, annual savings of about UAH 6.938 million.

Key words: information technology, information support, decision support, evolutionary algorithm, classification, forecasting, optimization, activity diagram.

Зіборов Ілля Кирилович – аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.

Ziborov Illia Kyrylovych – post graduate student, Dnipro University of Technology, Ukraine.

О.А. Інкін, О.В. Погорелов

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЕГ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Анотація. У статті розглядається питання використання деяких моделей нейромереж для моделювання електроенцефалографічного сигналу. Для отримання та обробки чи сельних значень ЕЕГ пропонується використовувати мову Julia та розроблений на основі неї пакет Flux. Наведені обраховані показники втрат дозволили визначити найбільш оптимальний підхід для моделювання як епілептичних, так і неепілептичних типів ЕЕГ.

Ключові слова: нейромережа, електроенцефалографія, часовий ряд, рекурентний слой, функція втрат, LSTM, DARNN, LSTnet, TPA, Julia, EDF, Flux.

Постановка проблеми. З плином часу населення старіє, що вимагає більшої уваги до медичного догляду, вдосконалення та автоматизації рутинних методів ведення медичних справ. Одночасно з цим спостерігається постійне удосконалення технологій, зокрема в галузі медичної інтенсивної терапії та нейрокритичної допомоги. Застосування методів моніторингу ЕЕГ (електроенцефалографії) стає все більш важливим у лікуванні важких захворювань. Лікарям-неврологам та реаніматологам необхідно використовувати об'єктивний моніторинг мозкової активності, щоб швидко та ефективно робити висновки щодо стану пацієнта і планувати подальше лікування.

Проте, цей процес часто вимагає значних зусиль та може бути вирішальним для пацієнта. Відсутність або недостатня інформація про зміни в мозковій активності може призвести до серйозних наслідків. У зв'язку з цим виникає необхідність в розвитку нових методів аналізу даних, які дозволяють виявляти складні взаємозв'язки у великих обсягах інформації.

В цьому контексті виникає ідея використання нейромереж для аналізу електроенцефалографічних сигналів. Вони можуть ефективно обробляти великі обсяги даних і покращити точність та швидкість аналізу мозкової активності, що є критичним у неврологічних та реанімаційних відділеннях. На основі цього дослідження було розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє моделювати ЕЕГ та може слугувати частиною автоматизованого аналізу сигналів пацієнта та покращити швидкість прийняття рішень щодо лікування пацієнтів.

Мета дослідження. Визначити та запропонувати незалежний, оптимальний нейромережевий підхід, який дозволить проаналізувати часовий ряд отриманий в ході зняття показників ЕЕГ та звернути увагу на наявні проблеми в реалізації моделювання подібних процесів.

Огляд проблеми та її аналіз. Однією з основних проблем є необхідність швидкого та точного визначення стану пацієнта на основі ЕЕГ-сигналів у ситуаціях, коли кожна секунда має вирішальне значення. Традиційні методи аналізу ЕЕГ, які ґрунтуються на візуальному спостереженні та експертній оцінці, часто не забезпечують необхідного рівня швидкості та точності, особливо в умовах неврологічної екстреної допомоги. Ще однією проблемою є складність інтерпретації ЕЕГ-сигналів через їхню високу залежність від індивідуальних особливостей пацієнта та специфічних умов вимірювання. В зв'язку з цим, дану проблему можна інтерпретувати мовою динаміки, як проблема виникнення хаосу.

Хаос виникає через експоненціальну чутливість системи до початкових умов, при чому точне передбачення хаотичної просторово-часової поведінки є складним, в більшості випадках, неможливим процесом. Оскільки чисельні обчислення можуть бути обчислювально дорогими, а вимірювання датчиків часто обмежені, забезпечуючи лише часткове спостереження динамічної поведінки. Ці часткові спостереження можуть призвести до неправильного уявлення неспостережуваних (прихованих) змінних або інших довгострокових фізичних властивостей, що ще більше ускладнює моделювання та прогнозування систем.

Передбачуваність і стабільність хаотичної системи характеризуються її дотичним простором, який можна охарактеризувати за допомогою показників Ляпунова, які вимірюють експоненціальну швидкість поділу траєкторій. Геометрична характеристика забезпечується коваріантними векторами Ляпунова, які становлять коваріантний базис дотичного простору та вказують на напрямки асимптотичного розширення та звуження динамічної системи, що моделюється. Збереження цих властивостей стабільності має вирішальне значення при створенні сурогатних моделей від обмежених спостережень до більш повного набору даних.

Нейронні мережі — це виразні нелінійні представлення безперервних функцій, які можуть витягувати закономірності з даних і, після навчання, надавати обчислювально дешеві прогнози.

У зв'язку з цим, використання програмних засобів моделювання ЕЕГ з використанням нейронних мереж є актуальним напрямком досліджень. Це доз-

волисть автоматизувати процес аналізу ЕЕГ сигналів, знижуючи тим самим час, необхідний для отримання результатів, та забезпечуючи більш точні та об'єктивні висновки. Нейронні мережі мають потенціал для виявлення складних зв'язків у динаміці мозкової активності та прогнозування можливих патологічних станів. Їхнє використання може значно полегшити роботу клініцистів та покращити якість наданої медичної допомоги в галузі неврології та реанімації.

Для проведення досліджень та аналізу роботи програмного забезпечення було використано показники ЕЕГ з бази даних Національного центр штучного інтелекту в Ісламбаді [1].

У роботі використовувалося програмне забезпечення Visual Studio Code, розробка і реалізація виконувалась на мові математичних розрахунків Julia з використанням бібліотек Flux, ChaosTools, PyMNE під ОС Windows.

Опис наданих даних ЕЕГ. Для дослідження часових рядів ЕЕГ за допомогою нейромереж була використана унікальна база реальних даних. Вона включала інформацію 2 пацієнтів:

Пацієнт 1. 12 років, аномальний стан, ЕЕГ знято - 10.04.2021, 22:50:49.

Пацієнт 2. 23 роки, нормальний стан, ЕЕГ знято - 10.04.2021, 15:57:16.

Форматування та обробки даних. Електроенцефалографія (ЕЕГ) — це метод, який вимірює просторовий розподіл полів напруги на шкірі голови та їх зміну з часом. Вважається, що причиною цієї активності є флуктуаційна сума збуджувальних і гальмівних постсинаптичних потенціалів. Ці потенціали виникають в основному з апікальних дендритів пірамідних клітин у зовнішньому (поверхневому) шарі кори головного мозку та модифікуються вхідними даними від підкоркових структур, зокрема таламуса та висхідних проєкцій висхідної ретикулярної системи активації. Структури в таламусі служать «кардіостимулятором». Це забезпечує поширену синхронізацію та ритмічність коркової активності в півкулях головного мозку. Дендритні генератори орієнтовані вертикально і мають два полюси, один відносно негативний, а інший відносно позитивний, які називаються диполем. Диполі - це джерела електричного струму, що складаються з двох зарядів протилежної полярності, розділених відносно невеликими відстанями. Оскільки церебральні потенціали виробляються дендритними генераторами, радіально орієнтованими на поверхню, скальповий електрод зазвичай виявляє лише один кінець генератора в один момент часу. Загалом приблизно 10 см² кори має розряджатися синхронно, щоб сигнал цінювався на ЕЕГ шкіри голови.

Більшість апаратних засобів запису ЕЕГ дозволяють експортувати дані у European Data Format (EDF) для подальшого аналізу. Європейський формат даних — це простий і гнучкий формат для обміну та зберігання багатоканальних біологічних і фізичних сигналів [3].

Для подальшої роботи з отриманим форматом даних на програмному рівні було розроблено алгоритм читання необхідних даних з урахуванням фільтрів та класифікації даних по відповідним каналам. Дана задача вирішена з використанням комбінації Julia бібліотек EDF та OndaEDF. Перша бібліотека дозволяє отримати безпосередній доступ до даних та декодувати їх в обраному форматі. Друга бібліотека дозволяє створити структуру з отриманих даних та виділити лише канали з певних електродів. Також, за допомогою бібліотеки РумNE було візуалізовано отримані дані з накладанням відповідних фільтрів (рис. 1).

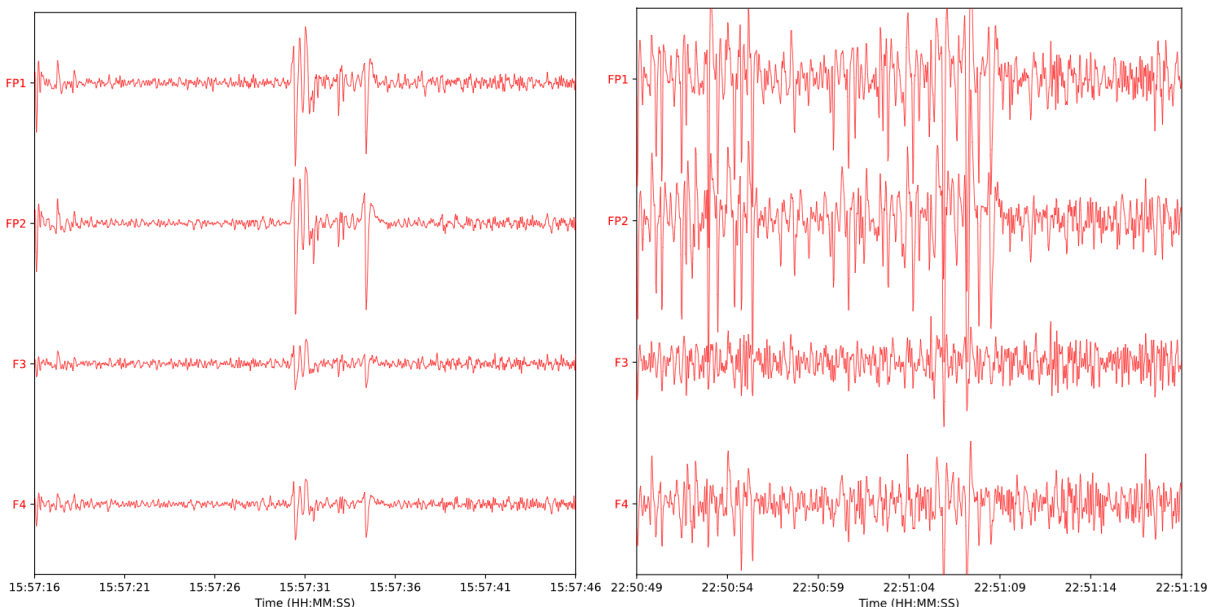


Рисунок 1 - Канали FP1, FP2, F3, F4 обох пацієнтів;

зліва – аномальний стан; справа – нормальний стан

Ідентифікація та побудова нейромережевих моделей. Мережа довготривалої короткочасної пам'яті, або LSTM, є різновидом рекурентної нейронної мережі. Повторювані нейронні мережі, або скорочено RNN, є особливим типом нейронних мереж, призначених для вирішення проблем числових послідовностей. Враховуючи стандартну мережу прямого зв'язку, RNN відрізняється додаванням петель до архітектури. Наприклад, у певному шарі кожен нейрон може передавати свій сигнал пізніше (вбік) на додаток до наступного шару. Періодичні підключення додають стан або пам'ять мережі та

дозволяють їй навчатися та використовувати впорядкований характер спостережень у вхідних послідовностях. Додавання послідовності є новим виміром для апроксимованої функції. Замість того, щоб відображати входи лише на виходи, мережа здатна вивчати функцію відображення для входів. Внутрішня пам'ять може означати, що виходи залежать від останнього контексту в послідовності введення, а не від того, що щойно було представлено як вхідні дані для мережі. У певному сенсі ця можливість дає змогу нейронним мережам моделювати часові ряди.

Для різного роду задач використовують певним чином змінену структуру LSTM моделі. В цій роботі розглянуто та використано наступні три інтерпретації:

1. Dual-Stage Attention-Based Recurrent Neural Network (DARNN) – двоступенева мережа з блоком уваги. Починаючи зі структури кодера-декодера, ця модель складається з двох блоків, один називається механізмом уваги введення, інший - механізмом тимчасової уваги [4]. Механізм введення уваги передає вхідні дані в мережу LSTM. У подальших обчисленнях використовується лише його прихований стан, де додаткові мережеві рівні намагаються оцінити важливість різних прихованих змінних. Механізм тимчасової уваги приймає прихований стан мережі кодера та поєднує його з прихованим станом іншого декодера LSTM. Додаткові мережеві рівні знову намагаються оцінити важливість прихованих змінних кодера та декодера разом. Лінійні шари об'єднують результати різних шарів у кінцевий прогноз часового ряду (рис. 2-3).

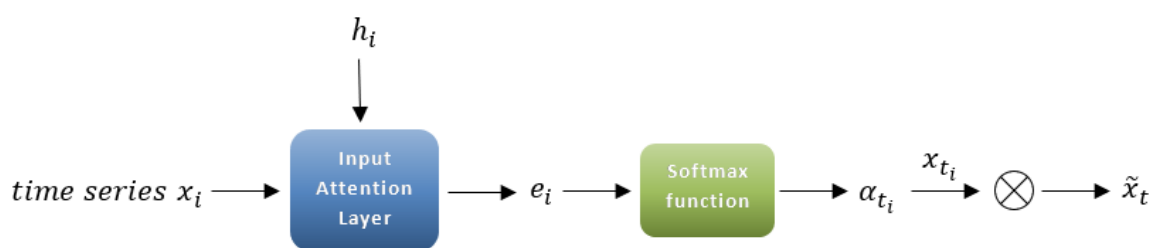


Рисунок 2 – Механізм уваги

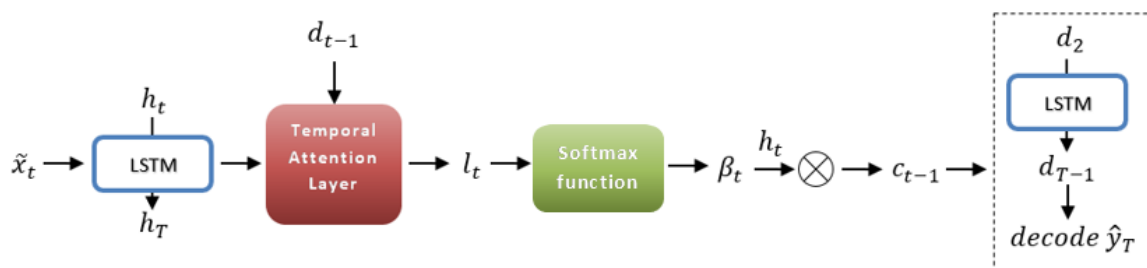


Рисунок 3 – Тимчасовий механізм уваги

2. Long- and Short-term Time-series network (LSTnet) [5]. LSTNet використовує нейронну згорткову мережу CNN і рекуррентну нейронну мережу (RNN) для вилучення короткострокових локальних функцій залежності між змінними та виявлення довгострокових функцій для тенденції часового ряду (рис. 4).

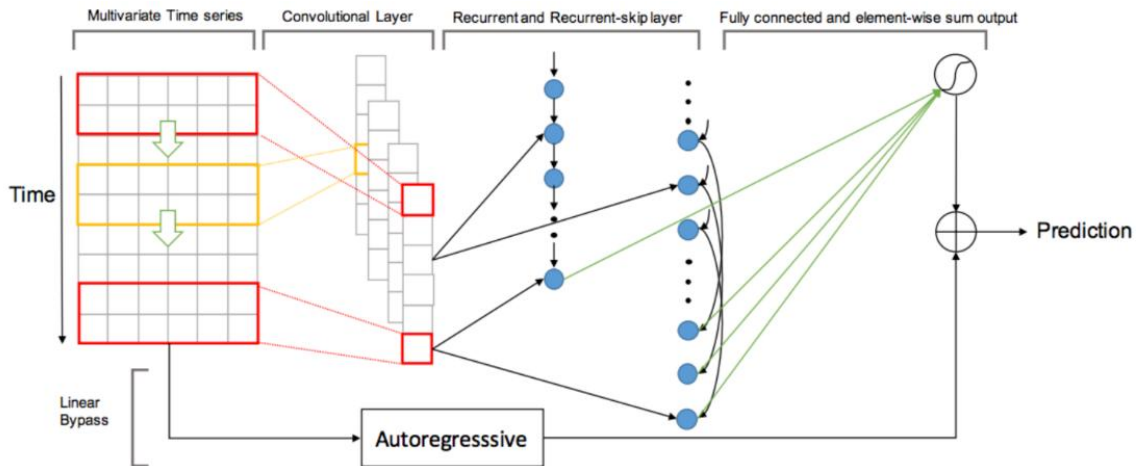


Рисунок 4 – Структура LSTnet моделі

3. Temporal Pattern Attention LSTM (TPA-LSTM) [6]. Має кращу продуктивність, ніж LSTnet, з додатковою перевагою в тому, що механізм уваги автоматично намагається визначити важливі частини часового ряду, замість того, щоб вводити параметри, які повинні бути оптимізовані користувачем (рис. 5).

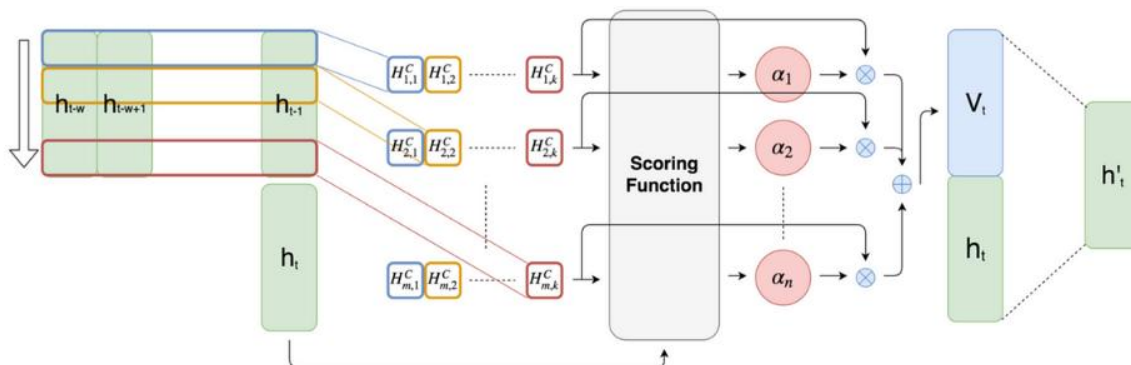


Рисунок 5 – Структура TPA-LSTM

Реалізація нейромереж та їх прогнозування. Кожна ітерація навчання нейромереж передбачає додавання вузла прихованого рівня j із вхідним вектором ваги $W(j)$, рівним вхідному вектору - екземпляру навчання, що

мінімізує помилку. Навчання припиняється, коли виконується будь-яка з двох умов:

1) стохастичне стаціонарне вбудовування знижується до граничного значення конвергенції, визначеного чисельним експериментом, щоб збалансувати помилки навчання та тестування та уникнути перетренованості;

2) кількість вузлів стає рівною кількості екземплярів навчання. Для даних ЕЕГ, використаних у цьому дослідженні, було отримано граничне значення конвергенції 0,001.

Продемонструємо роботу кожної із запропонованих у цій роботі моделі на даних обох пацієнтів з однаковими початковими параметрами та наведемо порівняльну характеристику.

Для DARNN моделі використовується мініпакетний стохастичний градієнтний спуск разом з оптимізатором Adam для навчання моделі. Розмір міні-пакета становить 128 (рис. 6-7). Швидкість навчання починається з 0,001 і зменшується на 10% після кожних 10 000 ітерацій. Дана модель є гладкою та диференційованою, тому параметри можна дізнатися за допомогою стандартного зворотного розповсюдження із середньоквадратичною помилкою як цільовою функцією. У DARNN є три параметри, кількість часових кроків у вікні (poollength), розмір прихованих станів для кодера (encodersize) і розмір прихованих станів для декодера (decodersize). Для найкращої продуктивності poollength = 10, encodersize = decodersize = 16.

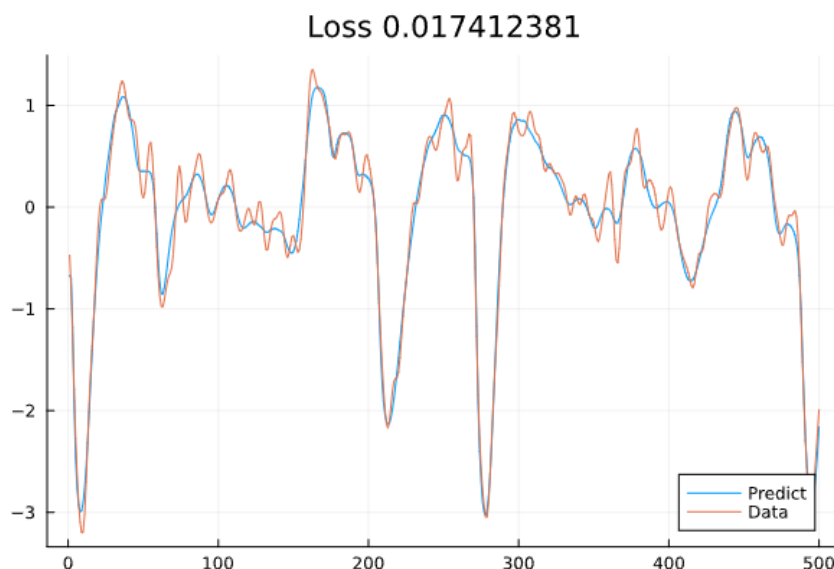


Рисунок 6 - DARNN модель для аномального ЕЕГ

Loss 0.021080276

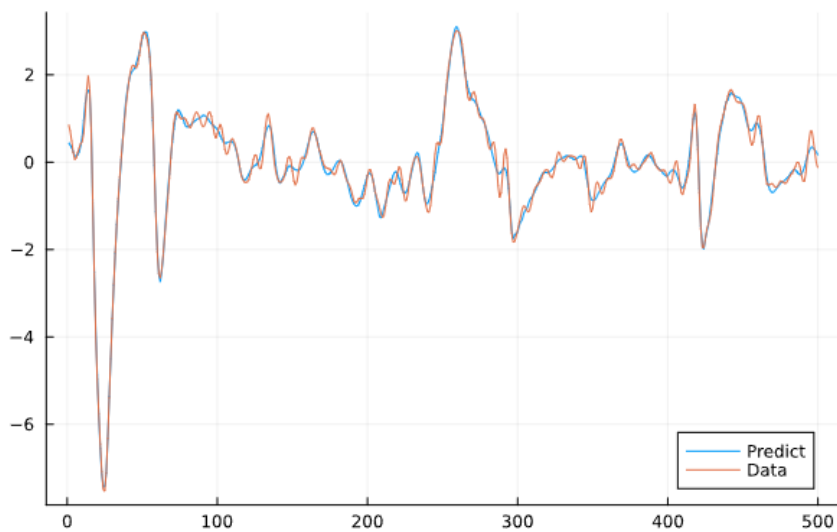


Рисунок 7 - DARNN модель для нормального EEG

Для LSTnet мережі необхідно обрати розмір прихованого згорткового шару (convlayer) та рекурентного (reclayer) для досягнення максимальної продуктивності моделі (рис. 8-9). З проведених досліджень було виведено найбільш ефективні значення даних параметрів convlayer = 50, reclayer = 100 для відповідного значення рівня рекурентного пропуску (recurrent-skip = 24).

Loss 0.5298965

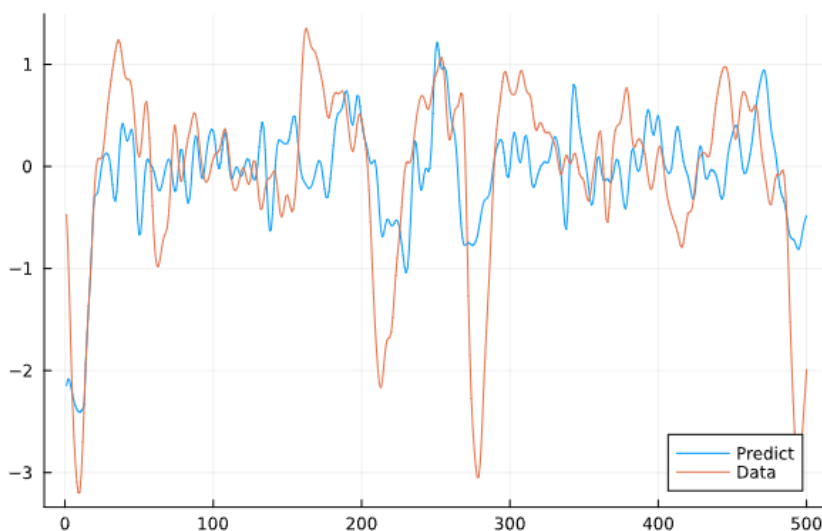


Рисунок 8 - LSTnet модель для аномального EEG

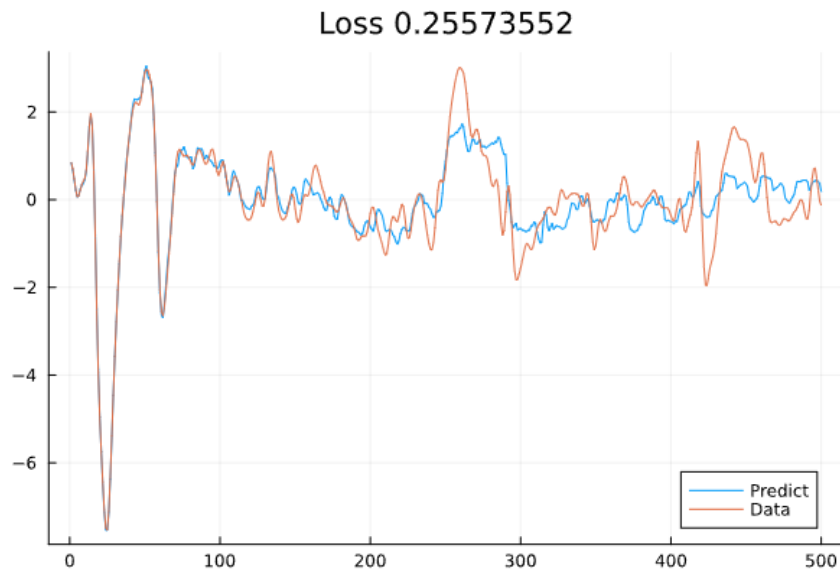


Рисунок 9 - LSTnet модель для нормального ЕЕГ

Для ТРА моделі було проведено пошук по сітці оптимальних параметрів і обрано розмір вікна рівний 24, діапазон для кількості прихованих одиниць – 30, діапазон кроку експоненціального зниження швидкості навчання обрано за 500 (рис. 10-11).

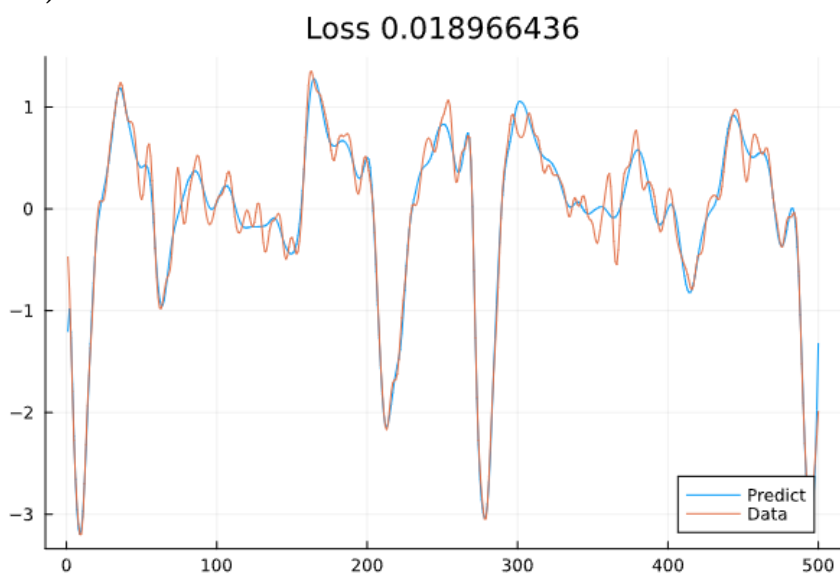


Рисунок 10 - ТРА-LSTM модель для аномального ЕЕГ

Loss 0.037689354

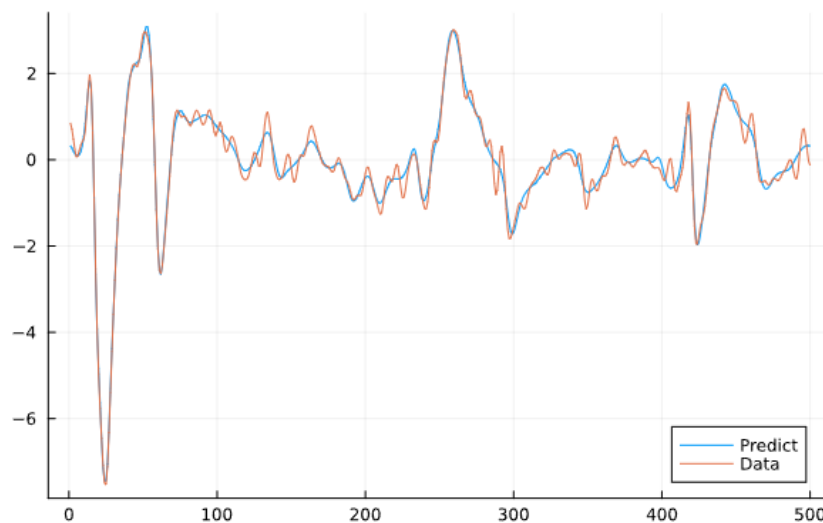


Рисунок 11 - TPA-LSTM модель для нормального EEG

Порівняльну характеристику результатів моделювання та навчання використаних нейромереж відносно їх показників функції можна побачити в підсумковій таблиці 1.

Таблиця 1

Model	Loss function		Time
	normal	abnormal	
DARNN	0,02108	0,01741	$\approx 1,4 \frac{sec}{step}$
LSTnet	0,2557	0,5299	$\approx 0,9 \frac{sec}{step}$
TPA-LSTM	0,03769	0,01897	$\approx 18 \frac{sec}{step}$

Можно відмітити, що використання DARNN та TPA моделей мають найменше значення помилки та відхилення від заданого часового ряду даних та майже не залежить від стану пацієнта. Однак, якщо порівняти часовий простір, то TPA прогнозування набагато програє всім іншим представленим моделям. Тому, оптимально використовувати сам DARNN підхід для моделювання даних EEG та подальшого прогнозування.

Висновки. 1. У роботі наведено нейромережеві моделі, які було використано для моделювання EEG-сигналу з визначенням оптимальних параметрів та їх порівняльної характеристики.

2. Аналіз отриманої інформації дозволив визначити оптимальний підхід для подальшого моделювання та прогнозування складних хаотичних часових рядів.

3. Відмінність між типами ЕЕГ, нормальним станом та аномальним, не має особливого значення при моделюванні використовуючи DARNN підхід та потребує додаткового дослідження для виділення відповідних ознак.

ЛІТЕРАТУРА

1. National Center of Artificial Intelligence, NUST, Islamabad. [Online] Available: <https://dll.seecs.nust.edu.pk>.
2. Lawrence J. Hirsch, Richard P. Brenner, Atlas of EEG in Critical Care// Wiley–Blackwell, New York, 2010. ISBN: 978-0-470-98786-5
3. Kemp, B., Värri, A., Rosa, A. C., Nielsen, K. D., & Gade, J. (1992). A simple format for exchange of digitized polygraphic recordings. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 82(5), 391–393. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(92\)90009-7](https://doi.org/10.1016/0013-4694(92)90009-7)
4. Yao Qin, Dongjin Song, Haifeng Chen, Wei Cheng, Guofei Jiang, and Garrison Cottrell. 2017. A dual-stage attention-based recurrent neural network for time series prediction. *arXiv preprint arXiv:1704.02971(2017)*.
5. Lai, G., Chang, W.-C., Yang, Y., & Liu, H. (2018). Modeling long- and short-term temporal patterns with deep neural networks. The 41st International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval.
6. Shih, SY., Sun, FK. & Lee, Hy. Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting. *Mach Learn* 108, 1421–1441 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05815-0>
7. Belozyorov V. Y., Inkin O. A. (2023). Systems of singular differential equations as the basis for neural network modeling of chaotic processes. *Journal of Optimization, Differential Equations and Their Applications*, 31(2), 24. <https://doi.org/10.15421/142309>

REFERENCES

1. National Center of Artificial Intelligence, NUST, Islamabad. [Online] Available: <https://dll.seecs.nust.edu.pk>.
2. Lawrence J. Hirsch, Richard P. Brenner, Atlas of EEG in Critical Care// Wiley–Blackwell, New York, 2010. ISBN: 978-0-470-98786-5
3. Kemp, B., Värri, A., Rosa, A. C., Nielsen, K. D., & Gade, J. (1992). A simple format for exchange of digitized polygraphic recordings. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 82(5), 391–393. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(92\)90009-7](https://doi.org/10.1016/0013-4694(92)90009-7)
4. Yao Qin, Dongjin Song, Haifeng Chen, Wei Cheng, Guofei Jiang, and Garrison Cottrell. 2017. A dual-stage attention-based recurrent neural network for time series prediction. *arXiv preprint arXiv:1704.02971(2017)*.

5. Lai, G., Chang, W.-C., Yang, Y., & Liu, H. (2018). Modeling long- and short-term temporal patterns with deep neural networks. The 41st International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval.
6. Shih, SY., Sun, FK. & Lee, Hy. Temporal pattern attention for multivariate time series forecasting. Mach Learn 108, 1421–1441 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05815-0>
7. Belozyorov V. Y., Inkin O. A. (2023). Systems of singular differential equations as the basis for neural network modeling of chaotic processes. Journal of Optimization, Differential Equations and Their Applications, 31(2), 24. <https://doi.org/10.15421/142309>

Received 09.04.2024.

Accepted 12.04.2024.

EEG simulation using deep neural networks

Electroencephalography (EEG) is a method that measures the spatial distribution of voltage fields on the skin heads and their change over time. It is believed that the reason for this activity is fluctuating sum of excitatory and inhibitory postsynaptic potentials. Application of EEG monitoring methods becomes everything more important in the treatment of serious diseases. However, this process often requires considerable effort and can be crucial for the patient. In this context, the idea of using neural networks for analysis of electroencephalographic signals. They can effectively process large amounts of data and improve accuracy and speed brain activity analysis. Based on this research was developed software that allows EEG simulation and can serve as part of automated patient signal analysis and improve the speed of decision-making regarding patient treatment. For this kind of task, the prediction of EEG behavior by some varieties of neural network LSTM model was evaluated and analyzed, namely, DARNN, LSTnet, TPA.

Keywords: neural network, electroencephalography, time series, recurrent layer, loss function, LSTM, DARNN, LSTnet, TPA, Julia, EDF, Flux.

Інкін Олександр Андрійович – аспірант, кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Погорєлов Олексій Вікторович - доктор медичних наук, професор кафедри неврології Дніпровського державного медичного університету.

Inkin Oleksandr – postgraduate student, department of computer technologies, Oles Honchar Dnipro National University..

Pohorielov Oleksiy - Doctor of Medical sciences, professor of the department of neurology, Dnipro State Medical University.

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. У цій роботі проведено огляд алгоритмів ройового інтелекту, висвітлюючи значний потенціал та перспективи розвитку мультиагентних систем та ройового інтелекту. Підкреслюється тривала дослідницьку активність у цій галузі та безперервне розширення сфер застосування. Вивчаючи різні дослідження та публікації, робиться висновок про важливість інтеграції підходів з різних наукових дисциплін для вирішення різноманітних і складних проблем за допомогою ройового інтелекту. Майбутні дослідження спрямовані на надання більш детального аналізу та порівняння різних алгоритмів ройового інтелекту у різних сферах застосування.

Ключові слова: штучний інтелект, інтелектуальний агент, мультиагентні системи, ройовий інтелект, алгоритми оптимізації ройового інтелекту.

Вступ. В даний час, мультиагентні системи все частіше використовуються у широкому спектрі наукових та технічних областей, стаючи ключовим елементом в еволюції та розвитку сучасних технологій.

Це особливо актуально під час військових конфліктів, коли потреба в самостійних системах з розвиненими можливостями інтелектуального керування значно зростає, що підкреслює важливість та актуальність розвитку мультиагентних систем.

Ця технологія вже використовується в безпілотних літальних апаратах, які експлуатуються у військовій сфері, сільському господарстві, сферах пошуку та рятування, будівництві та екологічному моніторингу.

Аналітичні дані [Ошибка! Источник ссылки не найден.] вказують на те, що обсяг ринку військових безпілотних літальних апаратах в 2022 році становив приблизно 12,55 мільярди доларів США, в 2023 - збільшився до 14,14 мільярдів доларів США в 2023 році і продовжить збільшуватися до 35,60 мільярдів доларів США до 2030 року, з середнім річним темпом зростання на рівні 14,10%.

Серед ключових гравців на цьому ринку вирізняються такі компанії, як Lockheed Martin, Northrop Grumman, General Atomics, і Boeing. Швидке зростан-

ня попиту на військові дрони свідчить про значну увагу та інвестиції в дану область, а також про масове застосування дронів у військових цілях. Такий інтерес обумовлений сучасними військовими конфліктами (повномасштабне вторгнення Росії в Україну з 24 лютого 2022 року та терористичні атаки Хамасу проти Ізраїлю з 7 жовтня 2023 року), а також стрімким розвитком у галузі штучного інтелекту в останні роки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для кращого розуміння наступного матеріалу рекомендується ознайомитися з термінами, що будуть подані нижче.

Складна система - це система, що складається з численних компонентів, між якими існує значна кількість взаємозв'язків, через що поведінка кожного окремого компонента залежить від поведінки інших [2].

Агент - автономна сутність, яка може бути реальною або віртуальною, що функціонує в зовнішньому середовищі. Агент здатний сприймати середовище та взаємодіяти з ним. Також агент може комунікувати з іншими агентами, демонструвати самостійну поведінку, яка може бути інтерпретована як результат його знань, взаємодії з іншими агентами та досягнення власних цілей.

Елементи, за допомогою яких агенти сприймають зовнішнє середовище, зазвичай називають сенсорами, а засоби, якими агенти впливають на середовище, – ефекторами або актуаторами. Під це визначення підпадає чимало сутностей – від комп'ютерних програм і роботів до людей.

Мультиагентна система – це складна система, яка переважно складається з агентів.

У книзі "Штучний інтелект: Сучасний підхід" авторів Стюарта Рассела та Пітера Норвіга [3], яка вважається однією з найавторитетніших і найпопулярніших праць у галузі штучного інтелекту, представлена класифікація агентів за рівнем їхньої "інтелектуальності". За визначенням авторів, ця класифікація охоплює усі агентні системи:

1. Прості рефлекторні агенти, що виконують дії на основі свого поточного сприйняття. Вони здатні діяти ефективно лише тоді, коли середовище повністю спостережуване.

2. Рефлекторні агенти з внутрішньою моделлю. Цей вид агентів включає в себе модель невидимої на даний час частини середовища, зокрема, враховує дані про попередні сприйняття та дії агента. Такі агенти здатні функціонувати в середовищі, яке спостерігається лише частково.

3. Агенти, орієнтовані на досягнення цілей. Цей тип включає в себе агентів з моделлю, які володіють знаннями про конкретні цілі, тобто набором станів, які вони прагнуть досягти.

4. Агенти, засновані на корисності. Такі агенти під час своєї діяльності прагнуть максимізувати функцію корисності, яка дозволяє їм ранжувати потенційні стани, в яких агент може опинитися, згідно з їх корисністю.

5. Агенти, що навчаються. Цей тип агентів здатен функціонувати у спочатку невідомих середовищах, поступово збираючи дані про найбільш ефективні стратегії поведінки.

У ряді досліджень, мультиагентні системи вивчаються в контексті класичної теорії управління під назвою "мережеве управління". Такий підхід об'єднує класичні інструменти теорії керування з методами теорії графів. Наприклад, у роботі [4] зазначається, що такі задачі керування, як управління групою роботів, розподілений інтелект, інтелект зграї, розподілене прийняття рішень, розподілене пізнання, керування перевантаженнями в мережах, колективний рух у біології, синхронізація осциляторів у фізиці, паралелізація в теорії оптимізації, розподілена оцінка, спільна оцінка, рівновага в економіці, моделювання соціальних взаємодій та теорія ігор можуть бути розглянуті через теорію взаємопов'язаних динамічних систем.

Ці наукові галузі науки мають декілька перетинаючихся дослідницьких спільнот, що призводить до розмаїття у визначеннях і методологіях, варіюючи від детального математичного аналізу до практичних досліджень. Через це також існує відсутність уніфікованої термінології: так, динамічні системи можуть отримувати такі назви як роботи, агенти, вузли, процесори чи об'єкти. Групи описуються, як мережі, загони, рої, команди або кластери, а методики можуть бути представлені як контролери, протоколи або динаміки. У згаданому джерелі слово «агент» вживається для опису окремої динамічної системи, тоді як терміни «мережа» або «колектив» використовуються для опису груп. Викладаються проблеми знаходження консенсусу, організації структури, оптимізації розподілу ресурсів через поняття динамічних систем.

Ройовий інтелект - це тип мультиагентних систем, надихнутих природою, де багато простих агентів працюють разом, імітуючи поведінку природних роїв, таких як рої комах, зграї птахів, та інших тварин. Ці агенти взаємодіють між собою та з оточенням за допомогою простих правил, що дозволяє їм разом вирішувати складні задачі.

Ціль та постановка завдання. У даній статті буде акцентована увага на ройовому інтелекті, як на ключовому напрямку в галузі мультиагентних систем, особливо зосереджуючись на взаємодії між агентами, як на фундаментальному елементі в галузі мультиагентних систем.

Основна увага буде зосереджена на алгоритмах ройового інтелекту, їх застосуванні для вирішення складних оптимізаційних та координаційних задач, а також на потенціалі ройового інтелекту для розробки нових технологій у різних областях, включаючи робототехніку, розподілені обчислення, управління трафіком та інші.

Матеріал дослідження. Ройовий інтелект є однією з галузей штучного інтелекту, яка динамічно розвивається. Як попередників ройового інтелекту можна згадати три алгоритми: алгоритм стохастичного дифузійного пошуку (SDS - Stochastic Diffusion Search), мурашиний алгоритм (ACO - Ant Colony Optimization) та метод рою часток (PSO - Particle Swarm Optimization).

Алгоритми ройового інтелекту - приклад того, як природні процеси та поведінка можуть бути адаптовані для вирішення складних завдань у сферах оптимізації, пошуку та інших обчислювальних задачах.

Сімейство алгоритмів ройового інтелекту продовжує розширюватися. У книзі Адама Словіка надано перелік 45 алгоритмів[5] впорядкованих за датою створення (Таблиця 1).

Таблиця 1

Перелік алгоритмів оптимізації ройового інтелекту

Назва алгоритма	Рік	Біологічне натхнення
Стохастичний дифузійний пошук (Stochastic Diffusion Search)	1989	Механізм тандемного зв'язку, використовуваний одним видом мурах
Оптимізація колонії мурах (Ant Colony Optimization)	1992	Реальні колонії мурах, які використовують феромон як засіб хімічного посланника
Оптимізація роєм частинок (Particle Swarm Optimization)	1995	Соціальна поведінка зграї птахів або школи риб
Система бджіл (Bee System)	2001	Поведінка збирання нектару колоніями бджіл
Бактеріальний пошук (Bacterial Foraging)	2002	Соціальна поведінка здобування їжі <i>Escherichia coli</i>
Алгоритм рою риб (Fish-	2002	Поведінка риб, така як полювання та формування

Назва алгоритма	Рік	Біологічне натхнення
swarm Algorithm)		зграї
Бджолиний вулик (Beehive)	2004	Комунікативні та оціночні методи та процедури медоносних бджіл
Хемотаксис колонії бактерій (Bacterial Colony Chemotaxis)	2005	Реакція бактерій на хемоатрактанти
Оптимізація колонією бджіл (Bee Colony Optimization)	2005	Колонії бджіл у природі
Оптимізація роєм бджіл (Bee Swarm Optimization)	2005	Поведінка реальних бджіл у природі
Віртуальні бджоли (Virtual Bees)	2005	Рій бджіл та взаємодії між ними, коли вони знаходять нектар
Рій котів (Cat Swarm)	2006	Поведінка котів та їхні навички, такі як слідкування та пошук
Штучна колонія бджіл (Artificial Bee Colony)	2007	Природна поведінка збирання їжі реальними медоносними бджолами
Швидке бактеріальне зграювання (Fast Bacterial Swarming)	2008	Механізм здобування їжі Escherichia coli та модель зграювання птахів
Шмели (Bumblebees)	2009	Колективна поведінка соціальних комах
Пошук кукушки (Cuckoo Search)	2009	Паразитична поведінка деяких видів кукушок
Алгоритм світляків (FireFly Algorithm)	2009	Поведінка світляків та їх світіння
Оптимізація роєм світлячків (Glowworm Swarm Optimization)	2009	Світіння, індуковане люциферином, світляка, яке використовується для приваблення партнерів/здобичі
Штучний алгоритм рибної школи (Artificial Fish School Algorithm)	2010	Поведінка риб, така як полювання, формування зграї, слідування
Алгоритм кажана (Bat Algorithm)	2010	Характеристики ехолокації мікрокажанів

Назва алгоритма	Рік	Біологічне натхнення
Оптимізація роєм тарганів (Cockroach Swarm Optimization)	2010	Соціальна поведінка тарганів
Пошук під час полювання (Hunting Search)	2010	Групове полювання тварин, таких як леви, вовки та дельфіни
Оптимізація колонією бактерій (Bacterial Colony Optimization)	2012	П'ять основних поведінок бактерій Escherichia coli протягом їхнього життєвого циклу
Сліпі голі кроти (Blind-Naked Mole-Rats)	2012	Соціальна поведінка колонії сліпих голих кротів
Стадо криля (Krill Herd)	2012	Поведінка стада криля
Алгоритм лева (Lion's Algorithm)	2012	Соціальна поведінка левів, яка допомагає зберегти тварину сильною у світі
Пошук вовків (Wolf Search)	2012	Вовки шукають їжу та виживають, уникаючи ворогів
Оптимізація мухою (Fruit Fly Optimization)	2013	Поведінка мух-плодоїдів
Оптимізація соціальними павуками (Social Spider Optimization)	2013	Кооперативна поведінка соціальних павуків, які взаємодіють один з одним
Оптимізація роєм курей (Chicken Swarm Optimization)	2014	Поведінка курей під час пошуку їжі
Оптимізація розсіяними мухами (Dispersive Flies Optimisation)	2014	Поведінка рою мух над джерелами їжі
Оптимізатор сірих вовків (Grey Wolf Optimizer)	2014	Імітує соціальну домінуючу структуру зграї сірих вовків
Ведення слонів (Elephant Herding)	2015	Поведінка стада слонів
Оптимізація монарх-метеликів (Monarch Butterfly Optimization)	2015	Міграція монарх-метеликів

Назва алгоритма	Рік	Біологічне натхнення
Алгоритм пошуку ворон (Crow Search Algorithm)	2016	Інтелектуальна поведінка ворон
Алгоритм рою дельфінів (Dolphin Swarm Algorithm)	2016	Ехолокація дельфінів, обмін інформацією, співпраця
Динамічний віртуальний алгоритм кажанів (Dynamic Virtual Bats Algorithm)	2016	Здатність кажанів маніпулювати частотою/довжиною хвилі випромінюваних звукових хвиль
Алгоритм оптимізації китів (Whale Optimization Algorithm)	2016	Соціальна поведінка горбатих китів - стратегія полювання "бульбашковою сіткою"
Алгоритм рою дельфінів (Swarm Dolphin Algorithm)	2016	Соціальні поведінки дельфінів
Штучний алгоритм вовчої зграї (Artificial Wolf Pack Algorithm)	2016	Соціальні поведінки вовчої зграї при розвідці, виклику та облозі
Оптимізація сараною (Grasshopper Optimisation)	2017	Поведінка зграї сарани в природі
Оптимізатор плямистих гієн (Spotted Hyena Optimizer)	2017	Соціальні відносини між плямистими гієнами та їхнє співробітництво
Алгоритм рою сальп (Salp Swarm Algorithm)	2017	Поведінка рою сальп під час навігації та здобування їжі в океанах
Оптимізатор імператорських пінгвінів (Emperor Penguin Optimizer)	2018	Імітує поведінку згуртування імператорських пінгвінів
Алгоритм оптимізації чайок (Seagull Optimization Algorithm)	2019	Міграція та нападаючі поведінки чайки в природі

Основними рисами алгоритмів ройового інтелекту є їх здатність до самоорганізації, гнучкість, масштабованість та робастність.

Загальна структура алгоритму ройового інтелекту (рисунок 1) складається з таких етапів:

Визначення параметрів алгоритму: Налаштування початкових значень, які керують поведінкою алгоритму.

Ініціалізація агентів: Створення початкової популяції агентів, де кожен агент представляє можливе рішення задачі.

Встановлення умови завершення: Задання критеріїв, за якими алгоритм зупинить виконання, наприклад, досягнення максимальної кількості ітерацій або задовільного рівня точності рішення.

Обчислення фітнес функції: Оцінка кожного агента з використанням функції пристосованості, яка вимірює, наскільки добре агент вирішує поставлену задачу.

Виконано умову завершення?: Перевірка, чи була досягнута умова завершення алгоритму. Якщо так, алгоритм завершує роботу; якщо ні, процес продовжується.

Оновлення агентів: Модифікація станів агентів на основі обміну інформацією між ними для покращення їх рішень.

Отримання оптимального результату: Вибір найкращого рішення з усіх агентів після завершення алгоритму або досягнення умови завершення.



Рисунок 1 – Загальна структура ройового алгоритму

Але для конкретних алгоритмів послідовність та кількість етапів може відрізнятися від загальної структури.

Серед алгоритмів ройового інтелекту найбільш популярними є алгоритм оптимізації роєм частинок (PSO) та алгоритм мурашиного колонії (ACO).

PSO є привабливим через свою простоту у реалізації та здатність швидко знаходити рішення.

ACO, з іншого боку, надихнутий поведінкою мурашиних колоній при пошуку їжі та вирізняється своєю ефективністю у вирішенні задач маршрутизації та розкладу. Обидва алгоритми широко застосовуються в різних областях, включаючи логістику, робототехніку, енергетику, обробку даних, безпілотні літальні апарати демонструючи свою універсальність та силу в рішенні складних проблем [6,7,8,9].

Крім того вже розроблені реалізації алгоритмів ройового інтелекту.

Для мови програмування Python існують бібліотеки :

- PySwarms - легка бібліотека для оптимізації роєм частинок, яка дозволяє дослідникам та розробникам легко використовувати PSO в своїх проектах;
- DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python): - бібліотека для еволюційних обчислень, яка також підтримує реалізацію різних ройових алгоритмів;
- ACO-Pants: спеціалізована бібліотека для алгоритму мурашиного колонії, яка зосереджена на пошуку шляхів і оптимізації.

Для мови програмування Java:

- JMetal - фреймворк, призначений для розробки метаевристичних алгоритмів, включаючи ройові алгоритми, для рішення багатоцільових оптимізаційних задач;
- Opt4J - відкритий і модульний фреймворк для метаевристичної оптимізації, що підтримує різні ройові алгоритми.

Для мови програмування C/C++:

- ParadisEO - багатофункціональний фреймворк для еволюційних обчислень, який включає підтримку для різних ройових алгоритмів. Підтримує паралельні та розподілені обчислення;
- SwarmOps - бібліотека, яка надає ефективні реалізації для різних оптимізаційних алгоритмів, включаючи ройові.

Висновки

У даній роботі було проведено аналіз алгоритмів ройового інтелекту, демонструючи їхній потенціал та широке поле діяльності у сфері мультиагентних систем. Вказано на активне дослідження в цій галузі та наростання застосувань. Вивчення різних наукових робіт вказує на необхідність поєднання знань

із різних областей для ефективного вирішення складних завдань за допомогою ройового інтелекту.

Алгоритми ройового інтелекту знаходять застосування в різноманітних галузях та сферах, існують безліч бібліотек та фреймворки для реалізації алгоритмів ройового інтелекту в мовах програмування Python, Java, та C/C++, що свідчить про доступність та зручність використання цих алгоритмів у дослідницькій та розробницькій діяльності.

У майбутніх дослідженнях передбачається провести детальніший розгляд та порівняння алгоритмів ройового інтелекту, а також розглянути можливості їх інтеграції з іншими методами штучного інтелекту для покращення рішень у різних областях застосування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Military Drone Market to Hit USD 35.60 Billion by 2030 | Featuring a Detailed 200-Pages Research Report. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/military-drone-market-102181> (дата звернення 02.02.2024)
2. Herbert A. Simon - The Architecture of Complexity. URL: <https://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ArchitectureOfComplexity.HSimon1962.pdf> (дата звернення: 02.02.2024).
3. Russell S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (4nd Edition). Pearson, 2020. 1132 p.
4. Gianluca Antonelli - Interconnected dynamic systems: An overview on distributed control. IEEE Control Systems. 2013. Vol. 33, no. 1. P. 76–88. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6415463> (дата звернення: 02.02.2024).
5. Adam Slowik. Swarm Intelligence Algorithms: A Tutorial. CRC Press, 2020. 348p.
6. Louis P. Walters. Applications of swarm intelligence. Nova Science Publishers, Incorporated, 2010. 234p.
7. Abhishek Kumar, Pramod Singh Rathore, Vicente Garcia Diaz, Rashmi Agrawal. Swarm Intelligence Optimization Algorithms and Applications. John Wiley & Sons, Inc, 2021. 364p.
8. Modestus O. Okwu, Lagouge K. Tartibu. Metaheuristic Optimization: Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence, Theory and Applications. Springer Nature Switzerland AG, 2021. 196p.
9. Lewis M. Pyke www.frontiersin.org Craig R. Stark - Dynamic Pathfinding for a Swarm Intelligence Based UAV Control Model Using Particle Swarm (дата звернення: 15.03.2024)

REFERENCES

1. Military Drone Market to Hit USD 35.60 Billion by 2030 | Featuring a Detailed 200-Pages Research Report. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/military-drone-market-102181> (дата звернення 02.02.2024)
2. Herbert A. Simon - The Architecture of Complexity. URL: <https://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ArchitectureOfComplexity.HSimon1962.pdf> (дата звернення: 02.02.2024).
3. Russell S. J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach (4nd Edition). Pearson, 2020. 1132 p.
4. Gianluca Antonelli - Interconnected dynamic systems: An overview on distributed control. IEEE Control Systems. 2013. Vol. 33, no. 1. P. 76–88. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6415463> (дата звернення: 02.02.2024).
5. Adam Slowik. Swarm Intelligence Algorithms: A Tutorial. CRC Press, 2020. 348p.
6. Louis P. Walters. Applications of swarm intelligence. Nova Science Publishers, Incorporated, 2010. 234p.
7. Abhishek Kumar, Pramod Singh Rathore, Vicente Garcia Diaz, Rashmi Agrawal. Swarm Intelligence Optimization Algorithms and Applications. John Wiley & Sons, Inc, 2021. 364p.
8. Modestus O. Okwu, Lagouge K. Tartibu. Metaheuristic Optimization: Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence, Theory and Applications. Springer Nature Switzerland AG, 2021. 196p.
9. Lewis M. Pyke www.frontiersin.org Craig R. Stark - Dynamic Pathfinding for a Swarm Intelligence Based UAV Control Model Using Particle Swarm (дата звернення: 15.03.2024)

Received 15.04.2024.

Accepted 17.04.2024.

Analysis of swarm intelligence algorithms

This paper conducts a comprehensive review of swarm intelligence algorithms, highlighting the significant potential and development prospects of multi-agent systems and swarm intelligence. It underscores the ongoing research activity in this field and the continuous expansion of application areas. By examining various studies and publications, the paper concludes the importance of integrating approaches from different scientific disciplines to tackle diverse and complex problems using swarm intelligence. Future research is aimed at providing a more detailed analysis and comparison of various swarm intelligence algorithms across different application domains, as well as exploring their integration with other artificial intelligence methods. This work points towards the

growing relevance of swarm intelligence in solving real-world problems, showcasing its versatility and effectiveness across multiple sectors, including military, agriculture, search and rescue, and environmental monitoring.

Key words: artificial intelligence, intelligent agent, multi-agent systems, swarm intelligence, swarm intelligence optimization algorithms.

Купін Андрій Іванович - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету.

Косей Максим - аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету.

Kupin Andrey - Doctor of technical sciences, professor, Head of the department of computer systems and networks of The Kryvyi Rih National University.

Kosei Maksym - PhD student of the department of computer systems and networks of The Kryvyi Rih National University.

**ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНЯ ВІДПОВІДНОСТІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32
МІЖНАРОДНИМ СТАНДАРТАМ
З КІБЕРНЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**

Анотація. В роботі досліджується захист мікроконтролера ESP32, який широко використовується для побудови інтернету речей, від кібернетичних загроз шляхом аналізу відповідності платформи розробника вимогам міжнародних стандартів з кібербезпеки.

Ключові слова: інтернет речей, автоматизація, кібербезпека, мікроконтролер, комп'ютерно інтегровані технології.

Постановка проблеми. Інтернет речей (IoT – Internet of Things) безперервно збільшує свою присутність в нашому житті. Цьому процесу розширення в першу чергу сприяє зменшення вартості сенсорів, мікроконтролерів, приладів мережевої інфраструктури вкупі з активним розвитком різноманітних хмарних сервісів. Сьогодні самі звичайні люди мають доступ до технологій, які дозволяють збирати інформацію з різноманітних джерел, створювати автоматизацію для роботи побутової техніки та реалізовувати потрібні сценарії взаємодії технічних об'єктів. Проте, як тільки користувач починає використовувати ці нові технології, відразу з'являється небезпека викрадання конфіденційних даних, підміни або знищення важливої інформації, появи спроб реалізації шкідливого функціонування системи та таке інше, – тобто всього того, що носить назву кібернетична загроза. Запобігти зазначеним загрозам можливо завдяки впровадженню в системах IoT стандартів з забезпечення кібернетичної безпеки. Оскільки саме економічний фактор є рушійною силою в глобальному розповсюдженні систем IoT, постає актуальне питання: чи здатні популярні бюджетні мікроконтролери забезпечити потрібний рівень кібернетичної безпеки?

Мета дослідження. Метою дослідження, результати якого представлені в даній статті, є аналіз можливостей одного з найбільш популярних мікроконтролерів, які використовуються для створення IoT, а саме – мікроконтролера ESP32, надавати потрібний рівень кібернетичного захисту. Дослідження проведено шляхом порівняння технічних характеристик, властивостей операцій-

ної системи (OC) та специфікацій прикладного програмного інтерфейсу (API – Application Programming Interface), якими оснащується мікроконтролер ESP32, а також підтримки розробника з вимогами міжнародного стандарту ETSI EN 303 645.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню створення та розвитку систем IoT і, зокрема питанню забезпечення кібернетичної безпеки, присвячено велику кількість наукових та науково-технічних статей та книг, з яких достатньо вказати, наприклад, такі роботи, як [1] та [2]. Важливо зазначити, що більшість публікацій на цю тему відображають, розкривають вже існуючі стандарти у цій галузі, надаючи тлумачення, роз'яснення та приклади до них, що є, безумовно, вкрай важливим. Проте, основою є саме міжнародні стандарти. Найбільш авторитетними організаціями, які створюють стандарти з кібербезпеки є такі: ETSI (European Telecommunications Standards Institute) – Європейський інститут телекомунікаційних стандартів; IoTSEF (Internet of Things Security Foundation) – Організація з безпеки інтернету речей; GSMA (Groupe Speciale Mobile Association) – Асоціація «Спеціальна група мобільних технологій»; NIST (National Institute of Standards and Technology) – Національний інститут стандартів і технології, США; IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки; IEC (International Electrotechnical Commission) – Міжнародна електротехнічна комісія; ENISA (European Union Agency for Network and Information Security) – Агентство Європейського Союзу з питань мережевої та інформаційної безпеки. Всі ці організації мають свої стандарти з кібернетичної безпеки IoT. Не вдаючись до опису відмінностей цих стандартів, зазначимо, що в першу чергу вони розрізняються за сферою застосування IoT, як то: промислова автоматизація, медицина, «розумний город», транспортні засоби, загальне призначення та таке інше. Зважаючи на те, що в цій роботі розглядається бюджетний мікроконтролер, який використовується для потреб загального користування, таких, наприклад, як «розумний будинок», буде доцільним спиратися на стандарт ETSI, який має назву «Кібербезпека Інтернету речей користувачів: основні вимоги» [3]. Надалі в тексті будемо називати його просто «стандарт».

Викладення основного матеріалу дослідження. Стандарт встановлює наступні основні положення забезпечення кібербезпеки інтернету речей.

1. Не використовуйте універсальних паролів за замовчуванням.
2. Впроваджуйте засоби керування звітами щодо вразливості.
3. Постійно оновлюйте програмне забезпечення.

4. Надійно зберігайте конфіденційні параметри безпеки.
5. Спілкуйтеся безпечно.
6. Зведіть до мінімуму відкритий простір для нападу.
7. Забезпечте цілісність програмного забезпечення.
8. Переконайтеся, що персональні дані захищені.
9. Зробіть системи стійкими до збоїв.
10. Перевіряйте дані системної телеметрії.
11. Спростити для користувачів видалення даних користувачів.
12. Зробіть установку та обслуговування пристроїв простими.
13. Перевіряйте введені дані.

Звичайно, не всі з цих вимог стосуються самого мікроконтролера, його ОС та API. Пункти 1, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13 – в першу чергу залежать від розробників та користувачів IoT. За належного програмування, вдалої конструкції та правильної експлуатації всі ці пункти можуть бути реалізовані практично на всіх популярних платформах. Звичайно, й всі інші пункти залежать від розробників та користувачів, проте їх не вдасться виконати, якщо мікроконтролер, ОС, API та підтримка виробника (тобто – платформа) не мають відповідних інструментів. Тому послідовно розглянемо саме пункти 2, 3, 4, 5, 7.

Почнемо з другого пункту стандарту. Стосовно засобів керування звітами щодо вразливості стандарт потребує відкритої публікації політики виробника щодо виявлення вразливостей. Це перша вимога з якої витікають усі наступні. На жаль, виробник – фірма Espressif цього не зробила. Відповідно, й наступні вимоги стандарту щодо публікації та термінів усунення вразливостей наразі не заявляються фірмою Espressif як такі, що постійно виконуються. Проте в базі даних NIST відслідковуються інциденти, пов'язані з продукцією Espressif, так само, як й Espressif публікує звіти, щодо виявлених вразливостей, однак це не можна сприймати, як виконання вимог стандарту.

Щодо третього пункту основних вимог зазначимо, що випуск оновленого програмного забезпечення для мікроконтролера ESP32 відбувається на постійній основі. Операційною системою реального часу, якою виробник оснащує ESP32 є FreeRTOS. Вона включає в себе ядро та бібліотеки. Останній реліз вийшов в грудні 2022 року. Засобом розробки програмного забезпечення від виробника є Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF). Найновішою версією цього інструментального забезпечення на сьогодні є версія 5.1 від червня 2023 року. В кожній новій версії системного та інструментального програмного забезпечення проводиться оновлення засобів кібернетичної безпеки та усува-

ються виявлені, або потенційні вразливості. Тому в розробника системи IoT на базі ESP32 завжди є можливість виконати вимоги щодо виконання пункту 3 стандарту. Крім того ESP32 забезпечує механізм, відомий як Over the Air Update (OTA), який дозволяє проводити безпечне оновлення програмного забезпечення без зупинення робочих процесів. Таким чином, можна зробити висновок, що третій пункт основних положень забезпечення кібербезпеки інтернету речей стандарту ETSI по відношенню до платформи ESP виконується.

В мікроконтролері ESP32 надійне збереження конфіденційних параметрів безпеки (пункт 4 вимог стандарту) забезпечується шифруванням файлової системи (флеш-шифрування) за алгоритмом AES. Додатково відбувається шифрування енергонезалежної пам'яті (NVS – Non-volatile storage), яке використовує стандартний алгоритм AES-XTS. Ключ зберігається в окремому розділі пам'яті, яка сама шифрується за допомогою звичайного шифрування.

Пункт 5 вимог стандарту («безпечне спілкування») передбачає використання криптографічного захисту під час передавання даних. Платформа ESP32 надає для цього необхідні інструменти у вигляді ESP-TLS, який є компонентом ESP-IDF і надає прикладний програмний інтерфейс для роботи з TLS – криптографічним протоколом захисту на транспортному рівні (Transport Layer Security). API надає функціональні можливості для перевірки сертифіката сервера, автентифікації сертифіката клієнта, підтримки попередньо спільних ключів PSK (pre-shared key) та протоколу переговорів прикладного рівня ALPN (Application-Layer Protocol Negotiation). На основі протоколу TLS реалізується протокол HTTPS, що дозволяє побудувати надійний зв'язок з хмарним сервером, так само, як й з IoT-пристроями.

Стандарт вимагає (пункт 7) наявності засобів забезпечення цілісності програмного забезпечення шляхом застосування механізму безпечної загрузки, який передбачає використання цифрових підписів програмного коду. Такий механізм в ESP32 існує й він легко конфігурується.

Таким чином, аналіз відповідності технічних характеристик ESP32, властивостей ОС та специфікацій API з вимогами міжнародного стандарту ETSI EN 303 645 показує, що платформа ESP32 в цілому надає всі можливості задля створення безпечної IoT-системи. Невідповідність фіксується лише стосовно пункту 1 вимог, оскільки виробник – компанія Espressif, – не публікує своєї політики щодо виявлення вразливостей. З точки зору використання ESP32 для побудови звичайної, побутової системи IoT рівень кібернетичної безпеки цього контролера слід визнати достатньо високим. Реальний рівень безпеки такої

системи буде залежати від коректної розробки програмного забезпечення, вдалої конструкції пристроїв та правильної експлуатації у відповідності до стандарту.

Проведений аналіз був би неповним, якби ми не згадали задекларованих сторонніми особами вразливостей ESP32. Зокрема, база даних NIST включає опис деяких зафіксованих вразливостей ESP32 [4]. Усунення цих вразливостей виконується виробником мікроконтролера за звичайною процедурою й завершується випуском нової версії програмного забезпечення. В той же час, доволі часто зустрічаються й інші спроби компрометації платформи ESP32, наприклад [5, 6]. Проте злом системи IoT в цьому разі базується на вразливостях не мікроконтролера як такого, а загально відомих вразливостях безпеки WiFi мереж, до цього ж умовою злomu є слабкий пароль доступу до мережі. Тому такі випадки не є специфічними для ESP32.

Висновки. В результаті проведеного аналізу встановлено наступне:

- 1) мікроконтролер ESP32 в цілому відповідає європейським стандартам з кібернетичної безпеки інтернету речей;
- 2) невідповідність європейському стандарту ETSI EN 303 645 має місце лише стосовно засобів керування звітами щодо вразливості, оскільки виробник ESP32 не публікує своєї політики щодо виявлення вразливостей;
- 3) для побудови звичайної, побутової системи IoT рівень кібернетичної безпеки мікроконтролера ESP32 слід визнати достатньо високим; умовою побудови захищеної IoT на базі цього мікроконтролера є використання всіх наявних в ESP32 інструментів кібернетичної безпеки та виконання вимог стандарту ETSI EN 303 645.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Дугінець Г.В. Концепція «Інтернет речей» у глобальному виробництві: досвід України // Економіка і регіон, Науковий журнал. – Випуск № 1 (68) – ПолтНТУ, 2018 – С.127 – 133
2. IoT Security and Privacy Paradigm / Edited by Souvik Pal, Vicente García Díaz and Dac-Nhuong Le – Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC, 2020. 398p
3. ETSI EN 303 645 V2.1.1 «Cyber Security for Consumer Internet of Things: Baseline Requirements». Sophia Antipolis, Fr: ETSI, 2020. 34p
4. NATIONAL VULNERABILITY DATABASE. [Електронний ресурс] / Сайт NIST, URL:
https://nvd.nist.gov/vuln/search/results?adv_search=true&isCpeNameSearch=true&

query=cpe%3A2.3%3Ah%3Aespressif%3Aesp32%3A-

%3A*%3A*%3A*%3A*%3A*%3A*%3A*

5. WiFi Vulnerabilities on ESP32/ESP8266 IoT Devices. [Электронный ресурс], URL: <https://www.micro.ai/blog/wifi-vulnerabilities-on-esp32-esp8266-iot-devices>

6. Барибін О.І., Зайцева Е.Є., Бражний В.В. Тестування безпеки пристроїв інтернету речей на базі мікроконтролера ESP-32 // Кібербезпека: освіта, наука, техніка, Електронне фахове наукове видання. – Том 2 №6 (2019) – Київський університет імені Бориса Грінченка, 2019 – С.71 – 81

REFERENCES

1. Duhinets H.V. Conception of the “Internet of Things” in Global Manufacturing: Experience for Ukraine // Economics and Region, Science Jorنال. – Issue № 1 (68) – PoltNTU, 2018 – P.127 – 133

2. IoT Security and Privacy Paradigm / Edited by Souvik Pal, Vicente García Díaz and Dac-Nhuong Le – Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC, 2020. 398p

3. ETSI EN 303 645 V2.1.1 «Cyber Security for Consumer Internet of Things: Baseline Requirements». Sophia Antipolis, Fr: ETSI, 2020. 34p

4. NATIONAL VULNERABILITY DATABASE. [Electronic source] / NIST Site, URL: https://nvd.nist.gov/vuln/search/results?adv_search=true&isCpeNameSearch=true&query=cpe%3A2.3%3Ah%3Aesspressif%3Aesp32%3A-

%3A*%3A*%3A*%3A*%3A*%3A*%3A*

5. WiFi Vulnerabilities on ESP32/ESP8266 IoT Devices. [Electronic source], URL: <https://www.micro.ai/blog/wifi-vulnerabilities-on-esp32-esp8266-iot-devices>

6. Barybin O.I., Zaitseva E.Y., Brazhnyi V.V. Testing the Security ESP32 Internet of Things Devices // Cybersecurity: Education, Science, Technique CYBERSECURITY: EDUCATION, SCIENCE, TECHNIQU, Electronic professional scientific publication. – Vol. 2 №6 (2019) – Borys Grinchenko Kyiv University, 2019 – P.71 – 81.

Received 15.04.2024.

Accepted 17.04.2024.

Assessment of ESP32 microcontroller compliance with international standards of cyber security for internet of things

Internet of Things becomes more and more accessible for ordinary people. This fact brings cybersecurity threats. Thus there is necessity to assess how microcontroller platforms that are quite popular for producing home IoT system are really secure. One of such platforms is ESP32. This study has an aim to assess ESP32 cybersecurity level. Method of assessment is analyzing how international standard requirements are fulfilled by ESP32 microcontroller platform. The ETSI standard ETSI EN 303 645 V2.1.1 «Cyber Se-

curity for Consumer Internet of Things: Baseline Requirements» is chosen as a base. In particular, the “Cyber security provisions for consumer IoT” requirements was considered. First of all, those requirements are under analyze that depend only on platform (microcontroller, OS, API, manufacturer support) performance and not on IoT-system designers or consumers. The following topics are covered: means to manage reports of vulnerabilities, keeping software updated, securely storing sensitive security parameters, secure communication, and protecting personal data. Generally, it is concluded that the ESP32 microcontroller meets the cybersecurity standards of the Internet of Things, and ESP32 cybersecurity level should be considered as a quite high to produce a regular, household IoT system. The non-compliance with European standard ETSI EN 303 645 is only in relation to vulnerability reporting controls, as the ESP32 manufacturer does not publish its vulnerability disclosure policy. But on the other hand, the NIST database includes a description of some recorded ESP32 vulnerabilities. Management of these vulnerabilities is performed by the microcontroller manufacturer in the usual procedure and it is completed by the release of a new version of the software. Thus, the real cybersecurity level of home IoT system on the base of ESP32 will depend on how correctly hardware and software design is, and does an IoT system operation is provided in accordance with the cybersecurity standards.

Мазуренко Валерій Борисович – Дніпровський національний університет, фізико-технічний факультет, канд. техн. наук, доцент кафедри кібербезпеки та комп’ютерно-інтегрованих технологій.

Mazurenko Valeriy Borisovich – Oles Honchar Dnipro National University, Physical and Technical Faculty, Doctor of Philosophy, docent of Chair of cyber security and computer-integrated technologies.

М.О. Поляков, А.А. Ленок, О.М. Поляков

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ НЕПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ НА ПРИКЛАДІ ДАНИХ ПРО ВІДНОСНУ ШВИДКІСТЬ СТАРІННЯ ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

Анотація. Проблемою використання результатів неповного факторного експерименту є обмежений діапазон та нерівномірний крок вимірювань за окремими змінними. Це знижує точність визначення значення шуканої функції. Метою дослідження є збільшення кількості значень шуканої функції за обмеженими експериментальними даними. Метод дослідження полягає у розробці методики інтерполяції та екстраполяції експериментальних даних з використанням функцій пакету Матлаб. Результатом дослідження є методика яка дозволяє створити рівномірну сітку опорних значень, заповнити її з необхідним кроком зміни змінних, екстраполювати дані на межі простору даних, де вплив даного аргументу на функцію дорівнює нулю, виділити внесок окремих аргументів у значення функції, синтезувати значення функції у нових вузлах опорної сітки значень. Наведено приклад застосування запропонованої методики для формування простору значень відносної швидкості старіння целюлозної ізоляції обмоток силового трансформатора як функції температури, вологості та доступу кисню, що дозволило, як мінімум у 4,5 рази, збільшити кількість даних порівняно з експериментальними даними.

Ключові слова: обробка даних експерименту, інтерполяція, екстраполяція, функції Матлаб, швидкість старіння ізоляції

Постановка проблеми. Поняття повного факторного експерименту сформувалось у зв'язку з розвитком теорії планування експериментів [1]. Це такий експеримент у якому усі фактори комбінуються на всіх можливих рівнях [2], що дозволяє отримати максимальну кількість інформації для побудови моделі. Якщо умова комбінування усіх факторів на всіх можливих рівнях не виконується, то ми маємо неповний факторний експеримент. Досить поширена ситуація, коли експерименти щодо визначення функції при всіх можливих поєднаннях значень її незалежних змінних не були проведені з технічних, економічних або інших причин. Але й у цій ситуації актуальним є завдання отримання додаткової інформації про об'єкт досліджень на базі даних неповного факторного експерименту. Очевидно ця проблема не має загального рішення. Для її вирішен-

ня потрібна методика урахування особливостей процесів, які протікають у об'єкті досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі експерименти [3] щодо визначення відносної швидкості старіння целюлозної ізоляції обмоток силового трансформатора. Вони є пасивними, дуже кошковними та тривалими і тому не проведені у всьому робочому діапазоні поєднань температур, вологості і доступу кисню до ізоляції. Крок зміни вологості в експериментальних даних становить від 1,0 до 2,0%, крок зміни за температурою – 6°C. При зміні вологості на 2% та постійних значеннях інших параметрів відносна швидкість старіння змінюється у 2,5-3 рази [3]. Така невизначеність значення функції ускладнює її використання для прогнозування залишкового ресурсу ізоляції.

Для формування даних у точках між вузлами рідкої сітки опорних значень аргументів функції що досліджується використовують методи інтерполяції [4]. Ці методи реалізовані у функціях пакету Матлаб [5]. Але методи інтерполяції потребують певної кількості експериментальних даних, яких бракує. Так в стандарті [3] залежність відносної швидкості старіння целюлозної ізоляції при доступі кисню до ізоляції при різних температурах наведена тільки для одного значення вологості. Тому вплив кисню не можливо визначити в усьому інтервалі вологості якщо користуватись тільки експериментальними даними.

У зв'язку з розглянутою нижче методикою обробки даних експерименту, проаналізуємо відомі припущення щодо впливу окремих аргументів на функцію на прикладі відносної швидкості старіння целюлозної ізоляції.

У роботі [6] зазначено, що відносна швидкість старіння становить суму швидкостей старіння обумовлених процесами піролізу, гідролізу та окислення, визначальними факторами яких є, відповідно, температура, вологість, та доступ кисню. Передбачається, що перелічені процеси протікають незалежно і їх результатом є зменшення ступеня полімеризації целюлози. У роботі [7] відзначені такі властивості функції відносної швидкості старіння, як невід'ємність її значень, не зменшення зі зростанням значень хоча б одного аргументу. У роботі [7] зазначено також що для деяких параметрів в області визначення функції даного аргументу можуть бути точки або інтервали, в яких внесок даного аргументу в значення функції дорівнює нулю. Наприклад, є деяка функція від температури і вологості. Кожен параметр робить свій внесок у цю функцію. Але якщо вологість зменшується до нуля, то функція залежить від одного параметра – температури.

Об'єкт досліджень: процес аналізу результатів неповного факторного експерименту.

Мета роботи: є збільшення кількості значень шуканої функції за обмеженими експериментальними даними через урахування особливостей впливу окремих факторів на досліджувану функцію.

Основний матеріал дослідження. Для формалізації завдання введемо такі позначення:

$[x_{nmin}, x_{nmax}]$, $n = 1, N$ - область визначення функції y ;

$P_n = \{x_{nm}\}$, $n = 1, N$, $m = 1, M$ - множина точок в яких потрібно визначити функцію y ;

P_{ne} – множина точок у яких функція y визначена експериментально, $P_{ne} \dots P_n$;

Y_e – множина значень функції y , визначених експериментально.

Y – множина значень функції y , які визначені на множині P_n .

Таким чином, завдання роботи сформулюється наступним чином: за значеннями функції Y_e на множині P_{ne} визначити множину Y значень цієї функції в області її визначення $[x_{nmin}, x_{nmax}]$, $n=1, N$ з необхідним кроком зміни аргументів.

Загалом це завдання немає рішення, або має безліч рішень. Тому розглянемо практично важливий окремий випадок з урахуванням наступних обмежень:

1. У всій області визначення функція та незалежні змінні набувають лише невід'ємних значень.

2. Вклади y_n , $n = 1, N$ незалежних змінних x_n у значення функції y додаються.

3. Зі зростанням значення n -ї ($n = 1, N$) незалежної змінної, при постійному значенні інших змінних, значення функції зростає.

4. Якщо $x_{nmin} = 0$, то вклад цієї змінної значення функції дорівнює нулю. Можливий також варіант, коли значення аргументу більше нуля, але вкладом цього параметра значення функції можна знехтувати. Наприклад, якщо оцінювати відносну швидкість старіння ізоляції за формулою [3]:

$$V = 2^{\frac{\theta - (273 + 98)}{6}},$$

то при температурі $\theta < (273+50)$ °K відносна швидкість старіння ізоляції $V < 1/256$ та нею можна знехтувати.

З урахуванням наведених вище обмежень, класифікуємо наявні та можливі експериментальні дані:

1. Значення всіх N аргументів не дорівнюють нулю та внесок y_n n -го аргументу ($n = 1, N$) у значення функції більше нуля. Тобто

$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_N.$$

2. Значення всіх аргументів крім n -го дорівнюють нулю. Тоді у даній точці значення функції $y = y_n$.

3. Значення всіх аргументів крім n -го та m -го дорівнюють нулю. Тоді значення функції $y = y_n + y_m$. Для знаходження вкладу y_n екстраполюємо функцію у точку де $x_m = 0$. Тоді значення функції у цій точці $y = y_n$. Екстраполяція значень функції у на аргумент $x_m = 0$ проводилася за допомогою функції *interp2* пакета Матлаб для опорної сітки вузлів з рівномірним кроком, отриманої за допомогою функції пакета Матлаб *griddata* з методом 'cubic':

$$y_q = \text{interp2}(x_n, x_m, y, x_{nq}, x_{mq}, 'spline'),$$

де x_n, x_m , – опорна сітка вузлів для n -го та m -го аргументів; y – значення функції для опорної сітки вузлів за умови що вклади інших аргументів дорівнюють нулю; x_{nq}, x_{mq} – сітка вузлів запиту; 'spline' – метод функції *interp2*.

Застосування цих функцій потребує наявності хоча б трьох значень функції $y = f(x_n)$ при постійних значеннях інших аргументів.

4. Далі аналізуємо дані функції у для яких лише три аргументи мають не нульові значення, наприклад x_1, x_2 та x_3 . Але вклад двох з них (наприклад, вклад y_1 та y_2) у функцію у відомий. Звідки $y_3 = y - y_1 - y_2$.

5. Після визначення вкладів y_1, y_2, y_3 переходимо до визначення вкладу y_4 тощо до визначення вкладів всіх аргументів у функцію у.

Приклад аналізу даних неповного факторного експерименту. Функція у має три аргументу: x_1, x_2, x_3 . Область визначення функції у задано інтервалами: $x_1 = [80, 140]$ з кроком 6; $x_2 = [0, 4, 0]$ з трьома значеннями 0,5, 1,5 та 3,5; $x_3 = [0, 1]$ з двома значеннями: 0 (нема доступу кисню) та 1 (є доступ кисню).

Значення функції у експериментально визначено на комбінаціях аргументів x_1, x_2 та x_3 які наведено в табл. 1. Вони відповідають даним відносної швидкості старіння термічно покращеної паперової ізоляції (табл. А. 4 [3]).

Експериментально визначені значення функції y

$x_1, ^\circ\text{C}$	$x_3 = 0$			$x_3 = 1$
	$x_2 = 0,5, \%$	$x_2 = 1,5, \%$	$x_2 = 3,5, \%$	$x_2 = 0,5, \%$
80	0,10	0,19	0,38	0,79
86	0,16	0,31	0,63	1,25
92	0,26	0,50	1,00	1,97
98	0,42	0,78	1,59	3,05
104	0,65	1,22	2,48	4,66
110	1,00	1,88	3,81	7,02
116	1,52	2,84	5,78	10,45
122	2,27	4,26	8,66	15,36
128	3,36	6,30	12,82	22,32
134	4,91	9,22	18,74	32,07
140	7,11	13,33	27,12	45,60

На першому етапі аналізу отримано опорну сітку з рівномірним шагом:
 $[x_{1q} \ x_{2q}] = \text{meshgrid} \quad (80 : 6 : 140, \ .5 : .5 : 3.5)$. На наступному етапі виконано інтерполяцію значень функції y_q в вузлах цієї сітки:

$$y_q = \text{griddata} \quad (x_1, x_2, y, x_{1q}, x_{2q}, 'cubic') .$$

Далі, з метою екстраполяції значень функції y_q на точки з $x_2=0$, створено розширену сітку запиту

$$[x_{1q1} \ x_{2q1}] = \text{meshgrid} \quad (80 : 6 : 140, \ 0 : .5 : 4) .$$

В табл. 2 наведено результати екстраполяції функції y_{q1} за допомогою функції Матлаб

$$y_{q1} = \text{interp} \quad 2 \ (x_{1q}, x_{2q}, y_q, x_{1q1}, x_{2q1}, 'spline') .$$

Результати екстраполяції функції $uq1$

$x1$	Значення функції $uq1$ при $x3=0$ та $x2$ що дорівнює								
	0 %	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %	4,0 %
80	0,06	0,10	0,14	0,19	0,24	0,28	0,32	0,38	0,45
86	0,10	0,16	0,23	0,31	0,39	0,46	0,54	0,63	0,73
92	0,17	0,26	0,38	0,50	0,62	0,73	0,86	1,00	1,16
98	0,28	0,42	0,59	0,78	0,97	1,16	1,36	1,59	1,85
104	0,43	0,65	0,92	1,22	0,51	1,81	2,13	2,48	2,88
110	0,66	1,00	1,42	1,88	2,33	2,79	3,28	3,81	4,42
116	1,00	1,52	2,15	2,84	3,53	4,23	4,97	5,78	6,69
122	1,49	2,27	3,23	4,26	5,29	6,34	7,45	8,66	1,20
128	2,20	3,36	4,77	6,30	7,83	9,39	11,03	12,82	14,81
134	3,20	4,91	6,99	9,22	11,46	13,73	16,13	18,74	21,63
140	4,60	7,11	10,14	13,33	16,50	19,98	23,58	27,12	30,46

Для стовпчика $x2 = 0 \%$, $x3 = 0$ у табл. 2 значення функції $uq1$ є вкладом $y1$ тільки фактору $x1$, а для інших стовпчиків – додатком ($y1 + y2$), то звідки визначимо вклад $y2$, який наведено в табл. 3.

Стовпчик $x3=1$, $x2=0,5 \%$ в табл.1 показує значення функції y , яке додає вклади аргументів $x1$, $x2$, $x3$. А стовпчик значень функції $uq1$ при $x3=0$, $x2=0,5 \%$ додає вклади аргументів $x1$, $x2$. Тобто різниця ($y - uq1$) дорівнює вкладу $y3$. Додавши вклад $y3$ до значень табл. 2 отримаємо значення функції y при $x3=1$ та різних комбінаціях $x1$, $x2$. Результати розрахунків наведено в табл. 4.

Таким чином у результаті розрахунку за запропонованою методикою кількість значень функції збільшилось з 44 до 198.

Висновки. Основною проблемою використання експериментально заданих функцій є обмежена кількість даних. Ці табличні дані визначені не для всіх комбінацій аргументів функції.

Запропонована методика дозволяє отримати усі такі комбінації аргументів для певного класу функцій шляхом урахування особливостей їх поведінки на області значень функції, проведення інтерполяції та екстраполяції експериментальних даних, локалізації впливу окремих факторів з наступним їх додаванням. Функції Матлаб *meshgrid*, *griddata* та *interp2* дозволяють ефективно

виконувати операції інтерполяції та екстраполяції даних неповного факторного експерименту.

Таблиця 3

Вклад y_2 у функцію y_{q1}

x_1	Вклад y_2 при $x_3 = 0$ та x_2 що дорівнює								
	0 %	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %	4,0 %
80	0	0,04	0,08	0,13	0,17	0,22	0,26	0,32	0,39
86	0	0,06	0,13	0,21	0,29	0,36	0,44	0,53	0,63
92	0	0,9	0,21	0,33	0,45	0,56	0,69	0,83	0,99
98	0	0,14	0,31	0,50	0,69	0,88	1,08	1,31	1,57
104	0	0,22	0,49	0,79	1,08	1,38	1,70	2,05	2,44
110	0	0,34	0,76	1,22	1,67	2,13	2,61	3,15	3,75
116	0	0,52	1,15	1,84	2,52	3,22	3,96	4,78	5,69
122	0	0,78	1,73	2,77	3,80	4,85	5,96	7,17	8,52
128	0	1,16	2,58	4,10	5,63	7,19	8,83	10,62	12,61
134	0	1,71	3,79	6,02	8,26	10,54	12,94	15,54	18,44
140	0	2,51	5,54	8,73	11,90	15,38	18,98	22,52	25,86

Таблиця 4

Значення функції y при $x_3 = 1$

x_1	Значення функції y при $x_3 = 1$ та x_2 що дорівнює								
	0 %	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %	4,0 %
80	0,74	0,79	0,82	0,87	0,92	0,96	1,00	1,06	1,13
86	1,19	1,25	1,32	1,40	1,48	1,55	1,63	1,72	1,82
92	1,88	1,97	2,09	2,21	2,33	2,44	2,57	2,71	2,87
98	2,91	3,05	3,22	3,41	3,60	3,79	3,99	4,22	4,48
104	4,44	4,66	4,93	5,23	5,52	5,82	6,14	6,49	6,89
110	6,68	7,02	7,44	7,90	8,35	8,81	9,30	9,83	10,44
116	9,93	10,45	11,08	11,77	12,46	13,16	13,90	14,71	15,62
122	14,58	15,36	16,32	17,35	18,38	19,43	20,54	21,75	23,11
128	21,16	22,32	23,73	25,26	26,79	28,35	29,99	31,78	33,77
134	30,36	32,07	34,15	36,38	38,62	40,89	43,29	45,90	48,79
140	43,09	45,60	48,63	51,82	54,99	58,47	62,07	65,61	68,95

Проведене тестування запропонованої методики на прикладі функції трьох змінних яка описує за даними стандарту МЕК [3] залежність відносної швидкості старіння целюлозної ізоляції обмоток силового трансформатора від температури, вологості та доступу кисню.

Подальше дослідження передбачається проводити у бік урахування у методиці можливої взаємодії факторів які є аргументами функції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Anderson M. J. Whitcomb P. J. DOE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation. Whitcomb. Productivity, Inc. Portland, Oregon, 2000. 236 p. <https://doi.org/10.1002/qre.376>
2. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 5th Edition, Wiley, 2000. 696 p.
3. IEC 60076-7 Edition 2.0 2018-01. Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers, 2018. 89 p.
4. Шелевицький І. В., Шутко М. О., Шутко В. М., Колганова О. О. Сплайни в цифровій обробці даних і сигналів: монографія. Київ : НАУ, 2008. 23 с.
5. Lindfield, G., Penny, J. Numerical Methods: Using MATLAB 3rd Edition, Academic Press, 2012. 552 p.
6. Teymouri A., Vahidi B. Estimation of power transformer remaining life from activation energy and pre-exponential factor in the Arrhenius equation. Cellulose. 2019. no.26. pp. 9709–9720. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-019-02746-w>.
7. Poliakov M., Vasylevskyi V., Poliakov O. Evaluation of the Relative Aging Rate of the Insulation of the Mineral-Oil-Immersed Power Transformer According to the Data of the IEC 60076–7 Standard. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2024. vol. 31, no. 1. pp. 102-110. <https://doi: 10.1109/TDEI.2023.3338582>.

REFERENCES

1. Anderson M. J. Whitcomb P. J. DOE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation. Whitcomb. Productivity, Inc. Portland, Oregon, 2000. 236 p. <https://doi.org/10.1002/qre.376>
2. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 5th Edition, Wiley, 2000. 696 p.
3. IEC 60076-7 Edition 2.0 2018-01. Power transformers – Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers, 2018. 89 p.

4. Shelevytskyi I. V., Shutko M. O., Shutko V. M., Kolganova O. O. Splines in digital data and signal processing: monograph. Kyiv: NAU, 2008. 232 p.
5. Lindfield, G., Penny, J. Numerical Methods: Using MATLAB 3rd Edition, Academic Press, 2012. 552 p.
6. Teymouri A., Vahidi B. Estimation of power transformer remaining life from activation energy and pre-exponential factor in the Arrhenius equation. Cellulose. 2019. no.26. pp. 9709–9720. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-019-02746-w>.
7. Poliakov M., Vasylevskyi V., Poliakov O. Evaluation of the Relative Aging Rate of the Insulation of the Mineral-Oil-Immersed Power Transformer According to the Data of the IEC 60076–7 Standard. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2024. vol. 31, no. 1. pp. 102–110.
[https://doi: 10.1109/TDEI.2023.3338582](https://doi.org/10.1109/TDEI.2023.3338582).

Received 16.04.2024.

Accepted 18.04.2024.

***Analysis of the results of an incomplete factorial experiment using data
on the relative aging rate of cellulose insulation as an example***

The problem with the distortion of the results of an uneven factorial experiment is the limited range and uneven duration of variation among other variables. This reduces the accuracy of the calculated value of the function. The method of investigation is to increase the magnitude of the value of the sought function using experimental data. The research method involves the development of a technique for interpolation and extrapolation of experimental data using various functions in the Matlab package. The result of the investigation is a technique that allows you to create a uniform grid of reference values, fill them in at the required time, change them, extrapolate data between the data space, and then feed this argument into the function ϵ zero, see the insertion of additional arguments in the valued function, synthesize the valued functions in new nodes support grid value. The application of a standardized technique for molding the high value of liquid fluidity of the old cellulose insulation of power transformer windings as a function of temperature, moisture and access to acidity, which allowed at least 4.5 times, was introduced. increase the amount of data equal to the experiment.

Key words: experimental data processing, interpolation, extrapolation, Matlab functions, aging rate of insulation.

Поляков Михайло Олексійович – д. т. н., проф., професор кафедри «Електричні та електронні апарати», Національний Університет «Запорізька політехніка», Україна.

Ленок Анастасія Анатоліївна – старший викладач кафедри «Обробка металів тиском», Національний Університет «Запорізька політехніка», Україна.

Поляков Олексій Михайлович – студент кафедри «Інформаційні системи та технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Poliakov Mykhailo Oleksiiovych – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Electrical and Electronic Apparatuses, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Ukraine.

Lenok Anastasiya Anatoliivna – senior lecturer of the Department of Metal Forming, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Ukraine.

Oleksiy Mykhailovych – student department “Information systems and technology”, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

М.О. Федотова, Д.В. Трушаков, В.О. Зубенко,
І.А. Березюк, Р.С. Заворуєв, М.О. Трипольський

ОЦІНЮВАННЯ ЗМІНИ ВИСОТИ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ В СУШИЛЬНІЙ КАМЕРІ НЕПРЯМИМ МЕТОДОМ

Анотація. Сушіння за допомогою киплячого шару має ряд переваг. Але поряд з цим одним з головних чинників, що впливають на зміну кінцевої вологості дисперсного матеріалу під час сушіння, є його висота на каскадах решетах безпосередньо в камері сушіння, значення якої впливає на якість «киплячості». Виміряти зміну висоти під час процесу на каскадах фізично не можливо, тому у даній роботі пропонується, як варіант, через відомий зв'язок зміни висоти з кінцевою вологістю оцінювати дисперсію висоти через виміряне датчиком вологості кінцевого значення. Математичний зв'язок вхідних і вихідних сигналів сушарки буде покладено в основу синтезу системи спостереження.

Ключові слова. Система спостереження, киплячий шар, агент сушіння, дисперсний матеріал, автоматизація, кінцева вологість.

Постановка проблеми. Достовірні дані про зміну вхідних і вихідних сигналів під час сушіння дисперсного матеріалу методом «киплячого шару» дає змогу синтезувати якісну, швидкодіючу на надійну систему автоматизованого керування процесом, принцип якого наступний. Дисперсний матеріал, потрапляючи з бункера, який попередньо продувається теплоносієм і де вже частково втрачається надлишкова волога, через запірну арматуру (шибер S_n) потрапляє на верхнє решето (№1). Дисперсний матеріал, розміщуючись на каскадах, що знаходяться під певним кутом до горизонту, знизу продувається агентом сушіння з температурою T . Під дією напору повітря, в результаті чого щільний дисперсний матеріал розрихлюється і набуває стану «кипіння» та завдяки нахилу решет, матеріал рухається зверху вниз, під час чого поступово та «м'яко» втрачає вологу w .

Аналіз зв'язків, що утворюються під час сушіння в сушарці з киплячим шаром (рис. 1) показав, що на зміну кінцевої вологості, яка і є пріоритетним контролюючим параметром, головним чином впливають Температура теплоносія та кількість дисперсного матеріалу на каскаді, яка характеризується висо-

тою цього матеріалу V . Якщо засоби контролю та регулювання температури та зміни положення завантажуючого шибєру можна обрати легко, то виміряти висоту киплячого шару безпосередньо на каскадах під час стану «кипіння» без порушення процесу не реально.

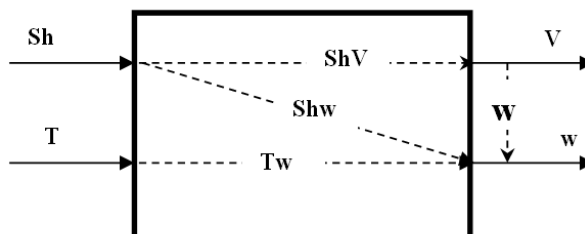


Рисунок 1 – Схема зв'язків вхідних і вихідних сигналів зерносушарки, як об'єкта автоматизації



Рисунок 2 – Фото сушарки з киплячим шаром

Як з'ясувалось з результатів первинного аналізу експериментально знятих кривих, зміна висот киплячого шару V по каскадах пов'язана не лише з кінцевою вологістю матеріалу, а й корельовані один з одним [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вагомий внесок у впровадження автоматизації для сушарок з киплячим шаром зробили Баскаков А.С., Рашковська Н.Б, Романков П.Г., Забродський С.С., Мартиненко І.І, Федоров В.Г. та ін.. Їх наробки в якійсь мірі мають як переваги, так і недоліки [2].

У той же час процеси, що відбуваються під час «кипіння» дисперсного матеріалу в сушарці, ще не повністю досліджені, а обладнання, в основі яких положено принцип «киплячості» – не ідентифіковані. Щоб автоматизувати нову конструкцію сушарки (рис. 2), розроблену при Центральноукраїнському націо-

нальному технічному університеті, необхідно було провести ряд дослідів для встановлення кореляції сигналів та опису їх зв'язків за допомогою математичних моделей.

Мета дослідження. Ми пропонуємо на основі відомого опису зв'язків параметрів процесу розробити систему оптимального спостереження, за рахунок якої вимірюватиметься один з вихідних параметрів зерносушарки (у даному випадку кінцева вологість w) та оцінювалася б дисперсія похибки оцінки висоти киплячого шару V на кожному з семи каскадів. Контролювати висоту у певних межах дуже важливо для стабілізації «киплячості»

Викладення основного матеріалу дослідження. Нехай кінцева вологість матеріалу w може бути виміряна датчиком вологості ємнісного типу з матрицею передаточних функцій (МПФ) $K_{\epsilon M}$:

$$K_{\epsilon M} = \begin{bmatrix} 0 & 0,5 \\ & 8s + 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0625 \\ & s + 0.125 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0625 \\ & s + \omega_K \end{bmatrix}$$

із спектральною щільністю завади вимірювання

$$S_{\varphi\varphi}^{\epsilon M} = \frac{1.5^2}{3\pi},$$

або мікрохвильовим датчиком вологості з МПФ K_M

$$K_M = \begin{bmatrix} 0 & 0,0625 \end{bmatrix}$$

із спектральною щільністю завади вимірювання $S_{\varphi\varphi}^M$

$$S_{\varphi\varphi}^M = \frac{0.5^2}{3\pi}$$

Тоді задача синтезу спостерігача полягає у тому, щоб за відомими МПФ датчиків вологості $K_{\epsilon M}$, K_M із відповідними спектральними щільностями завад

вимірювання $S_{\varphi\varphi}^{\epsilon M}$, $S_{\varphi\varphi}^M$, поліноміальною матрицею P_k , що відповідає k -тому

каскаду, та відомою матрицею спектральних щільностей (МСЩ) збурень $S_{\psi\psi}^k$, що діють на цьому каскаді, необхідно:

1. Визначити для всіх каскадів ЗКШ структуру і параметри системи спостереження $F_{\epsilon M}^k$ на базі датчика вологості ємнісного типу;

2. Обчислити за виразом (2.31) показник якості оцінювання спостерігачем $F_{\epsilon M}^k$ вихідних сигналів для всіх k каскадів;

3. Обрати той каскад, показник якості оцінювання для якого є мінімальним;

4. Для обраного каскаду визначити МПФ F_M^k на базі мікрохвильового датчика вологості і обрахувати його показник якості;

5. Обрати датчик вологості того типу, система спостереження на базі якого доставляє мінімум показника якості.

Для вирішення поставленої задачі було використано методику, пункти якої перераховані вище), результати виконання якої приведені, як приклад, для каскаду №7 (нижнього).

Відповідно обраній методиці і враховуючи структуру і параметри матриці Р для сьомого каскаду та МСЩ $S'_{\psi\psi}$, спершу було сформовано матрицю $(S'_{\psi 0\psi 0})'$ за

$$S'_{\psi 0\psi 0} = \frac{0,079618 (s^2 + 0,2513 s + 0,02371) (s^2 - 0,2513 s + 0,02371)}{(s + 0,125) (s - 0,125) (s + 0,01) (s - 0,01)},$$

а потім виконано її факторизації, в результаті чого було визначено вираз для

$$D = \frac{0,28217 (s^2 + 0,2513 s + 0,02371)}{(s + 0,125) (s + 0,01)}.$$

Матриця Т відповідно має наступну структуру

$$T = \begin{bmatrix} \frac{-0,00037911(s - 0,125)(s - 0,01)}{(s - 0,125)(s + 0,026)(s - 0,01)(s^2 - 0,2513s + 0,02371)} \\ \frac{-0,0020062(s - 0,125)(s - 0,01)}{(s - 0,125)(s + 0,01)(s - 0,01)(s^2 - 0,2513s + 0,02371)} \end{bmatrix}.$$

Виконаємо сепарацію [4] попереднього виразу і здобудемо

$$(T_0 + T_+) = \begin{bmatrix} \frac{-0,01226}{(s + 0,026)} \\ \frac{-0,076207}{(s + 0,01)} \end{bmatrix}.$$

Після підстановки знайдених виразів була отримана МПФ системи спостереження для сьомого каскаду F_{CM}^k . Виконання вказаної методики для решти каскадів дозволило отримати загальну для всіх них матрицю передаточних функцій системи спостереження F_{CM}^k , структура якої наступна:

$$F_{\epsilon M}^k = \frac{s + 0.125}{s^2 + 0.2476s + 0.02278} \begin{bmatrix} \frac{k_{11}(s + 0.01)}{s + \omega_{11}} \\ 0.032644 \end{bmatrix}.$$

Якщо ж проаналізувати коефіцієнти та елементи отриманих матриць, то можна побачити, що структура їх ідентична, зокрема елемент (s+0,125) відноситься до вимірювача вологи, а елементи (s+0,01) та частина знаменника (s+ω₁₁) належать безпосередньо самому об'єкту керування (3.26).

Тоді загальний вигляд матриці передаточних функцій системи спостереження з урахуванням аналізу отриманих даних можна сформулювати так:

$$F_{\epsilon M}^k = \frac{s + \omega_K}{s^2 + 0.2476s + 0.02278} \begin{bmatrix} \frac{k_{11}(s + \omega_{12})}{s + \omega_{11}} \\ 0.032644 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{k1} \\ F_{k2} \end{bmatrix}.$$

Елемент F_{k1} визначає зміну висоти киплячого шару $\hat{h}$ на кожному з каскадів за даними датчика вологості. А от елемент F_{k2} залишається незмінним, адже характеризує вимірювання вологості $\hat{w}$ на виході з ЗКШ, яка контролюється лише в одній точці, а не по кожному каскаду.

Параметри отриманої моделі для каскадів №1–№7 зведено до табл.1

Таблиця 1

Значення параметрів МПФ спостерігача $F_{\epsilon M}^k$

Каскад	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
коефіцієнт							
k₁₁ (x 10⁻³)	0.075199	0.041714	0.047935	0.038755	0.032481	0.046265	0.052184

В такому разі дисперсія погрешностей оцінювання висоти дисперсного матеріалу D_h та вологості D_ω може бути визначена так:

$$D_h = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{See}_{(1.1)}(s) ds, \quad D_\omega = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{See}_{(2.2)}(s) ds$$

Як результат - були отримані дисперсії похибок оцінювання висоти матеріалу по кожному з семи каскадів і кінцевої вологості насіння. Чисельні значення дисперсій зведено до табл. 2.

Значення похибки (дисперсії) оцінювання спостерігачем F_{CM}^k

спосте- рігач	каскад		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
	Сигнал, характе- ристика								
F_{CM}^k	$\hat{h}$	дисперсія	0,00872	0,00762	0,00731	0,00805	0,00750	0,00698	0,00677
		сер.кв.відхил	0,093	0,087	0,085	0,089	0,087	0,084	0,082
	$\hat{w}$	дисперсія	0,08279	0,08279	0,08279	0,08279	0,08279	0,08279	0,08279
		сер.кв.відхил	0,09099	0,09099	0,09099	0,09099	0,09099	0,09099	0,09099

Як видно з таблиці, найменшу похибку оцінювання має система спостереження, розрахована для каскаду №7. Тому по нижньому каскаду найдоцільніше визначати висоту зміну висоти киплячого шару на інших каскадах через відомий зв'язок висот матеріалу на кожному з каскадів між собою.

Висновки. В результаті застосування розробленої технології і відповідного програмно-технічного комплексу була синтезована система спостереження з оптимальною структурою і параметрами. Абсолютна погрішність вимірювання вихідних сигналів ЗКШ складає 6,7 мм по висоті.

ЛІТЕРАТУРА/ЛИТЕРАТУРА

1. Федотова М.О. Автоматизація процесу стабілізації висоти киплячого шару насіння у зерносушарці за неповними вимірами: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.13.07. Кропивницький, 2017. 276 с.
2. Sergey Osadchy, Valentina Zubenko, Marianna Fedotova. Synthesis of an Optimal Stochastic Stabilization System for an Unstable Multivariable Object with Time Delays in Controls. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), October, 16-18, 2018 Kyiv, Ukraine. P. 114-118.
3. Федотова М.О., Скриннік І.О., Осадич С.І., Трушаков Д.В. Ідентифікація сигналів як один з етапів синтезу системи стабілізації висоти киплячого шару в зерносушарці «Системні технології» 4 (135) 2021 «System technologies» [DOI 10.34185/1562-9945-4-135-2021-09]
4. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий, монография. К.: НАУ, 2006. 438 с
5. Trushakov, D., Kozlovskyi, O., Rendzinyak, S., Fedotova, M., Korud, V. Automated System for Measuring the Temperature of the Desiccator Proceedings of 2020 IEEE

21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2020, 2020, 9238716 Conference Paper.

6. Трушаков Д., Козловський О., Рендзіняк С., Коруд В., Федотова М Автоматизована система фільтрації завад під час вимірювання температури сушильної шафи. Електроніка та інформаційні технології. 2021. Випуск 15. С. 80–89 Electronics and information technologies. 2021. Issue 15. P. 80–89 [http://elit.lnu.edu.ua/en/15/8.html].

REFERENCES

1. Fedotova MO Automation of the process of stabilizing the height of the fluidized bed of seeds in the grain dryer by incomplete dimensions: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.13.07. Kropyvnytskyi, 2017. 276 p.
2. Sergey Osadchy, Valentina Zubenko, Marianna Fedotova. Synthesis of an Optimal Stochastic Stabilization System for an Unstable Multivariable Object with Time Delays in Controls. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), October, 16-18, 2018 Kyiv, Ukraine. P. 114-118.
3. Trushakov, D., Kozlovskyi, O., Rendzinyak, S., Fedotova, M., Korud, V. Automated System for Measuring the Temperature of the Desiccator Proceedings of 2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2020, 2020, 9238716 Conference Paper.
4. Fedotova MO, Skrynnik IO, Osadichy SI, Trushakov DV Identification of signals as one of the stages of synthesis of the fluidized bed height stabilization system in the grain dryer "System Technologies" 4 (135) 2021 «System technologies» [DOI 10.34185/1562-9945-4-135-2021-09]
5. Trushakov D. Kozlovsky O., Rendzinyak S., Korud V., Fedotova M Automated noise filtration system during drying cabinet temperature measurement. Electronics and information technology. 2021. Issue 15. pp. 80–89 Electronics and information technologies. 2021. Issue 15. P. 80–89 [http://elit.lnu.edu.ua/en/15/8.html]
6. Azarskov VN Methodology of designing optimal systems of stochastic stabilization / V.N. Азарсков, Л.Н. Blokhin, L.S. Zhitetsky, monograph. K .: NAU, 2006. 438 p.

Received 16.04.2024.
Accepted 19.04.2024.

***Evaluation of the change in the height of the dispersed material
in the drying chamber by the indirect method***

As a result of the implementation of previously developed technologies, it is proved that a fluidized bed grain dryer is a complex multidimensional object with distributed parameters and a net delay, the value of which depends on the distance of the dryer cascade from the loading shutter.

In the stable mode, the dynamics model of such a complex control object can be represented in the form of a set of transfer function matrices. The structure of each of the matrices remains the same, and the parameters change depending on the placement of the cascade relative to the shutter loading.

Disturbances acting on the cascades in real operating conditions should be considered as two-dimensional stationary random processes of the "white noise" type, the intensity of which changes with the distance from the load shutter.

It was also established that the changes in the height of the fluidized layer on each of the cascades are related to each other, that is, knowing the height of the fluidized layer on one of the cascades, it is possible to determine it on any other.

As a result of structural identification, it was proved that there is a cross-connection between the change in the height of the fluidized bed in the cascade with the number k and the final moisture content of the material at the exit from the dryer. This made it possible to synthesize the matrix of transfer functions of the optimal observer, which evaluates the change in the height of the fluidized bed in any cascade based on the signal about the change in seed moisture at the output with the minimum error variance.

Keywords. Monitoring system, fluidized bed, drying agent, dispersed material, automation, final humidity.

Федотова Маріанна Олександрівна - асистент, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Трушаков Дмитро Володимирович - доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Зубенко Валентина Олександрівна – доцент, Херсонський державний аграрно-економічний університет.

Березюк Ірина Анатоліївна - доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Заворуєв Роман Сергійович - аспірант, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Трипольський Максим Олександрович – студент, Центральноукраїнський національний технічний університет.

Fedotova Marianna - assistant, Central Ukrainian National Technical University.

Trushakov Dmitro - associate professor, Central Ukrainian National Technical University.

Zubenko Valentina - associate professor, Kherson State Agrarian and Economic University.

Berezyuk Irina - associate professor, Central Ukrainian National Technical University.

Roman Zavoruyev - postgraduate, Central Ukrainian National Technical University.

Maxim Trypolskyi - student, Central Ukrainian National Technical University.

ЗАСТОСУВАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНИХ БУДІВЕЛЬ

Анотація. В роботі розглянуто застосування згорткових нейронних мереж для виявлення пошкоджених будівель на зображеннях. Дослідження спрямоване на покращення розуміння та практичне застосування згорткових мереж в задачах розпізнавання пошкоджених будівель на знімках. Для досягнення мети було визначено оптимальну архітектуру згорткової мережі, а саме U Net. Архітектура U Net застосовується в задачах семантичної сегментації, що є перевагою для розпізнавання пошкоджених будівель, оскільки вносить більшу точність на рівні пікселів, серед інших переваг – простота моделі та можливість використання меншої кількості даних для навчання. Для навчання мережі було створено унікальний набір даних з використанням наявних зображень у сервісі Google Earth міста Маріуполь у 2022 році. В роботі розглянуто різні конфігурації моделей, для розрахунку якості були використані такі метрики як загальна точність, IoU (Intersection over Union) окремо для двох класів будівель та середній показник IoU для всіх класів. Було визначено найкращу модель серед навчених з оптимальними параметрами для вирішення поставленої задачі.

Ключові слова: розпізнавання пошкоджених будівель, згорткові нейронні мережі, комп'ютерний зір, семантична сегментація, супутникові знімки, CNN, U Net, Google Earth.

Вступ

Військові дії, розпочаті Росією проти України, призвели до величезних масштабів руйнувань, що можуть збільшитися у майбутньому. Значний об'єм руйнувань та площа постраждалих регіонів ускладнюють задачу, унеможливаючи швидко та якісно оцінити завдані збитки та визначити найбільш постраждалі населені пункти. Таким чином виникає проблема у своєчасному аналізі руйнувань та визначенні пріоритетів в наданні допомоги постраждалим регіонам. В ході військових дій інфраструктура країн та приватний сектор зазнають значних руйнувань, в свою чергу, ручна обробка є довгою та складною задачею, враховуючи великий обсяг даних.

Автоматизація процесу виявлення, або іншими словами – розпізнавання будівель на зображеннях, наприклад, супутникових або зроблених за допомо-

гою безпілотних літальних апаратів, надає потужний інструмент для вирішення поставленої задачі.

Постановка проблеми

Метою даної роботи є дослідження процесу розпізнавання пошкоджених будівель на зображеннях за допомогою згорткових нейронних мереж, визначення оптимальної архітектури та використання навченої нейронної мережі, як компонента в інтелектуальній системі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Тема розпізнавання пошкоджених будівель вже була розглянута в різних дослідженнях. Так, наприклад, у роботі [1] розглядається використання згорткових мереж для виявлення зруйнованих будинків після природніх катастроф. Набір даних містить більше 2 мільйонів об'єктів розділених на 60 категорій, автори проводять навчання моделі на окремій області, що в свою чергу зменшує необхідну для навчання кількість даних. В даному дослідженні вдалося досягти точності класифікації у 96% для вцілілих будівель та 76% для зруйнованих, також зазначається велика роль порогового значення для точності класифікації.

В роботі [2] пропонується архітектура з використанням різних компонентів та новий метод, заснований на глибокому навчанні, для більш швидкого виявлення будівель після землетрусу: система має обробку зображень та виділення їх ознак за допомогою однопохового автокодеру, після чого застосовується процедура, заснована на правилах, яка відбирає належні навчальні зразки. Побудована в рамках дослідження система отримала загальну точність класифікації на рівні 93%, каппа-коефіцієнт деяких застосованих алгоритмів склав 74%.

Також в деяких дослідженнях приводиться використання алгоритму SSD (англ. *Single-shot Multibox Detector*) у поєднанні із згортковими мережами, автори зазначають про збільшення точності на 10% в порівнянні із звичайним використанням SSD [3]. Загалом варто відмітити невелику кількість досліджень, які були б присвячені подоланню наслідків саме після військових дій. У наявних статтях [4-5] йде мова про використання різних математичних моделей, які б використовували такі ознаки, як тінь, дисперсія та кореляція, або схожий за логікою аналіз текстур будівель на супутникових знімках з урахуванням коефіцієнту інтенсивності пікселів.

Варто відзначити складність застосування одних моделей в різних ситуаціях – оскільки характер руйнувань від стихії та військових дій може значно відрізнятися. Також, навчені моделі на наборі даних, місцевість яких

характерна для одних країн, може не надавати таку саму точність, при використанні в інших випадках.

Архітектура нейронної мережі U-Net

Для визначення необхідної архітектури були проаналізовані як наявні публікації, так і сучасні моделі нейронних мереж, такі як VGG16, U-Net, R-CNN. Кожна з архітектур має власні переваги та особливості, які необхідно врахувати при застосуванні. В свою чергу, у даному дослідженні були вирішено використати архітектуру U-Net (рис. 1), оскільки вона має спрощену будову та меншу кількість параметрів, що значно прискорить навчання. На рисунку 1 наведено архітектуру згорткової мережі U-Net.

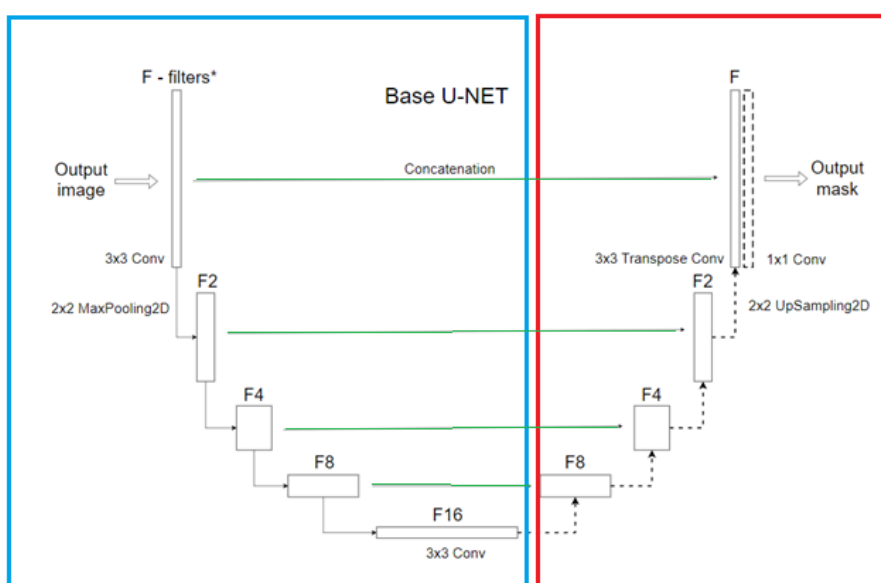


Рисунок 1 – Архітектура згорткової мережі U-Net

Дана архітектура вже використовувалася у задачах семантичної сегментації – техніці комп'ютерного зору, в якій кожному пікселю зображення можна надати деякий клас, що дозволяє обраховувати точність класифікації для кожного класу на рівні пікселів. Завдяки даній техніці також можна створити більш інтерпретовані для розуміння людини результати у вигляді зображення, що будуть практично корисними у завданнях з виявлення пошкоджених будівель [6].

U-Net – згорткова нейронна мережа, що має повністю згорткову будову (англ. *Fully Convolutional Network, FCN*), однією з особливостей – відсутність повнозв'язних шарів, що в свою чергу зменшує кількість тренуваних параметрів та спрощує модель. U-Net має подібну до encoder-decoder структуру, яка наведена на рис. 1. Синє обрамлення визначає шлях згодження (або

згортки), і відповідає за відбір необхідних ознак, в той час як червона рамка виділяє шлях розширення – зображення «відновлюються» в розмірі за допомогою підвищення дискретизації [6].

Опис набору даних

Оскільки українська місцевість та міста мають власні особливості, для дослідження було створено окремий набір даних, який містить 50 зображень розміром 512 на 512 пікселів. Дані зібрані за допомогою сервісу Google Earth з міста Маріуполь за 2022 рік [7,8]. Задля спрощення поставленого завдання, обрано будинки переважно із приватного сектору, оскільки внесення інших видів будівель потребувало б більшого набору даних та варіативності зображень.

Загалом набір даних містить близько 1000 будинків двох класів: пошкоджені та не пошкоджені, які мають невеликий дизбаланс у кількості. Для подолання даної проблеми (а також різницю кількості пікселів заднього фону у порівнянні з класами будинків) використовується окремі коефіцієнти при навчанні моделі. На рис. 2 наводиться приклад зображень з набору. Для розширення варіативності набору даних застосовувалися аугментації, наприклад, поворот та віддзеркалення зображення, зміщення, приближення тощо.

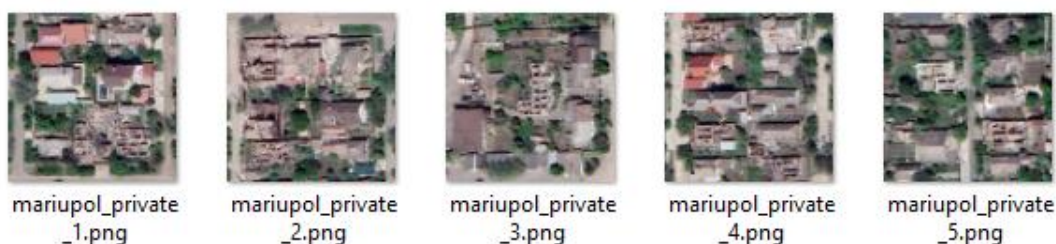


Рисунок 2 – Приклад зображень із набору даних

Побудова та навчання моделі

Побудова моделей відбувалася за допомогою хмарного сервісу Google Colab, який надає як комерційні, так і безкоштовні потужності для вирішення завдань штучного інтелекту та машинного навчання. Мовою реалізації є Python, з використанням таких бібліотек як Tensorflow, надбудови Keros та SciKit-Learn.

Було реалізовано «блочну» структуру у відповідності із архітектурою, наведеною на рис. 1. Існує декілька видів блоків, наприклад, блоки енкодеру, декодеру та «пляшкового горла», яке відповідає за найвужче місце нейронної мережі. Відповідно кожен блок містить елементи згорткових мереж, як шар

згортки, пулінговий шар, шари активації тощо, згідно із «класичною» архітектурою U-Net [6].

На рис. 3 наведено результати попереднього навчання початкової моделі, кожен графік містить відомості метрик на кожній епосі навчання: розрахунок втрат, точність навчання, середнє IoU, та IoU для класів пошкоджених (клас 1) та вцілілих (клас 2) будівель.

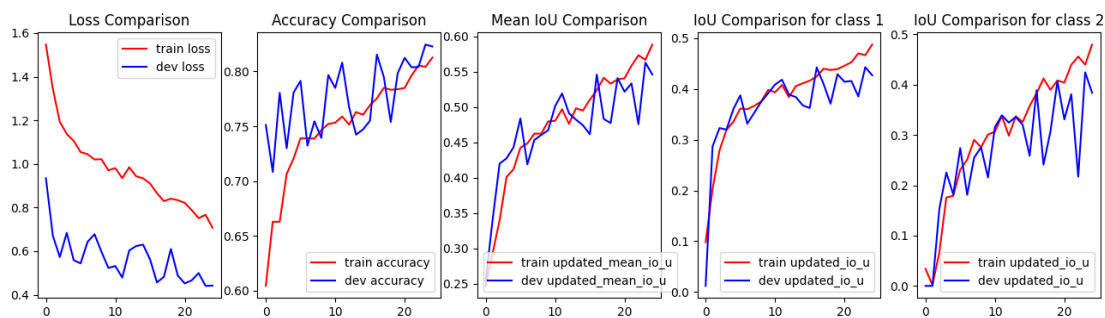


Рисунок 3 – Результати для набору даних для навчання та тестів

На рис. 4 відображені деякі результати з тестового набору даних: оригінальне зображення і маску, та згенеровану сегментаційну карту.

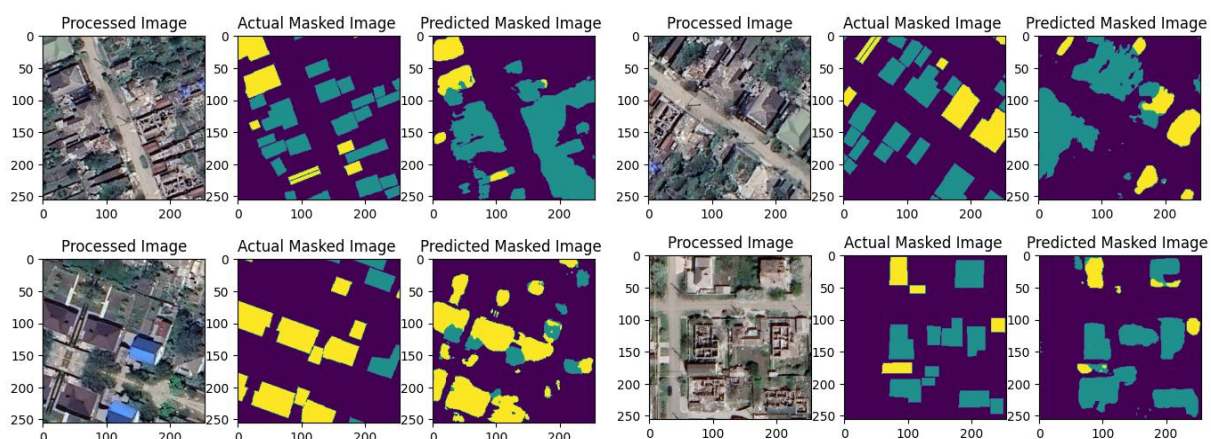


Рисунок 4 – Результати сегментації зображень

Як можна побачити з попередніх результатів, побудована модель відносно точно відносить кожен піксель зображення до визначених класів. Основна складність полягає у визначенні схожих за кольоровою гамою об'єктів, як наприклад, міжбудинкові дороги чи майданчики, в деяких випадках нейромережа плутає земляні ділянки з вцілілими будинками.

Результати дослідження

Окрім початкової моделі було побудовано ще чотири, які мають різні параметри архітектури та навчання, як зміна кількості епох, аугментацій та

фільтрів у мережі. Таблиця 1 містить визначення деяких із параметрів, як втра-
ти, точність, значення IoU для класів будинків та час навчання.

Таблиця 1

Результати дослідження точності моделей на наборі для тестів

№	Модель	Loss	Accuracy	IoU Dam- aged	IoU Normal	Час
1	32 Filters, 256x256, 25 epochs, 10x augmentations	0.4417	0.8228	0.4267	0.3837	6 хв. 7 с.
2	32 Filters, 256x256, 50 epochs, 10x augmentations	0.5706	0.7961	0.3908	0.3387	11 хв. 57 с.
3	32 Filters, 256x256, 25 epochs, 5x augmentations	0.5165	0.7888	0.3968	0.3267	2 хв. 41 с.
4	64 Filters, 256x256, 25 epochs, 10x augmentations	0.4023	0.8421	0.4583	0.4914	13 хв. 16 с.
5	64 Filters, 256x256, 40 epochs, 10x augmentations	0.4928	0.8404	0.4498	0.4787	19 хв. 37 с.

В ході дослідження побудовано та навчено різні моделі архітектури U-Net. Найкраща модель №4 має складнішу будову; загальна точність досягає 84.21% на рівні пікселів. Відповідні показники IoU для класів пошкоджених будівель та вцілілих: 45.83% та 49.14%.

Висновки

В роботі розглянуто застосування згорткових нейронних мереж для вияв-
лення пошкоджених будівель на зображеннях. Було визначено оптимальну
архітектуру згорткової мережі - U-Net. Архітектура U-Net використовується для
розпізнавання пошкоджених будівель, оскільки більш точно розпізнає зобра-
ження на рівні пікселів. Для навчання мережі було створено унікальний набір
даних з використанням наявних зображень у сервісі Google Earth міста
Маріуполь у 2022 році. В роботі розглянуто різні конфігурації моделей, для
розрахунку якості були використані такі метрики як загальна точність, IoU (In-
tersection over Union) окремо для двох класів будівель та середній показник IoU
для всіх класів. В результаті було виявлено найкращу модель серед навчених з
оптимальними параметрами для вирішення поставленої задачі. Результати
дослідження можуть бути використані у подальших розробках подібних систем
для практичного застосування.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. V Rashidian V, Baise LG, Koch M, Moaveni B. Detecting Demolished Buildings after a Natural Hazard Using High Resolution RGB Satellite Imagery and Modified U-Net Convolutional Neural Networks. Remote Sensing. 2021. Vol. 13(11):2176. DOI: 10.3390/rs13112176.
2. Takhtkeshha, Narges, Ali Mohammadzadeh, and Bahram Salehi. A Rapid Self-Supervised Deep-Learning-Based Method for Post-Earthquake Damage Detection Using UAV Data (Case Study: Sarpol-e Zahab, Iran). Remote Sensing. 2023. Vol. 15, 1: 123. DOI: 10.3390/rs15010123.
3. Li, Yundong, Wei Hu, Han Dong, and Xueyan Zhang. Building Damage Detection from Post-Event Aerial Imagery Using Single Shot Multibox Detector. Applied Sciences. 2019. Vol. 9, 6: 1128. DOI: 10.3390/app9061128.
4. Ghandour, Ali J., and Abedelkarim A. Jezzini. Post-War Building Damage Detection. Proceedings. 2018. Vol. 2, 7: 359. DOI: 10.3390/ecrs-2-05172.
5. Aimaiti, Yusupujiang, Christina Sanon, Magaly Koch, Laurie G. Baise, and Babak Moaveni. War Related Building Damage Assessment in Kyiv, Ukraine, Using Sentinel-1 Radar and Sentinel-2 Optical Images. Remote Sensing. 2022. Vol. 14, 24: 6239. DOI: 10.3390/rs14246239.
6. Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Springer. 2015. Vol. 9351: 234-241. DOI: arXiv:1505.04597
7. OPEN DATA PROGRAM. Махар: вебсайт. URL: <https://www.maxar.com/> open-data (дата звернення: 10.11.2023).
8. Google Maps, Google Earth, and Street View. Google : вебсайт. URL: <https://about.google/brand-resource-center/products-and-services/geo-guidelines/> (дата звернення: 10.11.2023).

Received 17.04.2024.

Accepted 19.04.2024.

Application of convolutional neural networks to detect damaged buildings

The paper considers the use of convolutional neural networks for detecting damaged buildings in images. The research is aimed at improving the understanding and practical application of convolutional networks in the tasks of recognizing damaged buildings in images. To achieve the goal, the optimal convolutional network architecture, namely U-Net, was determined. The U-Net architecture is used in semantic segmentation tasks, which is an advantage for damaged building recognition, as it introduces higher accuracy at the pixel level, among other advantages is the simplicity of the model and the ability to use less data for training. To train the network, a unique dataset was created

using the available Google Earth images of the city of Mariupol in 2022. Different configurations of models were considered in the work, such metrics as overall accuracy, IoU (Intersection over Union) separately for two classes of buildings and the average IoU for all classes were used to calculate the quality. The best model among those trained with the optimal parameters for solving the task was determined.

Димо Валерій Володимирович - магістр комп'ютерних наук Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Гожий Олександр Петрович – професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, д.т.н., професор.

Калініна Ірина Олександрівна – доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, к.т.н., доцент.

Dymo Valery Volodymyrovych - master of computer sciences, the Black Sea National University named after Petra Mohyly.

Gozhyj Oleksandr Petrovych - professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, D.eng.s., professor.

Kalinina Iryna Oleksandrivna - Associate Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, Ph.D., associate professor.

Ю.А. Мала, Т.В. Селівьорстова, А.І. Гуда

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ORANGE ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ В ОСВІТНІЙ ГАЛУЗІ

Анотація. Розвиток систем електронного навчання та впровадження цифрових технологій у традиційний освітній процес призводить до появи великих інформаційних об'ємів, дослідженням яких займається інтелектуальний аналіз освітніх даних (ІАОД) наукова дисципліна, пов'язана із застосуванням методів інтелектуального аналізу даних до інформації, яку продукують освітні заклади. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення якості освітнього процесу за рахунок виявлення прихованих закономірностей в масиві освітніх даних. У роботі розкрито визначення інтелектуального аналізу освітніх даних, показана актуальність і необхідність подальшого розвитку даного напрямку в сучасних умовах. В якості прикладу побудована схема аналізу освітніх даних з метою демонстрації ефективного використання інструменту візуального програмування Orange для дослідження освітніх даних з застосуванням методів Data Mining, що дозволяє фахівцям в освітній галузі проводити якісний аналіз з подальшим використанням отриманих результатів при розробці стратегій для забезпечення ефективного процесу навчання та розвитку освіти.

Ключові слова: інтелектуальний аналіз даних, освітні дані, інструмент Orange, віджети, візуалізація, методи, кластеризація, Data Mining.

Актуальність теми. Зростання обсягів даних, що пов'язано з інтенсивним розвитком інформаційних технологій, створює потребу у високоефективних методах їх обробки та аналізу з метою ефективного управління різними видами організацій також з метою стратегічного планування та конкурентоспроможності їх на ринку. Такими методами обробки та аналізу даних є методи інтелектуального аналізу даних. Під інтелектуальним аналізом даних (ІАД, Data Mining), за визначенням засновника цього напрямку в сфері аналізу даних Г. П'ятецький-Шапіро [1], розуміють сукупність методів виявлення в даних раніш невідомих, нетривіальних, практично корисних і доступних інтерпретації знань, що необхідні для прийняття рішень в різних галузях людської діяльності. Спектр використання методів інтелектуального аналізу даних дуже широкий, основною умовою використання є наявність великої

кількості даних. Одним із перспективних напрямків застосування методів інтелектуального аналізу даних є освітня галузь. Погіршення якості навчання дітей в Україні, що показали результати тестування PISA, пов'язано з різними факторами, а особливо протягом останніх років пов'язано зі складними умовами провадження освітньої діяльності через виникнення пандемій і військового стану в країні. Таким чином залучення нових ефективних методів інтелектуального аналізу освітніх даних для виявлення певних закономірностей і факторів, що призводять до неякісних результатів в навчання і подальша розробка планів подолання негативних факторів є актуальною задачею сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням застосування методів інтелектуального аналізу даних приділили увагу багато науковців, як і зарубіжних вчених так і вітчизняних, зокрема: Колодчак О.М., Черняк О. І., Ілляшенко К., Г. Пятецький-Шапіро [1], Усама Файяд [1], А. Барсегяна, Ч. Танга і ін. Дослідженню у сфері інтелектуального аналізу освітніх даних присвячені роботи [2 – 8, 11]. Огляд та приклади застосування технологій візуального програмування розглянуто в працях [2, 3, 9].

Основною метою роботи є дослідження питання використання інструменту візуального програмування для задач інтелектуального аналізу даних та його застосування для аналізу освітніх даних, побудова схеми аналізу освітніх даних з використанням технологій Orange для демонстрації ефективності і зручності при виявленні прихованих закономірностей з метою вдосконалення освітніх процесів.

Виклад основного матеріалу. Інтелектуальний аналіз даних – це об'єднання математичних алгоритмів та новітніх досягнень в сфері інформаційних технологій, яке надає можливість видобутку корисної інформації з наявних даних і подальшого прийняття обґрунтованих і ефективних рішень.

Основні задачі, що вирішуються з використанням методів ІАД: класифікація – полягає в виявленні ознак, які характеризують групу до якої належить той чи інший об'єкт; кластеризація – полягає в пошуку незалежних груп (кластерів) та їх характеристик у всій множині аналізованих даних; асоціація – полягає в знаходженні частих залежностей (або асоціацій) між об'єктами чи подіями. Знайдені залежності представляються у вигляді правил і можуть бути використані як для кращого розуміння природи аналізованих даних, так і для передбачення появи подій; аналіз відхилень – полягає в виявленні найбільш

нетипових шаблонів; прогнозування – полягає в тому, що на основі особливостей історичних даних оцінюється пропущені або ж майбутні значення цільових чисельних показників.

На даний час існує достатньо велика кількість інструментів, що допомагають вирішувати задачі ІАД:

- Мови програмування: Python, R, C++.
- Програмне забезпечення: KNIME, Orange, WEKA і інші.

Вибір програмного забезпечення залежить від типу даних, кількості даних, мети використання, можливостей замовників. Вибір інструменту ІАД обмежується вартістю та функціоналом програмного продукту. Щодо використання програмного продукту в навчальному процесі головними критеріями є: відкритий вихідний код, простота в використанні, наочність. Серед наявного програмного забезпечення в даній роботі буде розглядатися платформа Orange [10].

Orange — це фреймворк для візуалізації та аналітики даних, який спеціалізується на великій кількості методів машинного навчання та аналітичних інструментах. Його основною метою є зробити складні аналітичні методи доступними для широкого кола користувачів, включаючи тих, хто не має глибоких знань у програмуванні чи статистиці. Orange використовує мову програмування Python як один з основних елементів своєї архітектури. Python можна використовувати як складову частину своїх аналітичних проєктів в Orange, що дозволяє комбінувати візуальне програмування з написанням коду на Python для отримання рішень більш складних, персоналізованих аналітичних задач. Також Orange може бути використаний як бібліотека в середовищі Python і імпортувати функціональність Orange у код Python.

Orange складається з інтерфейсу Canvas, на який користувач поміщає віджети і створює робочий процес аналізу даних. Віджети – це будівельні блоки робочих процесів аналізу даних. Віджет виконує дії залежно від того, що ви виберете в списку віджетів у лівій частині екрана.

Функціями віджетів можуть бути наступні категорії [9, 10]:

- Data – віджети для введення / виведення даних, фільтрації, різні дії з вибірками, а також велика кількість навчальних наборів даних;
- Visualize – віджети для загальної і багатовимірної візуалізації;
- Classify – набір алгоритмів машинного навчання для класифікації;
- Regression - набір алгоритмів регресійного аналізу;

- Evaluate – кросвалідація, процедури на основі вибірки, аналіз методів прогнозування;
- Unsupervised – алгоритми кластеризації і проєкції даних.

Додаткові віджети для аналізу даних при необхідності, такі як Associate, Image analytics, Network, Text mining, Time series і інші є можливість завантажити [9, 10]. Користувач може інтерактивно досліджувати візуалізації або передавати обрану підмножину в інші віджети. В Orange процес застосування ІАД реалізується за допомогою візуального програмування, а саме віджетів. Інструмент Orange вміє розпізнавати файли як у власному так і в інших форматах даних (csv, exl). Вище перераховані переваги свідчать проте, що платформа Orange є ефективною в питаннях аналізу даних з залученням методів ІАД.

Перспективним напрямком застосування методів ІАД є освітня діяльність у зв'язку з тим, що відбувається інтенсивне накопичення великих даних в освітніх установах.

Великі дані в освіті можуть допомогти університетам, коледжам і школам трансформувати свої бізнес-моделі, академічні результати успішності студентів і ефективність викладачів. Крім того, знання, отримані з великих даних, можуть допомогти навчальним закладам покращити свої технологічні системи.

Великі дані в освіті охоплюють комплексний збір, обробку та інтерпретацію великих і різноманітних джерел даних у сфері освіти, що передбачає використання масивних наборів даних, створених навчальними закладами, студентами, викладачами та пов'язаними системами. Такі набори даних часто охоплюють широкий спектр інформації, включаючи демографічні дані студентів, записи про академічну успішність, дані відвідуваності, онлайн-взаємодії, результати оцінювання тощо. На основі цих даних можна знаходити закономірності і взаємозв'язки з подальшим прогнозуванням, що будуть залучені при побудові стратегії розвитку окремої освітньої установи, або розвитку освітніх процесів на рівні регіональному чи в рамках цілої держави.

Інтелектуальний аналіз освітніх даних (ІАОД, Educational Data Mining (EDM)) — це нова міждисциплінарна область досліджень, яка займається розробкою методів дослідження даних в освітній сфері, що допомагають виявляти раніше невідомі, практично корисні знання про освітній процес і його учасників з метою підтримки прийняття рішень [болюбаш]. ІАОД використовує статистичні методи, методи машинного навчання та методи Data Mining для

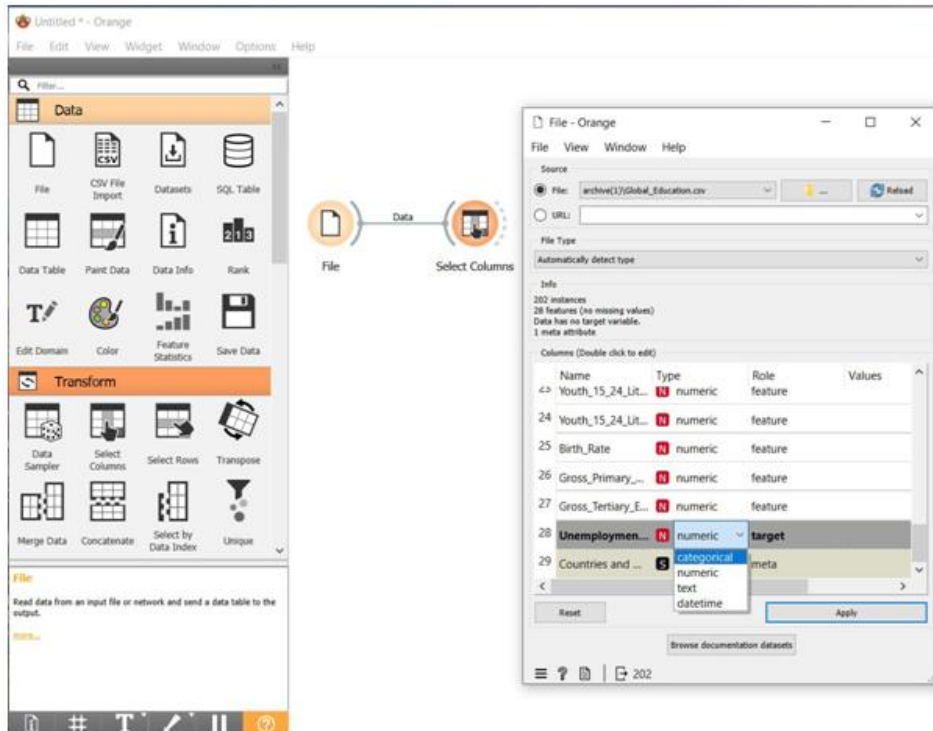


Рисунок 2 - Вибір типу даних і роль атрибуту

В випадку, коли при дослідженні не всі потрібні атрибути в таблиці, або необхідно видалити нульові значення в рядочках, то необхідно застосувати віджети Select Columns, Select Rows або Rank і з'єднавши з віджетом Data Table можна переглянути відредаговану таблицю (рис. 3).

	Unemployment_Rate	Countries and areas	15_24_Literacy_Rate
13	3.68	Central African ...	48
65	12.24	South Sudan	48
49	0.47	Niger	51
40	7.22	Mali	58
11	6.26	Burkina Faso	62
19	3.32	Ivory Coast	64
8	2.23	Benin	70
26	4.30	Guinea	70
63	4.43	Sierra Leone	71
69	16.53	Sudan	73
1	11.12	Afghanistan	74
16	4.34	Comoros	78
38	1.76	Madagascar	82
50	8.10	Nigeria	82
72	4.55	East Timor	82
58	1.03	Rwanda	84

Рисунок 3 - Відредагована таблиця даних з видаленими нульовими значеннями та видаленими зайвими стовпчиками

Для проведення первинного розвідувального статистичного аналізу була складена схема аналізу з використанням віджетів Scatter Plot та Distributions з розділу Visualize з метою виявлення наявних закономірностей, припущень відносно даних (рис. 4.).

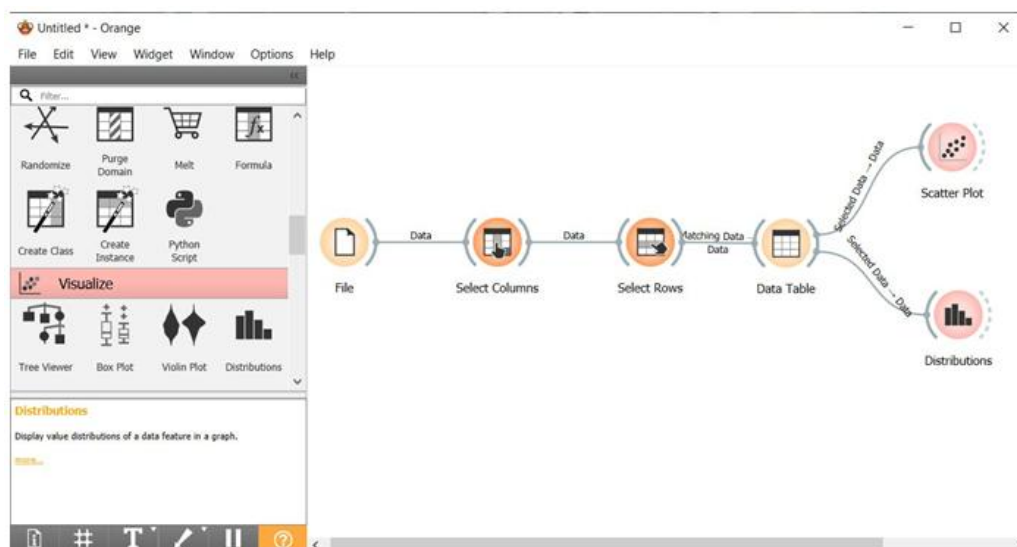


Рисунок 4 - Схема аналізу даних в Orange

Результати представлені розвідувального статистичного аналізу на рис. 5, рис. 6.

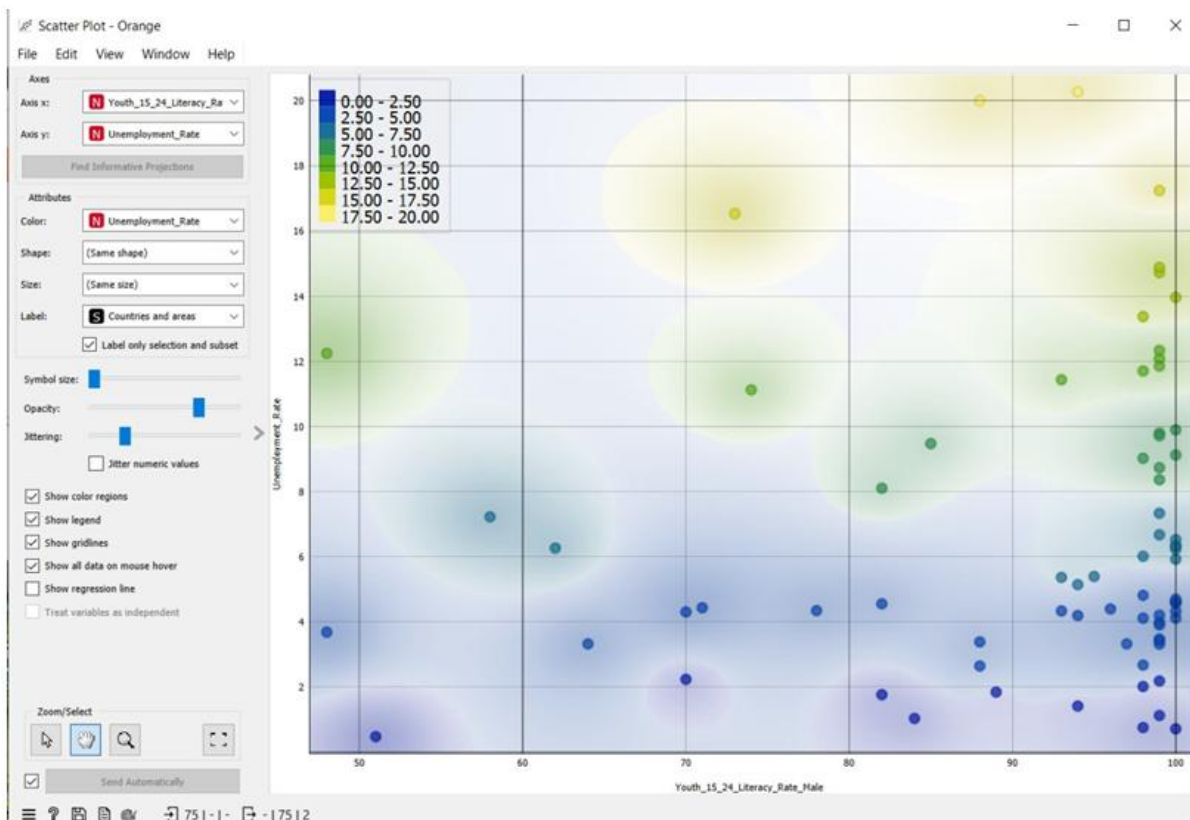


Рисунок 5 - Результат застосування Scatter Plot

Віджет Scatter Plot дає можливість візуалізувати дані у вигляді точкових графіків з попереднім аналізом та інтелектуальними поліпшеннями візуалізації даних. Основна мета цього віджету створити візуальну форму для кращого та ефективнішого розуміння закономірностей, прихованих у даних.

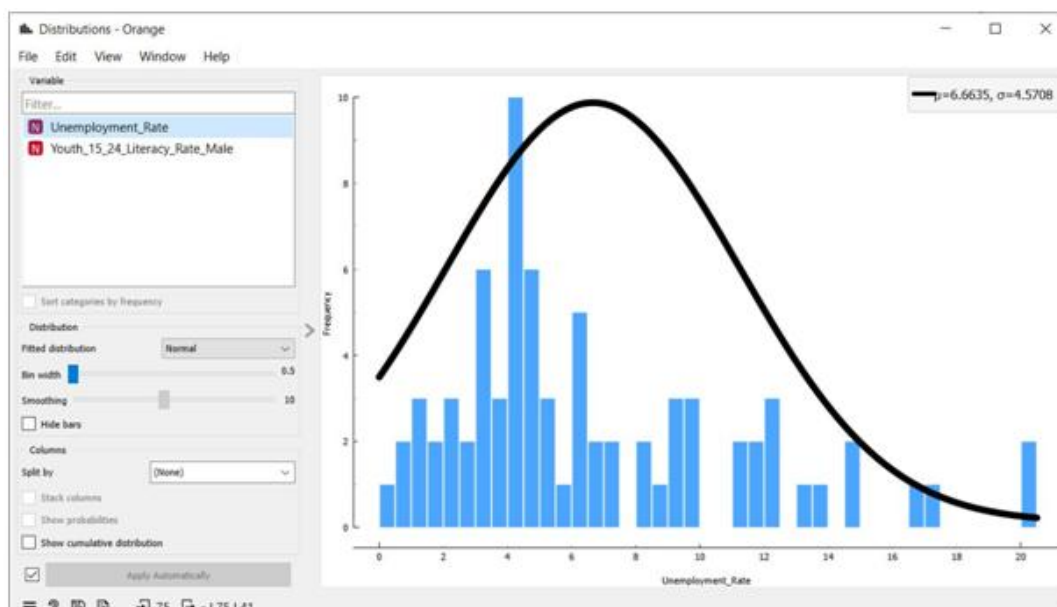


Рисунок 6 - Результат застосування віджету Distributions

Як видно з рис. 5 по осі x показано атрибут Youth_15_24_Literacy_Rate_Male, що показує рівень грамотності серед молодих чоловіків віком 15-24 роки, по осі y - Unemployment_Rate, що показує рівень безробіття у відповідних країнах, кольором виділено рівень безробіття у відповідних країнах. Рис. 5 демонструє цілком очевидний результат – рівень безробіття у відповідних країнах тим нижче, чим нижче рівень грамотності серед молодих чоловіків віком 15-24 роки.

Віджет Distributions дозволяє будувати діаграми, що демонструють динаміку змін в даному прикладі рівень безробіття у відповідних країнах.

На рис. 7 представлена як додаткова гілка в попередній схемі аналізу даних в Orange представляє собою процес застосування методу кластеризації k-Means.

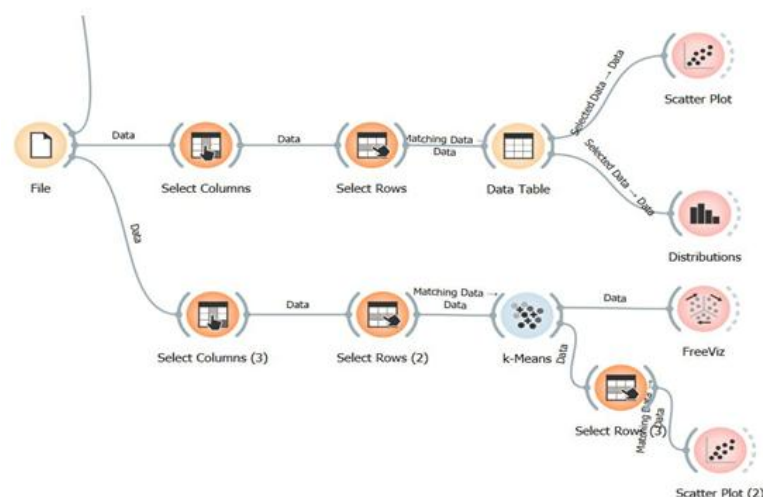


Рисунок 7 - Схема застосування методу кластеризації k-Means

Віджет k-Means з розділу Unsupervised застосовує алгоритм кластеризації k-Means до даних і виводить новий набір даних, до якого мітка кластера додається як метаатрибут. При застосуванні віджету k-Means необхідно застосувати один із віджетів з розділу Visualize для візуалізації результатів кластеризації. В нашому випадку для кластеризації були обрані такі атрибути: Unemployment_Rate - рівень безробіття у відповідних країнах, Primary_End_Proficiency_Math - знання математики наприкінці початкової освіти, Gross_Tertiary_Education_Enrollment - загальна кількість зареєстрованих у вищій освіті. Для візуалізації результатів методу кластеризації були обрані два віджета Scatter Plot і FreeViz. Результати представлені на рис. 8. та рис. 9.

На рис. 8 представлено 3 кластера, кількість яких задано заздалегідь в віджеті k-Means, що виділені різним кольором.

Розмір точок показує рівень безробіття в країнах, і можливо зробити висновок, що низький рівень безробіття пов'язаний з низьким знань математики наприкінці початкової середньої освіти, що підтверджується і на рис. 9 з застосуванням віджету Scatter Plot.

Треба відмітити, що серед віджетів є віджет Python Script в закладці Transform, що дозволяє розширити функціональні можливості за допомогою сценаріїв Python у вхідних даних, якщо відповідна функціональність не реалізована в існуючому віджеті. Така можливість надає інструменту візуального програмування Orange гнучкості в застосуванні і вирішенні різноманітних задач інтелектуального аналізу даних. Взагалі технології Orange єтивним інструментом для проведення аналізу даних в освітній сфері з використанням методів Data Mining.

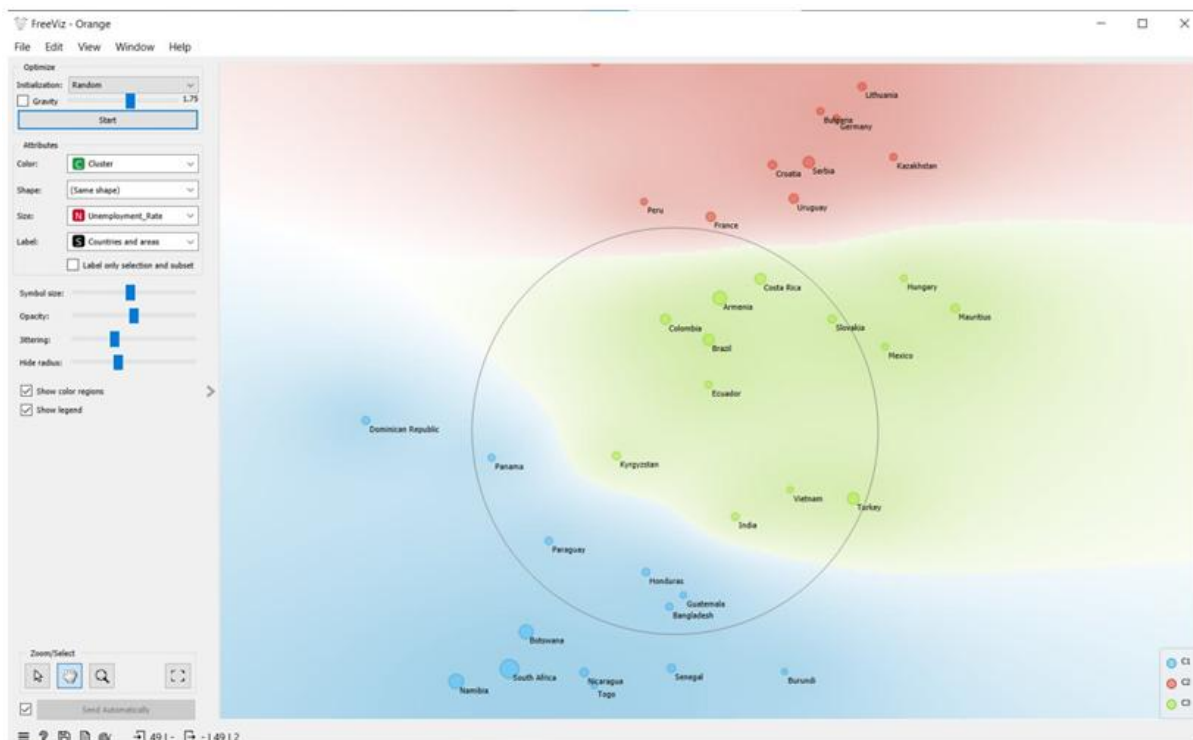


Рисунок 8 - Результат застосування віджета k-Means і FreeViz

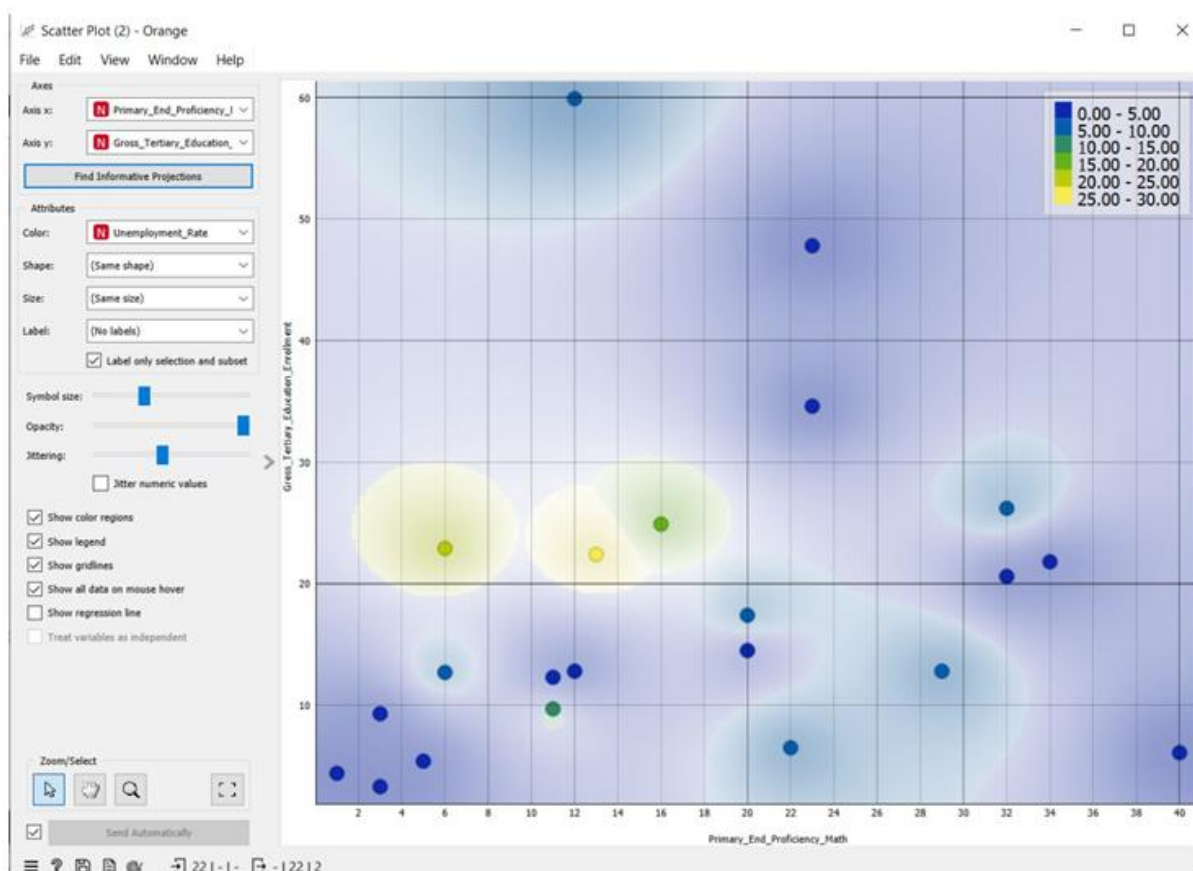


Рисунок 9 - Результат застосування віджета k-Means і Scatter Plot

Висновки. В роботі на основі проведеного дослідження та побудови наочного прикладу схеми аналізу освітніх даних було показано, що використання методів Data Mining і застосування в якості інструменту технології візуального програмування Orange дозволяє фахівцям в освітній галузі проводити якісний аналіз з подальшим використанням висновків при розробці стратегій для забезпечення ефективного процесу навчання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Piatetsky-Shapiro G., Frawley W. Knowledge Discovery in Databases. - Publisher: AAAI Press, 1991. 540 pp.
2. Abdelmagid A. S., Qahmash A. I. M.. Utilizing the Educational Data Mining Techniques "Orange Technology" for Detecting Patterns and Predicting Academic Performance of University Students // Information Sciences Letters. An International Journal, 2023. Vol. 12. No. 3. P. 1415-1431.
3. Hernández-Leal E., Darío Duque-Méndez N. C. Cechinel Unveiling educational patterns at a regional level in Colombia: data from elementary and public high school institutions // Heliyon, 2021. Vol. 7. P. 3-17.
4. M. Goyal, R. Vohra. Applications of Data Mining in Higher Education // International Journal of Computer Science Issues, 2012. Vol. 9. Issue 2. No 1. P. 113 – 120.
5. Вергун В. Р. Характеристика методів розв'язання задачі класифікації в інтелектуальному аналізі даних навчальних програм // Науковий вісник НЛТУ України, 2019. Т. 29. № 6. С. 136-139.
6. Romero C., Ventura S. Educational Data Mining: A Review of the State of the Art // Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews), 2010. 40(6). P. 601 – 618.
7. Romero C., Ventura S. Data mining in education // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2013. Vol. 3(1). P. 12-27.
8. Chao Zhang, Linling He. Data Mining Technology in Teaching Evaluation of Colleges and Universities // SHS Web of Conferences, 2024. Vol. 187. 4 pp.
9. Пронін С. В., Сотников А. Д. Використання платформи orange для аналізу даних // Вісник ХНАДУ, 2022. Вип. 99. С. 131 – 137.
10. Data Mining Fruitful and Fun Open source machine learning and data visualization. <https://docs.biolab.si/orange/2/widgets/rst/index.html#data>
11. Болюбаш Н. М. Задачі та методи інтелектуального аналізу освітніх даних // Наукові праці. Педагогіка, 2019. Випуск 311. Том 323. С. 26 - 29.

REFERENCES

1. Piatetsky-Shapiro G., Frawley W. Knowledge Discovery in Databases. - Publisher: AAAI Press, 1991. 540 pp.
2. Abdelmagid A.S., Qahmash A.I. M.. Utilizing the Educational Data Mining Techniques "Orange Technology" for Detecting Patterns and Predicting Academic Performance of University Students // Information Sciences Letters. An International Journal, 2023. Vol. 12. No. 3. P. 1415-1431.
3. Hernández-Leal E., Darío Duque-Méndez N. C. Cechinel Unveiling educational patterns at a regional level in Colombia: data from elementary and public high school institutions // Heliyon, 2021. Vol. 7. P. 3-17.
4. M. Goyal, R. Vohra. Applications of Data Mining in Higher Education // International Journal of Computer Science Issues, 2012. Vol. 9. Issue 2. No 1, P. 113 – 120.
5. Verhun V.R. Kharakterystyka metodiv rozviazannia zadachi klasyfikatsii v intelektualnomu analizi danykh navchalnykh proham // Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, 2019. Tom. 29. № 6. C. 136-139.
6. Romero C., Ventura S. Educational Data Mining: A Review of the State of the Art // Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews), 2010.40(6). P. 601 – 618.
7. Romero C., Ventura S. Data mining in education // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2013. Vol. 3(1). P. 12-27.
8. Chao Zhang, Linling He. Data Mining Technology in Teaching Evaluation of Colleges and Universities // SHS Web of Conferences, 2024. Vol. 187. 4 pp.
9. Pronin S. V., Sotnykov A. D. Vykorystannia platformy orange dlia analizu danykh // Visnyk KhNADU, 2022. Vyp. 99. C. 131 – 137.
10. Data Mining Fruitful and Fun Open source machine learning and data visualization. <https://docs.biolab.si/orange/2/widgets/rst/index.html#data>
11. Boliubash N. M. Zadachi ta metody intelektualnoho analizu osvitnikh danykh. Naukovi pratsi. Pedahohika, 2019. Vypusk 311. Tom 323. C. 26 - 29 .

Received 18.04.2024.

Accepted 19.04.2024.

Using orange technology for data mining in the education sector

The growth of data volumes due to the intensive development of information technology creates a need for highly efficient methods of data processing and analysis for the effective management of various types of organizations, as well as for strategic planning and market competitiveness. Such methods of data processing and analysis are methods of data mining. One of the most promising areas of application of data mining methods is in the education sector. The development of e-learning systems and the introduction of

digital technologies into the traditional educational process leads to the emergence of large amounts of information, which are studied by the intellectual analysis of educational data (IAED), a scientific discipline related to the application of data mining methods to information produced by educational institutions. The relevance of the topic is due to the need to improve the quality of the educational process by identifying hidden patterns in the array of educational data, and the need for further development of this area in modern conditions is shown.

The paper shows that among the available software, Orange technologies are effective and easy to use, the main purpose of which is to make complex analytical methods accessible to a wide range of users, including those who do not have deep knowledge of programming or statistics.

As an example, a scheme for analyzing educational data is built to demonstrate the effective use of the Orange visual programming tool for researching educational data using data mining methods, which allows specialists in the field of education to conduct a qualitative analysis and then use the results obtained in developing strategies to ensure an effective learning process and educational development.

Мала Юлія Анатоліївна - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення, факультет інноваційних технологій, Університет митної справи та фінансів.

Селівьорстова Тетяна Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем, факультет прикладних комп'ютерних технологій, Український державний університет науки і технологій.

Гуда Антон Ігорович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри Інформаційних технологій і систем, Український державний університет науки і технологій.

Mala Yuliia - PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Science and Software Engineering, the University of Customs and Finance.

Selivorstova Tatyana – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor department of Information Technologies and Systems, Faculty of Applied Computer Technologies at Ukrainian State University of Science and Technologies.

Guda Anton – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technology.

Б.В. Молодець, Т.М. Булана

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АРХІТЕКТУР ДЛЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

Анотація: Робота присвячена існуючих архітектур для розробки системи оцінки якості повітря: serverless архітектура, мікросервісна архітектура, монолітна архітектура та сервісно орієнтована архітектура. В рамках роботи описані переваги та недоліки цих архітектур, наведені можливі схеми реалізації. В якості провайдера хмарних послуг було обрано Amazon Web Service. У результаті аналізу було виявлено, що найбільш підходящою є сервісно орієнтовна архітектура. Хоча мікросервісна архітектура набула широкого визнання в останні роки, сервісна орієнтована архітектура має свої переваги, особливо для поточної інформаційної системи: більша взаємодія сервісів, більша єдність даних та стандартизація, більш просте управління сервісами, менша складність інфраструктури. Ключові слова: інформаційна система, моніторинг якості повітря, архітектура програмного забезпечення, SOA, MSA, serverless architecture, монолітна архітектура, AWS

Інформаційні системи моніторингу є важливим інструментом у боротьбі з забрудненням повітря. Сучасні технології дозволяють в режимі реального часу збирати та аналізувати дані про якість повітря, що надає можливість оперативно реагувати на забруднення та вживати заходів для його усунення.

При проектуванні будь-якої інформаційної системи або програмного продукту, одним з ключових аспектів є вибір відповідної архітектури. Архітектура системи визначає спосіб організації компонентів, взаємодії між ними та загальну структуру системи. Правильний вибір архітектури може значно вплинути на продуктивність, масштабованість, безпеку та інші характеристики системи.

Вибір архітектури програмного забезпечення є ключовим етапом у процесі розробки будь-якого проекту. Коректна обрана архітектура визначає ефективність, гнучкість та масштабованість системи.

Перш за все, варто визначити основні вимоги до системи, такі як швидкість розробки, масштабованість, надійність, зручність у використанні тощо. На основі цих вимог ми можемо зрозуміти, яка архітектура буде

найбільш відповідати нашим потребам. Для інформаційної системи оцінки якості повітря було сформульовані наступні вимоги:

- Архітектура має забезпечити модульність, гнучкість та швидкість розгортання та розвитку
- Забезпечення інтегрованості та взаємодії різних компонентів системи за допомогою сервісів, що сприяє легкості розширення.
- Можливість розгортання системи у хмарних сервісах для забезпечення масштабованості, доступності та безпеки даних.
- Розділення системи на логічні шари (наприклад, шари доступу до даних, бізнес-логіки та презентації) для забезпечення зручності розробки та підтримки.

Важливо також пам'ятати, що архітектура може еволюціонувати протягом часу, тому варто мати можливість адаптувати її до змін у вимогах та умовах проекту.

Serverless архітектура - це підхід до розробки програмного забезпечення, де розробник не має безпосереднього контролю над серверами, на яких запускається програмне забезпечення. Замість того, щоб керувати інфраструктурою, розробник працює з окремими функціями (функціями як сервісом, Function as a Service - FaaS), які викликаються відповідно до потреб системи [1].

Розробник пише і розгортає окремі функції, які викликаються лише при необхідності, без необхідності управління інфраструктурою. Можна розрізнити кілька парадигм безсерверних обчислень:

- Функція як послуга (FaaS), реалізована, наприклад, за допомогою AWS Lambda (Hendrickson, et al., 2016),
- Програмне забезпечення як послуга (SaaS) через Google Cloud
- База даних як послуга (DBaaS), як у випадку з Microsoft Azure для PostgreSQL.

FaaS можна розглядати як гібрид платформи як послуги (PaaS) та програмного забезпечення як послуги (SaaS): інфраструктура, а також інформація повністю контролюється хмарним постачальником, навіть якщо програмне забезпечення управляється клієнтами або розробниками (Korhonen, 2017) (Kumari, Sahoo, Behera, Misra, Sharma, 2021). Системи FaaS або "Функція як послуга" дозволяють розробникам створювати та розміщувати додатки (що складаються з однієї функції або набору функцій), які динамічно масштабуються. Ці додатки призначені для виконання однієї функції на вимогу, а потім

відкладають запуск до наступного разу, коли вона знадобиться. Такі системи забезпечують величезну економію коштів для розробників додатків, дозволяючи їм платити лише за ті екземпляри, на яких виконуються їхні безсерверні застосунки [2].

Так як для розробки системи було обрано платформу Amazon Web Services то для реалізації цієї архітектури можна було б скористатися наступним: AWS Lambda - це сервіс для виконання коду без необхідності управління інфраструктурою. Ви можете завантажувати свою функцію до Lambda та викликати її відповідно до потреб вашого додатку, Amazon API Gateway - сервіс для створення, публікації, підтримки, моніторингу та захисту API (можна використовувати API Gateway для створення HTTP або WebSocket API для виклику ваших Lambda функцій через інтернет), Amazon DynamoDB - повністю керована NoSQL база даних, яка забезпечує швидкий та надійний доступ до даних для вашого додатку (можна використовувати DynamoDB для зберігання та керування даними, які обробляються вашими Lambda функціями) та інші (рисунок 1).

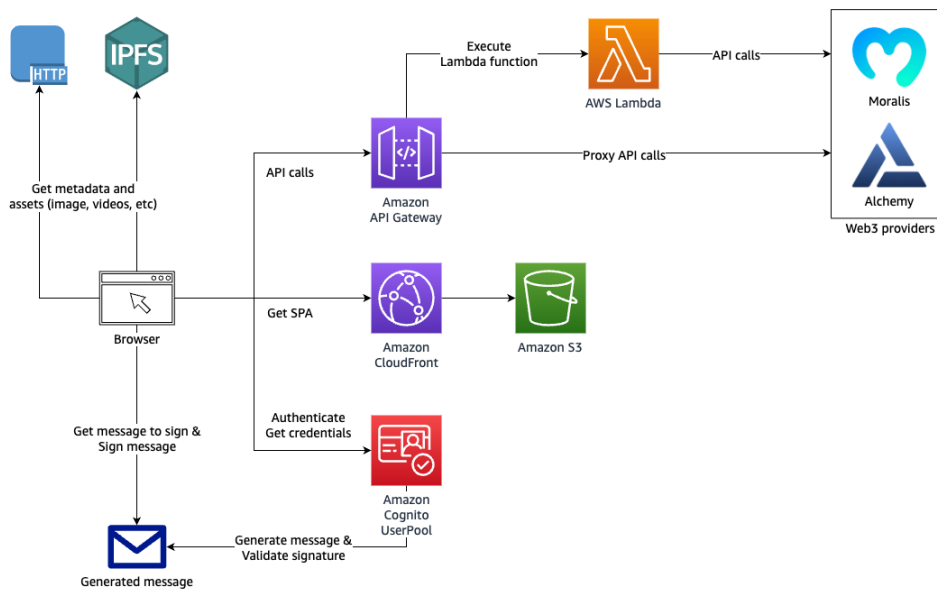


Рисунок 1 - Схема Serverless архітектури для розгортання на Amazon Web Services [3]

Використання цієї архітектури надає наступні переваги:

- Масштабованість - Serverless дозволяє автоматично масштабувати ресурси в залежності від навантаження, що робить його ідеальним для проектів зі змінним навантаженням;

– Швидкість розгортання - Serverless дозволяє швидко розгорнути функції без необхідності управління інфраструктурою.

Але у Serverless архітектури є свої недоліки:

- Обмеження функцій - Існують обмеження на тривалість виконання функцій, розмір пам'яті та інші обмеження, які можуть бути несумісними з деякими типами задач (в тому числі задач по розрахунку якості повітря);
- Складність відлагодження: Відлагодження serverless додатків може бути складнішим через їх розподілений характер.

Так як в нашій системі регулярно працюватиме збір даних з різних ресурсів та є велика кількість складних розрахунків (таких як запуск моделі CALLPUFF) [4] всі переваги цієї архітектури нівелюються.

Альтернативою Serverless архітектури може стати мікросервісна архітектура. Мікросервісна архітектура - це підхід до розробки програмного забезпечення, де програмний додаток розбивається на невеликі, самостійні модулі, відомі як мікросервіси. Кожен мікросервіс виконує конкретну функцію та має власний набір інтерфейсів API для взаємодії з іншими мікросервісами. Мікросервіси взаємодіють між собою через API, що дозволяє їм співпрацювати та обмінюватися даними. Кожен мікросервіс може використовувати власний стек технологій, що дозволяє використовувати найкращі інструменти для конкретних завдань. Якщо один мікросервіс відмовляє, це не призводить до відмови всього додатку, а лише до проблем в окремій функціональності [5].

Для розгортання мікросервісної архітектури на платформі Amazon Web Services можна скористатися наступним: сервісами контейнеризації Amazon Elastic Compute Cloud (EC2) або Amazon Elastic Kubernetes Service (EKS), які дозволяють запускати та керувати контейнерами для ваших мікросервісів, Amazon Simple Storage Service (S3) в якості сховища для зберігання об'єктів, такі як файли, зображення та інше, Amazon CloudFront в якості швидкому та ефективному доставці вмісту веб-застосунку, Amazon ALB для балансування навантаження (дозволяє розподілити трафік між різними екземплярами застосунку або мікросервісів в залежності від правил маршрутизації), Amazon DynamoDB та Amazon Aurora як нереляційну та реляційну бази даних відповідно та Amazon ElastiCache для підвищення продуктивності та масштабованість застосунку шляхом кешування даних в оперативній пам'яті та забезпечуючи швидкий доступ [6]. Схема зображена на рисунку 2.

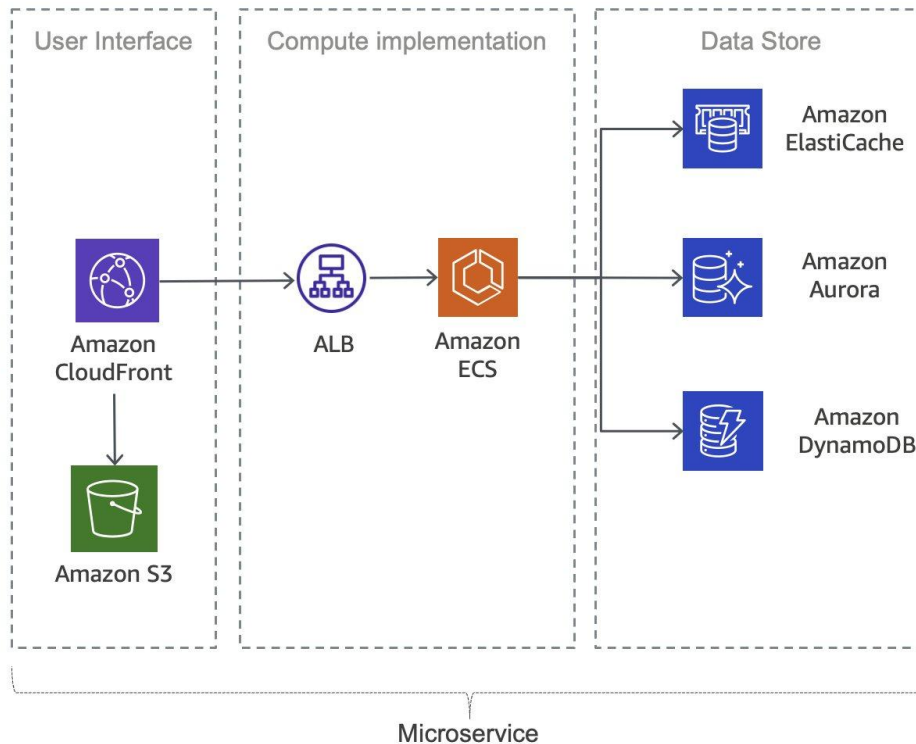


Рисунок 2 - Схема мультисервісної архітектури для розгортання на Amazon Web Services [7]

До переваг мікросервісної архітектури можна віднести наступне:

- Гнучкість: Мікросервісна архітектура дозволяє розділити додаток на невеликі, незалежні сервіси, що надає більшу гнучкість у розробці, тестуванні та впровадженні нових функцій;
- Швидкість розгортання: Можливість незалежного розгортання кожного сервісу дозволяє прискорити процес впровадження змін та оновлень.
- Масштабованість: Кожен сервіс може бути масштабований незалежно, що дозволяє оптимізувати ресурси та витрати.

До недоліків мікросервісної архітектури можна віднести наступні пункти:

- Складність управління конфігурацією: З більшою кількістю сервісів у системі стає складніше керувати конфігураціями та налаштуваннями. Доведеться вирішити питання версіонування, розгортання та управління налаштуваннями кожного сервісу окремо.
- Складність моніторингу та відлагодження: З більшою кількістю сервісів також ускладнюється моніторинг їх роботи та відлагодження випадків неполадок. Доведеться впроваджувати системи моніторингу та журналювання для кожного сервісу окремо.

- Системні проблеми із залежностями: Більше сервісів означає більше залежностей між ними. Якщо один сервіс стає недоступним або працює некоректно, це може вплинути на інші сервіси, що може призвести до каскадного ефекту збоїв.

- Проблема інтеграції та управління: Інтеграція між сервісами може вимагати значних зусиль у вирішенні питань сумісності, забезпеченні безпеки та забезпеченні спільного управління.

- Обмін даними. Зменшується швидкодія системи через накладні розходи на мережеві виклики між сервісами (в тому числі при обміні даними).

Ще одною не менш популярною з точки зору використання в проектах можна назвати монолітну архітектуру. Монолітна архітектура - це тип архітектури програмного забезпечення, де весь програмний продукт розробляється як єдине ціле, зазвичай у вигляді одного великого додатку. Основна ідея полягає в тому, що всі компоненти додатку взаємодіють один з одним без зовнішніх інтерфейсів або середовищ виконання. Основні характеристики монолітної архітектури включають:

- Цілісність - усі компоненти додатку розглядаються як єдине ціле, розробка, впровадження та масштабування ведуться разом.

- Внутрішня взаємодія - всі частини додатку спілкуються одна з одною напряму, без використання мережевих запитів або сервісних викликів.

- Монолітний стек технологій - у монолітній архітектурі використовується єдиний стек технологій для всіх компонентів.

- Простота розгортання і масштабування - так як застосунок складається з одного компонента, розгортання і масштабування може бути простішим порівняно з розподіленими системами.

До недоліків можна віднести складність масштабування. Монолітні додатки можуть бути важко масштабувати, оскільки всі їх компоненти взаємодіють тісно між собою. При збільшенні навантаження доводиться масштабувати всю архітектуру, навіть якщо лише деякі компоненти потребують додаткових ресурсів [8].

Альтернативним рішенням, яке було обрано для розробки інформаційної системи, стала сервісно-орієнтовна архітектура (SOA).

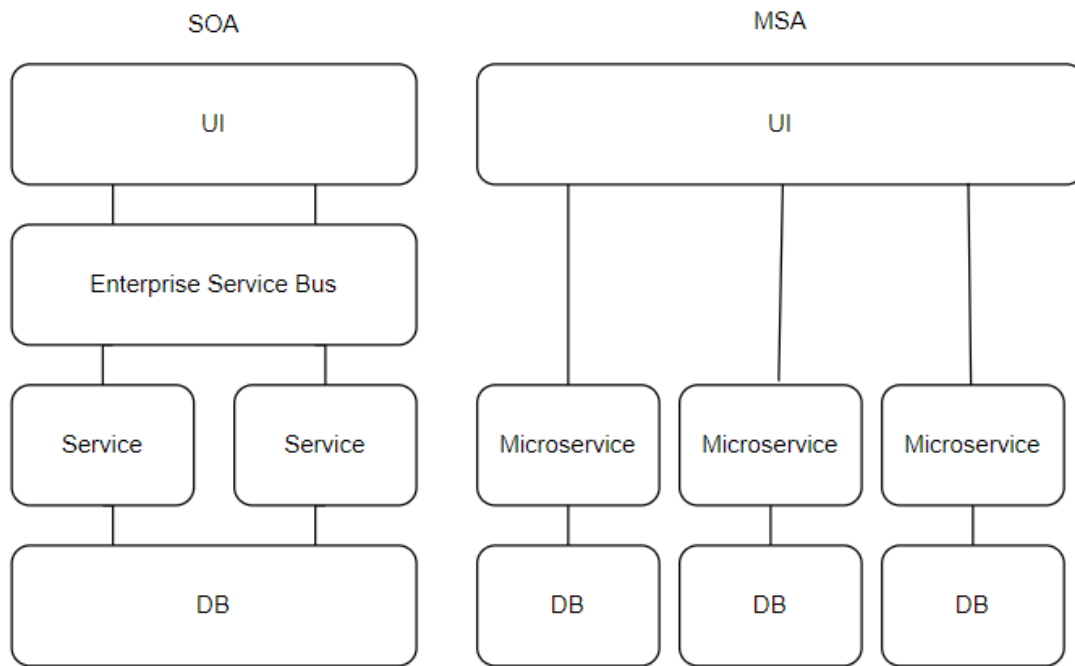


Рисунок 3 - Схеми Сервісно-орієнтованої та Мікросервісної архітектури

Це архітектурний підхід до розробки програмного забезпечення, в якому функціональність застосунків розглядається як набір послуг, які можуть бути використані та взаємодіяти між собою за допомогою стандартних протоколів. Основна ідея SOA полягає в тому, щоб розділити функціональність додатків на окремі сервіси, які можуть бути реалізовані та підтримувані незалежно один від одного [9].

У сервісно-орієнтовній архітектурі функціональність додатків розбивається на окремі сервіси, які можуть бути незалежними один від одного. Кожен сервіс виконує конкретну функцію і надає зовнішній інтерфейс для взаємодії з іншими сервісами. Кожен сервіс має ясно визначені межі та відокремлений від інших сервісів. Це дозволяє сервісам бути більш автономними та менш залежними від змін у інших частинах системи. Сервісно-орієнтовна архітектура дозволяє легко інтегрувати нові сервіси з існуючими системами, що дозволяє побудувати додатки з високим рівнем гнучкості та розширюваності. Завдяки розділенню функціональності на окремі сервіси, сервісно-орієнтовна архітектура дозволяє краще масштабувати систему, оскільки можна масштабувати тільки ті сервіси, які потребують додаткових ресурсів [10].

Основними відмінностями сервісно-орієнтовна архітектура від мікросервісної архітектури є наступні пункти:

– Сервісно-орієнтовна архітектура зазвичай створює більш великі та важкі сервіси, які можуть містити різноманітну функціональність; Мікросервісна архітектура, навпаки, розглядає функціональність як набір дрібних, відокремлених сервісів, які керуються принципом "один сервіс - одна функція".

– У сервісно-орієнтовній архітектурі, великі сервіси можуть мати складні залежності один від одного, що може робити їх важко масштабувати та підтримувати. У мікросервісній архітектурі, кожен сервіс незалежний і може бути масштабованим та підтримуваним окремо.

– У сервісно-орієнтовній архітектурі сервіси можуть використовувати різні протоколи та стандарти для взаємодії між собою. У мікросервісній архітектурі, зазвичай використовуються легкі та стандартні протоколи, такі як HTTP або REST, для взаємодії між сервісами.

– У сервісно-орієнтовній архітектурі керування багатьма великими сервісами може бути складним завданням. У мікросервісній архітектурі, хоча кількість сервісів може бути більшою, кожен сервіс менший і простіший у розгортанні та управлінні.

Таблиця 1

Таблиця відмінностей сервісно-орієнтовної архітектури
від мікросервісної архітектури

	Сервісно-орієнтовна архітектура	Мікросервісна архітектура
Реалізації	Різні сервіси зі спільними ресурсами.	Самостійні та спеціалізовані невеликі сервіси.
Підключення	ESB використовує кілька протоколів обміну повідомленнями, таких як SOAP, AMQP і MSMQ.	API, Java Message Service, Pub/Sub
Сховище даних	Спільне зберігання даних.	Незалежне зберігання даних.
Розгортання	Впровадження змін вимагає повної перебудови.	Кожен мікросервіс можна зберігати в контейнерах.
Можливість багаторазового використання	Повторно використовує сервіси через спільні ресурси.	Кожен сервіс має свої незалежні ресурси. Мікросервіси можна повторно використовувати за допомогою їх API
Гнучке управління	Узгоджене управління даними у всіх сервісах.	Різні політики керування даними для кожного сховища.

Хоча мікросервісна архітектура набула широкого визнання в останні роки, сервісна орієнтована архітектура має свої переваги, особливо в певних випадках та для поточної інформвційної системи:

- Більша взаємодія сервісів: У SOA, сервіси зазвичай взаємодіють між собою більш глибоко та в тіснішому співробітництві, оскільки вони можуть мати більшу кількість спільних елементів та функціональних можливостей.

- Більша єдність даних та стандартизація: SOA сприяє розробці спільних стандартів для обміну даними між сервісами, що дозволяє забезпечити більшу єдність даних та керування ними в різних частинах системи.

- Більш просте управління сервісами: У SOA, управління меншою кількістю великих сервісів може бути простішим у порівнянні з управлінням великою кількістю дрібних мікросервісів, які потребують більшої уваги до деталей.

- Менша складність інфраструктури: SOA може мати меншу загальну складність інфраструктури порівняно з мікросервісною архітектурою, оскільки кількість сервісів може бути меншою, але кожен сервіс може бути складним та функціонально багатшим.

У контексті розробки системи моніторингу якості повітря, сервісно-орієнтована архітектура відіграють значущу роль. Вона сприяє високій модульності та зручному взаємодії між компонентами системи. Враховуючи швидко зростаючі технології та вимоги до систем оцінки якості повітря, використання сервісно-орієнтованої архітектур дозволить створити динамічну та ефективну систему, здатну адаптуватися до змінних умов та вимог користувачів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lakhai V., Bachynskyy R. (2021). Investigation of Serverless Architecture. Advances in Cyber-Physical Systems. 6. 134-139. DOI: 10.23939/acps2021.02.134.
2. Kumari A., Sahoo B. (2022). Serverless Architecture for Healthcare Management Systems. DOI: 10.4018/978-1-6684-4580-8.ch011.
3. dApp authentication with Amazon Cognito and Web3 proxy with Amazon API Gateway [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://aws.amazon.com/blogs/architecture/dapp-authentication-with-amazon-cognito-and-web3-proxy-with-amazon-api-gateway/>
4. Molodets B., Hnatushenko V., Boldyriev D., Bulana T. Information System of Air Quality Assessment Using Data Interpolation from Ground Stations. MoMLeT+DS

2023: 5th International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science, June 3, 2023, Lviv, Ukraine. P.233-245

5. Dragoni, N. et al. (2017). Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow. In: Mazzara, M., Meyer, B. (eds) Present and Ulterior Software Engineering. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-67425-4_12

6. Villamizar M., Garcés O., Ochoa L., Castro H., Salamanca L., Verano M. M., Casallas R., Gil S., Valencia C., Zambrano A., Lang M. (2016). Infrastructure Cost Comparison of Running Web Applications in the Cloud Using AWS Lambda and Monolithic and Microservice Architectures. DOI: 10.1109/CCGrid.2016.37.

7. Simple microservices architecture on AWS - Implementing Microservices on AWS (amazon.com) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/microservices-on-aws/simple-microservices-architecture-on-aws.html>

8. Abgaz Y., Mccarren A., Elger P., Solan D., Lapuz N., Bivol M., Jackson G., Yilmaz M., Buckley J., Clarke, P. (2023). Decomposition of Monolith Applications Into Microservices Architectures: A Systematic Review. IEEE Transactions on Software Engineering. PP. 1-32. DOI: 10.1109/TSE.2023.3287297.

9. What is SOA (Service-Oriented Architecture)? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://aws.amazon.com/what-is/service-oriented-architecture/>

10. Lewis G., Smith D., Chapin N., Kontogiannis K. (2010). Proceedings of the Fourth International Workshop on a Research Agenda for Maintenance and Evolution of Service- Oriented Systems (MESOA 2010). 107.

REFERENCES

1. Lakhai V., Bachynskyy R. (2021). Investigation of Serverless Architecture. Advances in Cyber-Physical Systems. 6. 134-139. DOI: 10.23939/acps2021.02.134.

2. Kumari A., Sahoo B. (2022). Serverless Architecture for Healthcare Management Systems. DOI: 10.4018/978-1-6684-4580-8.ch011.

3. dApp authentication with Amazon Cognito and Web3 proxy with Amazon API Gateway [Electronic resource] – Resource access mode: <https://aws.amazon.com/blogs/architecture/dapp-authentication-with-amazon-cognito-and-web3-proxy-with-amazon-api-gateway/>

4. Molodets B., Hnatushenko V., Boldyriev D., Bulana T. Information System of Air Quality Assessment Using Data Interpolation from Ground Stations. MoMLeT+DS 2023: 5th International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science, June 3, 2023, Lviv, Ukraine. P.233-245

5. Dragoni, N. et al. (2017). Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow. In: Mazzara, M., Meyer, B. (eds) Present and Ulterior Software Engineering. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-67425-4_12
6. Villamizar M., Garcés O., Ochoa L., Castro H., Salamanca L., Verano M. M., Casas R., Gil S., Valencia C., Zambrano A., Lang M. (2016). Infrastructure Cost Comparison of Running Web Applications in the Cloud Using AWS Lambda and Monolithic and Microservice Architectures. DOI: 10.1109/CCGrid.2016.37.
7. Simple microservices architecture on AWS - Implementing Microservices on AWS (amazon.com) [Electronic resource] – Resource access mode: <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/microservices-on-aws/simple-microservices-architecture-on-aws.html>
8. Abgaz Y., Mccarren A., Elger P., Solan D., Lapuz N., Bivol M., Jackson G., Yilmaz M., Buckley J., Clarke, P. (2023). Decomposition of Monolith Applications Into Microservices Architectures: A Systematic Review. IEEE Transactions on Software Engineering. PP. 1-32. DOI: 10.1109/TSE.2023.3287297.
9. What is SOA (Service-Oriented Architecture)? [Electronic resource] – Resource access mode: <https://aws.amazon.com/what-is/service-oriented-architecture/>
10. Lewis G., Smith D., Chapin N., Kontogiannis K. (2010). Proceedings of the Fourth International Workshop on a Research Agenda for Maintenance and Evolution of Service- Oriented Systems (MESOA 2010). 107.

Received 19.04.2024.

Accepted 22.04.2024.

Analysis of existing architectures for the development of an Information System of Air Quality Assessment

Choosing the appropriate architecture is one of the key aspects, when designing any information system or software product. The system architecture determines how components are organized, how they interact, and the overall structure of the system.

The work is devoted to software architectures: serverless architecture, monolithic architecture, microservice architecture, and service-oriented architecture. All of them were compared with each other.

The following requirements were defined for the air quality assessment information system:

- * The architecture should provide modularity, flexibility and faster deployment and development.*

- * Providing integration and communication between different components of the system through services, which facilitates easy expansion.*

✱ *The possibility of deploying the system in cloud services to ensure scalability, availability and data security.*

✱ *Dividing the system into logical layers (e.g., data access, business logic, and presentation layers) to ensure ease of development and support.*

A monolithic architecture can be easier to deploy and scale than distributed systems. Serverless architecture provide huge cost savings for application developers, allowing them to pay only for the instances that run their serverless applications. Microservices allow for flexible scaling of the system by adding or removing individual services depending on the needs. Service-oriented architecture promotes high modularity and convenient interaction between system components. However the most suitable solution was the service-oriented architecture. That is because service-oriented architecture helps to develop common standards for exchanging data between services, which allows for greater data consistency and management across different parts of the system. Service-oriented architecture can have a lower overall infrastructure complexity (compared to microservice architecture) because the number of services can be lower. Managing a smaller number of large services can be easier than managing a large number of small microservices that require more attention to detail.

To conclude, the usage of service-oriented architectures will create a dynamic and efficient system that can adapt to changing conditions and user requirements.

Молодець Богдан Володимирович – аспірант, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Булана Тетяна Михайлівна – доцент, кандидат технічних наук, Національний Технічний Університет «Дніпровська політехніка».

Molodets Bohdan – Postgraduate Student, Oles Honchar Dnipro National University.

Bulana Tetiana – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Dnipro University of Technology.

Ю.А. Монастирський, В.К. Титюк

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ
ШАХТНИМИ ТУРБОКОМПРЕСОРАМИ**

Анотація. Сучасні технологічні процеси промислових підприємств забезпечуються різними енергоносіями. Вибір раціональних енергоносіїв визначається технологічними умовами, техніко економічними показниками процесів виробництва продукції та умовами енергопостачання. Поряд з основними енергоносіями, такими як котельно пічне паливо, тепла та електрична енергії, вода, у багатьох галузях промисловості широко використовується стиснене повітря. Цьому сприяють його особливі властивості: пружність, прозорість, нешкідливість, вогнебезпека, нездатність до конденсації, швидка передача тиску та необмежений запас атмосферного повітря у природі. Стиснене повітря є одним із найдорожчих енергоносіїв, що використовуються в промисловості. Один кілоджоуль енергії, що отримується від заводської мережі стиснутого повітря обходиться у сім десять разів дорожче, ніж кілоджоуль енергії, що використовується в електроприводі. Це пов'язано з тим, що саме виробництво стиснутого повітря вимагає дорогого компресорного обладнання та системи кондиціювання, що включає, крім іншого, і систему вологовідділення. Тим не менш, питома вага цього виду енергії у сучасних виробництвах досить великий. На виробництво стисненого повітря у промислово розвинених країнах припадає в середньому близько 10% із загального енергетичного балансу. На ряді промислових підприємств витрата електроенергії на вироблення стисненого повітря досягає 20 – 30% загальної кількості споживаної електричної енергії. Тому в системах виробництва та розподілу стисненого повітря дуже актуальне завдання енергозбереження, яке досягається шляхом підвищення ефективності роботи компресорів, раціонального використання стисненого повітря пневмоприймачами та зменшення його втрат при виробництві та транспортуванні споживачам. Отже, в статті розглянуто методи підвищення ефективності роботи систем виробництва та розподілу стисненого повітря. Запропоновано методи та способи зниження питомої витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря на компресорних станціях, його втрат у системах виробництва та розподілу, а також підвищення продуктивності, економічності та надійності роботи компресорних станцій.

Ключові слова: стиснене повітря, шахтний турбокомпресор, система повітропостачання, енергоефективність, споживач, продуктивність, пневмосистема.

Постановка завдання. Енергоефективність є однією з найважливіших проблем, у тому числі для такого енергоємного процесу як виробництво стисненого повітря. Стиснене повітря - один із найпоширеніших енергоносіїв на будь-якому промисловому підприємстві, а сукупність пристроїв, пов'язаних з його обробкою та розподілом, є досить складною енергоємною енергетичною промисловою системою, від рівня досконалості якої залежать показники технологічних процесів, де використовується стиснене повітря. Тому підвищення енергоефективності виробництва стисненого повітря є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виробництво стисненого повітря, на яке за різними оцінками витрачається до 10% загального споживання, є одним із основних споживачів електроенергії. При цьому втрати стисненого повітря на шляху від джерела до кінцевого споживача досягають 20-30% [1].

Слід зазначити, що виробництво стисненого повітря, з погляду енергетичної ефективності, є не вигідним. За рахунок значних втрат від джерела стисненого повітря як споживача електроенергії (привід компресора), до кінцевого споживача вартість стисненого повітря приблизно в 50 разів перевищує ціну викопного палива та в 15 разів – ціну на електроенергію. Фактично в кінцевій точці споживання стисненого повітря використовується лише 10% витраченої енергії [2].

Мета дослідження. Метою дослідження є визначити методи та способи зниження питомої витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря, його втрат у системах виробництва та розподілу, а також підвищення продуктивності, економічності та надійності роботи компресорних станцій.

Викладення основного матеріалу дослідження. Втрати, що виникають у системі повітропостачання, знижують її ефективність, що, своєю чергою, може вплинути на технологічний процес.

До втрат у системі повітропостачання можна віднести:

- електромеханічні та внутрішні втрати в компресорі;
- втрати у системі охолодження компресора;
- втрати у системі регулювання;
- втрати у вологовідділювачі;
- втрати у системі осушення стисненого повітря;
- втрати, пов'язані з гідравлічним опором трубопроводів;
- втрати, пов'язані з витіканням повітря через нещільність.

У зв'язку з перерахованими вище факторами виникають завдання удосконалення систем повітропостачання. Дослідження у цій галузі дозволили виділити основні напрями, такі як: технічне вдосконалення конструкцій елементів систем, реальний добір обладнання, оптимізація режимів роботи елементів тощо.

Система повітропостачання промислового підприємства включає в себе компресорні та повітродувні станції, трубопровідний та балонний транспорт для подачі стисненого повітря до споживача, повітрозбірники-ресивери та розподільні пристрої стисненого повітря самого споживача.

Залежно від необхідних споживачам витрати повітря та його тиску станції обладнуються відцентровими компресорами з надлишковим тиском повітря 0,35 - 0,9 МПа та одиничною продуктивністю 250-7000 м³/хв або поршневыми відповідно з тиском 3-20 МПа та одиничною продуктивністю не більше м³/хв.

Комунікації стиснутого повітря мають радіальні та кільцеві ділянки. Останні застосовують при компактному розташуванні споживачів, а також за підвищених вимог до надійності забезпечення стисненим повітрям.

Стиснене повітря на промислових підприємствах використовується за двома основними напрямками: технологічним (для виплавки сталі та чавуну в металургії, одержанням кисню в повітророзділювальних установках тощо) і силовим (для приводу різних машин і механізмів у машинобудуванні, гірничодобувній промисловості, ковальському та інших виробництвах).

Компресорні станції включають до свого складу пристрої для забору повітря, очищення його від пилу, компресори, приводні двигуни, теплообмінники охолодження, допоміжне обладнання, призначене для додаткової обробки повітря (осушення, очищення, зміни тиску, акумуляції) [3].

На більшості промислових підприємств технологічні схеми повітряних компресорних станцій мають низку істотних недоліків і не відповідають вимогам до сучасних систем виробництва стиснутого повітря. Так, на всмоктуючих повітропроводах, що подають атмосферне повітря в компресори, повітряні фільтри або відсутні, або (за наявності) площа їх фільтруючої поверхні менш розрахункової, а застосовувана фільтруюча насадка часто не має масляної плівки (суха) і не здатна затримувати механічні домішки, які містяться в атмосферному повітрі. Підвищена запиленість повітря, що всмоктується, призводить до прискореного зносу компресора і, як наслідок, до зниження його продуктивності. Крім того, при запиленому повітряному фільтрі збільшуються втрати тиску всмоктуваного атмосферного повітря, а значить, знижується тиск

у всмоктувальному патрубку компресора. Це призводить до підвищення ступеня стиснення компресора, зменшення його продуктивності та збільшення питомої витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря.

Як відомо, для забезпечення ефективної роботи повітряних турбокомпресорів необхідно, щоб гідравлічний опір повітряних фільтрів не перевищував 245 Па. Для цього необхідно своєчасно здійснювати очищення повітряних фільтрів від затриманих механічних забруднень. Рекомендований інтервал очищення фільтрів становить 300 - 600 годин роботи.

Шлях зниження витрат на стиск у ступені (секції) компресора визначає питома робота циклу. При необхідності забезпечення необхідного підвищення тиску зниження роботи циклу можливе лише за рахунок зменшення температури всмоктування та значення політропи стиснення.

Робота циклу компресора має найменше значення при ізотермічному стиску. Для наближення до ізотермічного процесу стиснення застосовують, як правило, багатоступінчастий стиск з проміжним міжступеневим охолодженням [4]. У разі теплота, яка відводиться від компресора, дорівнює роботі стискання, тобто теплота охолодження є видом енергії, яка може бути утилізована.

Зниження температури всмоктування дозволяє зменшувати витрати на привід компресора, але цей спосіб практичного втілення не знайшов, (збільшення температури повітря, що всмоктується компресором, на кожні 4 °C збільшує витрату енергії на 1%).

Встановлені на компресорній станції проміжні та кінцеві охолоджувачі повітря часто не забезпечують необхідний по технологічному процесу виробництва стиснутого повітря температурний рівень його, охолодження. Аналіз впливу режиму охолодження стисненого повітря в проміжних охолоджувачах повітря на енергетичну ефективність роботи повітряних компресорів показує, що його недоохолодження на кожні 10°C призводить до зниження продуктивності відцентрових компресорів на 1-1,5%, а підвищення температури повітря на виході з проміжного повітроохолоджувача поршневого компресора на кожні 6-8 °C збільшує витрату електроенергії на стиск повітря на 1% через збільшення роботи стиснення. Разом з цим внаслідок значного збільшення роботи стиснення з'являється навантаження приводного електродвигуна компресора, що викликає передчасний вихід його з ладу.

Підвищена температура стисненого повітря на виході з кінцевих охолоджувачів повітря (вище температури точки роси) обумовлює зниження ефективності роботи встановлених після них вологомасловідділювачей. При

цьому основна частина вологи та олії знаходиться в стисненому повітрі в пароподібному стані, що значно погіршує його якість. При транспортуванні стисненого повітря до місць споживання його температура поступово знижується, і в повітропроводі починається безперервне випадання вологи та олії. Випадання вологи в повітропроводі, що подає, і перед споживачами стисненого повітря ускладнює роботу пневмомеханізмів, знижує їх продуктивність, а також викликає необхідність частих вимушених продувок повітропроводів після тривалих зупинок роботи пневмоприймачів. Це підвищує витрату стисненого повітря пневмоприймачами через збільшення непродуктивних втрат і в результаті знижує продуктивність компресорної станції. Осідаючи на внутрішніх стінках повітрозбірників і трубопроводів, масло і вода можуть стати причиною вибуху чи пожежі.

Перевищення температури стисненого повітря на виході з проміжних і кінцевих охолоджувачів повітря часто сягає 40 - 60 ° С (допустимо значення не більше 10 - 15 ° С). Причин недотримання режиму охолодження повітря в проміжних і кінцевих охолоджувачах повітря може бути кілька: неефективна робота водоохолоджуючих пристроїв оборотної системи водопостачання повітряної компресорної станції, високий ступінь забруднення трубок повітроохолоджувачів накипом і масляними відкладеннями та ін. [5].

При жорсткій воді відбуваються процеси утворення накипу на внутрішніх поверхнях трубок охолоджувача повітря. Товщина її шару може досягати 10 мм, істотно зменшуючи прохідний переріз трубок. Для запобігання накипу утворенню рекомендується проводити магнітну обробку води або використовувати комплексони (інгібітори відкладення мінеральних солей), які забезпечують практично повне пригнічення процесів утворення відкладень малорозчинних солей на поверхні трубок охолоджувачів. Останні слід регулярно очищати від накипу хімічними, пневматичними чи механічними способами.

Істотним фактором, що негативно впливає на ефективність та надійність роботи компресорних станцій, є нерівномірне (неритмічне) споживання стисненого, повітря пневмоприймачів [2]. Зміна його витрати іноді досягає 40%. Для забезпечення надійності повітропостачання та стабільної роботи споживачів стисненого повітря обслуговуючий персонал компресорної станції змушений підтримувати підвищений тиск стисненого повітря у вихідному нагнітальному повітропроводі. Крім того, часті цикли зміни режимів роботи компресорного обладнання призводять до передчасного виходу з ладу окремих його вузлів, відновлення працездатності яких витрачаються значні фінансові

засоби, матеріальні та трудові ресурси. В окремих випадках доцільно, забезпечити постачання стисненим повітрям віддалених пневмоприймачів від локальних компресорних установок.

Раціональні режими отримання стисненого повітря досягаються за відповідністю продуктивності компресорної станції кількості споживаного стисненого повітря пневмоприймачами. Експлуатація компресорних установок, що подають споживачам стиснене повітря тиском нижче номінального, призводить до зниження продуктивності пневмоприймачів та відповідно до збільшення ними витрати стисненого повітря для досягнення заданої продуктивності. У ряді випадків стиснене повітря подається компресорною станцією пневмоприймачам тиском вище номінального, внаслідок чого втрати повітря зростають. Регулювання тиску стисненого повітря - ефективний спосіб економії електроенергії на його виробництво (у разі зниження тиску стисненого повітря у пневмоприймачі на 0,02 МПа його витрата зменшується на 3%.

Для зміни кількості стиснутого повітря компресорною станцією протягом зміни або доби повинні бути передбачені пристрої і способи регулювання продуктивності компресорних установок і в цілому станції. Впровадження засобів та методів автоматизації процесів вироблення стисненого повітря дозволить точно витримувати їх параметри у системах виробництва та розподілу.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Енергоефективність є головною проблемою при виробництві стисненого повітря, так як з погляду енергетичної ефективності, є не вигідним. Найбільші втрати енергії на компресорних станціях виникають через недостатній рівень організації ефективного контролю та управління роботою компресорних установок. Компресорні станції працюють неекономічно через високі питомі витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря. На більшості компресорних станцій підприємств відсутні прилади обліку кількості виробленого стиснутого повітря, що не дозволяє експлуатаційному персоналу ефективно і якісно здійснювати технологічний процес його виробництва, проводити аналіз техніко-економічних показників роботи компресорних установок та фактичної питомої витрати електричної енергії на виробництво стисненого повітря.

ЛІТЕРАТУРА

1. Барановська М.Л. Аналіз споживання електричної енергії компресорними установками на залізничних шахтах України/ І.Е. Петренко, В.Д. Барановський//Science progress in European countries: new concepts and modern solutions. – 2019. – С. 102-113.

2. Маляренко В.А. Енергозбереження та енергетичний аудит/ В.А. Маляренко, І.А. Немировський. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 345 с.
3. Бондаренко Г. А. Компресорні станції/ Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. Суми: Сумський державний університет, 2016. – 386 с.
4. Холоменюк М.В. *Компресорні установки*/ Холоменюк М.В. Дніпро: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2013. – 52 с
5. Замицький О.В. Дослідження шляхів підвищення енергетичної ефективності виробництва стисненого повітря в шахтних компресорних установках/ О.В. Замицький, М.Ю. Лідер //Вісник Криворізького національного університету. – 2019. – №43. – С.175-180.

REFERENCES

1. Baranovska M.L. Analysis of electrical energy consumption by compressor units at iron ore mines of Ukraine/ I.E. Petrenko, V.D. Baranovskyi//Science progress in European countries: new concepts and modern solutions. – 2019. – P. 102-113.
2. Malyarenko V.A. Energy conservation and energy audit/ V.A. Malyarenko, I.A. Nemyrovsky - Kharkiv: NTU "KhPI", 2011. - 345 p.
3. G.A. Bondarenko Compressor stations / G. A. Bondarenko, G. V. Kyryk. Sumy: Sumy State University, 2016. – 386 p.
4. Holomenyuk M.V. Compressor units/ M.V. Kholomenyuk. Dnipro: State University "National Mining University", 2013. – 52 p.
5. O.V. Zamytskyi. Investigation of ways to increase the energy efficiency of compressed air production in mine compressor units/ O. V. Zamytskyi, M.Yu. Lider // Journal of Kryvyi Rih National University. – 2019. – No. 43. - P.175-180.

Received 19.04.2024.

Accepted 22.04.2024.

Research of methods of increasing the energy efficiency of compressed air production by mine turbocompressors

Modern technological processes of industrial enterprises are provided by various energy carriers. The choice of rational energy carriers is determined by technological conditions, technical and economic indicators of production processes and energy supply conditions. Along with the main energy carriers, such as boiler and furnace fuel, thermal and electrical energy, water, compressed air is widely used in many industries. This is facilitated by its special properties: elasticity, transparency, harmlessness, fire safety, inability to condense, fast pressure transfer and unlimited supply of atmospheric air in nature. Compressed air is one of the most expensive energy carriers used in industry. One kilojoule of energy obtained from a factory network of compressed air is seven to ten

times more expensive than a kilojoule of energy used in an electric drive. This is due to the fact that the production of compressed air itself requires expensive compressor equipment and an air conditioning system that includes, among other things, a dehumidification system. Nevertheless, the specific weight of this type of energy in modern production is quite large. On average, compressed air production in industrialized countries accounts for about 10% of the total energy balance. At a number of industrial enterprises, the consumption of electricity for the production of compressed air reaches 20 - 30% of the total amount of consumed electrical energy. Therefore, in systems of production and distribution of compressed air, the task of energy saving is very relevant, which is achieved by increasing the efficiency of compressors, rational use of compressed air by pneumatic receivers and reducing its losses during production and transportation to consumers. So, the article discusses methods of increasing the efficiency of compressed air production and distribution systems. Methods and methods of reducing the specific consumption of electricity for the production of compressed air at compressor stations, its losses in the production and distribution systems, as well as increasing the productivity, efficiency and reliability of the operation of compressor stations are proposed.

Key words: compressed air, mine turbocompressor, air supply system, energy efficiency, consumer.

Юрій Анатолійович Монастирський – д.т.н., професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет.

Валерій Костянтинович Титюк – д.т.н., професор кафедри електромеханіки, Криворізький національний університет.

Monastyrskiy Yurii - Dr. Tech. Sciences, professor of Head of Automobile Facilities Department, Kryvyi Rih National University.

Tityuk Valery - Dr. Tech. of Sciences, professor of Electromechanics Department, Kryvyi Rih National University.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ НАДЗВУКОВОГО ГАЗУ В КАНАЛАХ ЗМІННОГО ПЕРЕРІЗУ ЗАСОБАМИ OPENFOAM

Анотація. На сьогодні існує низка різних програмних комплексів, як пропрієтарних, так і з відкритим вихідним кодом. Одним з таких пакетів з відкритим вихідним кодом є OpenFOAM, який володіє широким спектром можливостей для розв'язання будь-яких завдань, від складних потоків рідини, включно з хімічними реакціями, турбулентністю і теплообміном, до акустики, механіки твердого тіла і електромагнетизму. В роботі розглядається задача комп'ютерного моделювання течії надзвукового газу в каналах змінного перерізу.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, течія надзвукового газу, OpenFOAM

З розвитком високопродуктивних обчислювальних систем створюються різні програмні продукти для математичного моделювання фізичних явищ, зокрема газодинамічних процесів. На сьогодні існує низка різних програмних комплексів, як пропрієтарних, так і з відкритим вихідним кодом. Одним з таких пакетів з відкритим вихідним кодом є OpenFOAM.

OpenFOAM - це відкрита інтегрована платформа для чисельного моделювання задач механіки суцільних середовищ [1]. Цей пакет являє собою безкоштовне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, що випускається і розробляється переважно компанією OpenCFD Ltd з 2004 року та глибоко інтегрований як у комерційні, так і академічні організації.

OpenFOAM володіє широким спектром можливостей для розв'язання будь-яких завдань - від складних потоків рідини, включно з хімічними реакціями, турбулентністю і теплообміном, до акустики, механіки твердого тіла і електромагнетизму.

Розглянемо задачу математичного моделювання течії надзвукового газу в каналах змінного перерізу.

Під час розгляду задач, пов'язаних із формуванням і поширенням поверхонь розривів у газах, витіканням газу з сопел надзвукових двигунів,

взаємодією сильних стрибків ущільнення з перепонами та ін., виникає необхідність розв'язувати рівняння газової динаміки.

Фізико-математична постановка задачі. Розглядається течія надзвукового газу в каналах змінного перерізу в одновимірній, двовимірній і тривимірній постановках.

Математична постановка для ідеального газу складається із системи рівнянь Нав'є-Стокса, усереднення виконано за Фавром [2], спільно з моделлю турбулентності SST $k - \omega$ [3]. У декартовій системі координат (x_1, x_2, x_3) для нестационарної в'язкої течії стисливого газу система рівнянь на основі законів збереження має вигляд:

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho} \tilde{u}_j] = 0, \quad (1)$$

де $\bar{\rho}$ - густина газу, кг/м³, $\tilde{u}_j$ - складова вектора швидкості по осі x_j , м/с;

Рівняння руху:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij} + \tilde{\tau}_{ij}] = 0, \quad (2)$$

де δ_{ij} - символ Кронекера $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j; \\ 0, i \neq j; \end{cases}$; $\tilde{\tau}_{ij}$ - тензор в'язких напружень, Па;

Рівняння балансу енергії:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{E})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{E} + \tilde{u}_j \bar{p} + \tilde{q}_j - \tilde{u}_i \tilde{\tau}_{ij}] = 0, \quad (3)$$

де $\tilde{E}$ - повна енергія, Дж, $\tilde{q}_j$ - тепловий потік, Дж/(м²*с), $\bar{p}$ - тиск газу, Па;

Рівняння стану ідеального газу:

$$\bar{p} = \bar{\rho} R \tilde{T}, \quad (4)$$

де R - газова постійна, Дж/(кг*К);

Тензор в'язких напружень і тепловий потік:

$$\tilde{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i'' u_j''}, \quad (5)$$

де μ - коефіцієнт динамічної в'язкості, Па*с;

$$\tilde{q}_j = -C_p \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} - C_p \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j}, \quad (6)$$

де C_p - питома теплоємність за постійного тиску газу, Дж/К, Pr - число Пранд-ля, μ_t - коефіцієнт турбулентної в'язкості, Па·с;

Рівняння для визначення турбулентної в'язкості:

$$\mu_t = \frac{\bar{\rho} a_1 k}{\max \left[a_1 \omega, \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)^2} \tanh \left(\left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500 \nu}{d^2 \omega} \right) \right]^2 \right) \right]}, \quad (7)$$

де k - кінетична енергія турбулентності, м²/с², ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с, ω - питома швидкість дисипації, с⁻¹.

Рівняння моделі турбулентності Ментера SST $k - \omega$.

Рівняння для кінетичної енергії турбулентності:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \prod_{ij} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\beta^* \bar{\rho} \omega k. \quad (8)$$

Рівняння для питомої швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \omega}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) = \prod_{ij} \frac{\gamma \bar{\rho}}{\mu_t} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \bar{\rho} \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\bar{\rho} \sigma_{\omega^2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \quad (9)$$

Для розв'язання системи рівнянь (1)-(9) у початковий момент часу ($t=0$) у всій ділянці задаються параметри навколишнього середовища ($p = p_a$, $T = T_a$).

Для випадку спокійного навколишнього середовища швидкість, кінетична енергія турбулентності та дисипація кінетичної енергії турбулентності дорівнюють нулю $u_x = 0$, $u_y = 0$, $u_z = 0$, $k=0$, $\omega=0$.

У зв'язку з квазілінійністю систем газодинамічних рівнянь, часом не вдається аналітично розв'язати поставлене завдання, і, як наслідок, доводиться використовувати чисельні методи інтегрування таких систем. За останні 70 років було розроблено велику кількість різних різницевих схем для розв'язання рівнянь газової динаміки.

Кожна різницева схема, так чи інакше, містить у собі розв'язок задачі Рімана. В роботі розглядалися різницеві схеми, засновані на методі скінченних об'ємів [4].

У 1954 році С.К. Годунов розробив ефективну різницеву схему розв'язання, названу згодом його ім'ям. В її основі лежить розв'язання задачі

про розпад довільного розриву в газах. Схема Годунова є схемою першого порядку, потребує значного часу на проведення розрахунку, але при цьому містить у собі точний ітераційний автомоделний розв'язок задачі Рімана. В області взаємодії сильних ударних хвиль метод Годунова проявляє чисельні дисипативні властивості, які аналогічні застосуванню штучної квадратичної в'язкості [5].

Знаходження потоків за методом Годунова. Відомо, що розриви в газі можуть бути стійкими тільки тоді, коли на них виконуються умови спільності. У разі невиконання цих умов відбувається розпад цього розриву на стійкі конфігурації.

Задача про розпад довільного розриву була детально проаналізована Кочиним Н.Є. у 1928 році. Алгоритм розв'язання цієї задачі докладно описано в [5]. Система рівнянь для розв'язання задачі розпаду розриву в 3-х мірній постановці для декартової системи координат у формі векторів-стовпців має такий вигляд:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial A(U)}{\partial x} + \frac{\partial B(U)}{\partial y} + \frac{\partial C(U)}{\partial z} = 0; \quad (10)$$

де U - вектор консервативних змінних, A, B, C - вектор потоків.

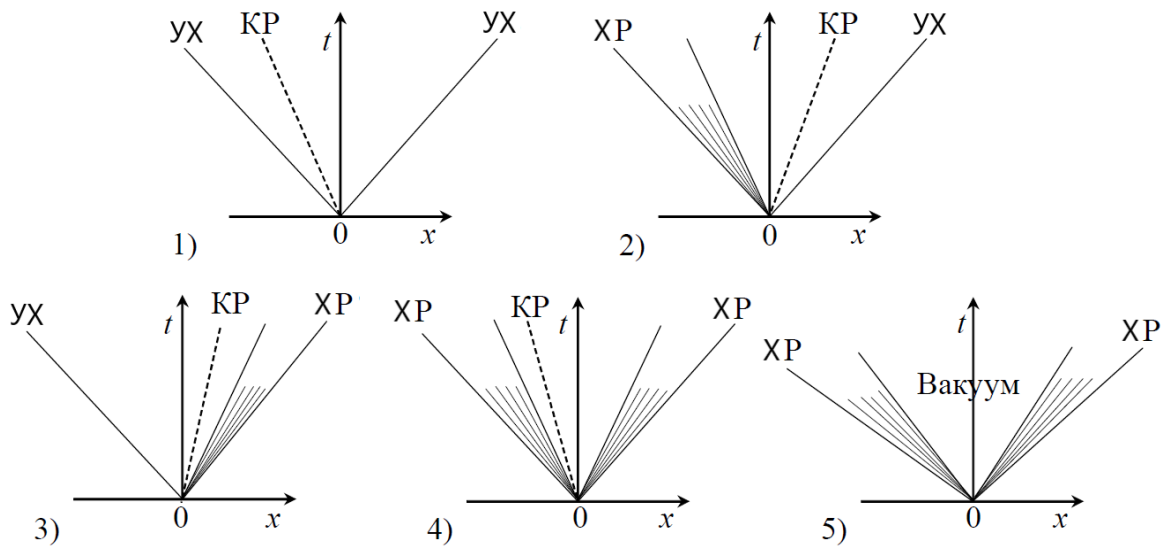
$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ \rho uw \\ u(\rho E + p) \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ p + \rho v^2 \\ \rho vw \\ v(\rho E + p) \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ p + \rho w^2 \\ w(\rho E + p) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

де $E = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho} + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}$ - повна енергія питомої маси газу, γ - питома газова стала для газу, що дорівнює 1.4.

У процесі розв'язання задачі можливе формування таких конфігурацій розривів, які представлено на рисунку 1.

Конфігурації 1) - 4) на рисунку 1 містять у собі контактний розрив КР, позначений штриховою лінією, на якому зазнає розриву густину, а тиск і нормальна до поверхні розриву компонента швидкості залишаються безперервними. Конфігурація 5) - являє собою граничний випадок, коли в результаті розриву утворюється область низького тиску, в якій густина падає до значення $\rho = 0$ у двох хвилях розрідження, що обмежують область вакууму ліворуч і

праворуч. З фізичної точки зору отримання цієї конфігурації в процесі чисельного розв'язання не є можливим.



КР- контактний розрив, УХ - ударна хвиля, ХР - хвиля розрідження

Рисунок 1 - Конфігурації розпаду розриву

Комп'ютерне моделювання течії надзвукового газу в каналах змінного перерізу проводилася у пакеті OpenFOAM.

Для перевірити працездатність побудованої комп'ютерної моделі, було проведено порівняння отриманих значень параметрів газу з його чисельними значеннями. Для цього розв'язали задачу нестационарної одновимірної течії ідеального газу в області, зображеній на рисунку 2. Довжина області задавалася інтервалом $[0,1]$ з дискретизацією в 100 комірок. Вважалося, що в початковий момент часу $t = 0$ ліворуч від точки $x = x_0$ газ має параметри з індексом l , а праворуч параметри з індексом r . Граничні умови являли собою встановлення твердої стінки на межах Γ_1 і Γ_2 .

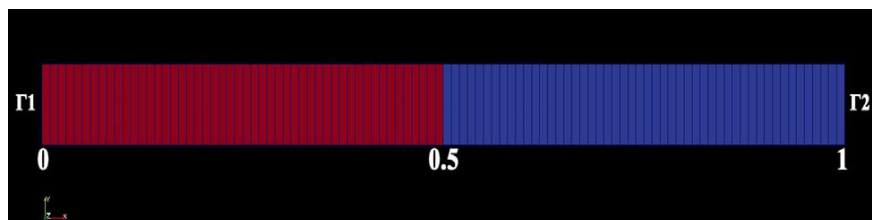


Рисунок 2 - Розрахункова область для одновимірної течії при $x_0 = 0,5$

Дали проводилися серія випробувань та порівняння методу Годунова з методами Русанова, HLLC, Роу. Розглянуто двовимірну течію ідеального газу в каналі з різким звуженням (уступом). Розрахункова область каналу представ-

лена на рисунку 3. Довжина каналу становить 1 метр, висота на вході 0.5 метра, висота уступу 0.1 метр. На межі Г1 задавали параметри потоку газу, що набігає, на границях Г2, Г3, Г4, Г6 - граничні умови на твердій стінці, на межі границі Г5 - знесення. Початковий розподіл усередині області відповідає значенням на межі Г1. Як газ використовувалися параметри повітря, швидкість набігаючого потоку становила 3 Маха.

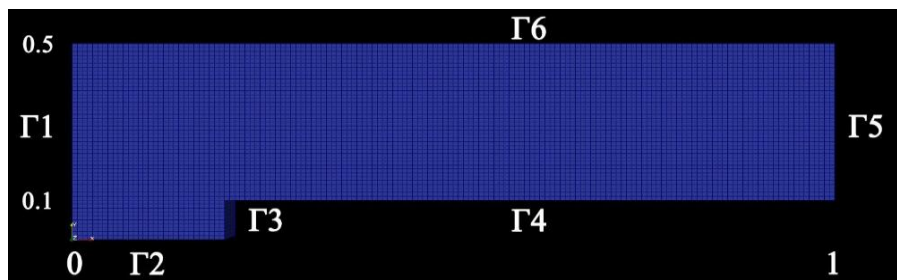
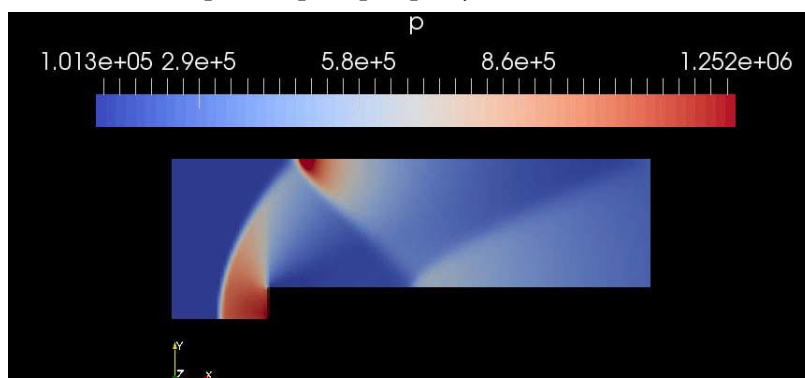
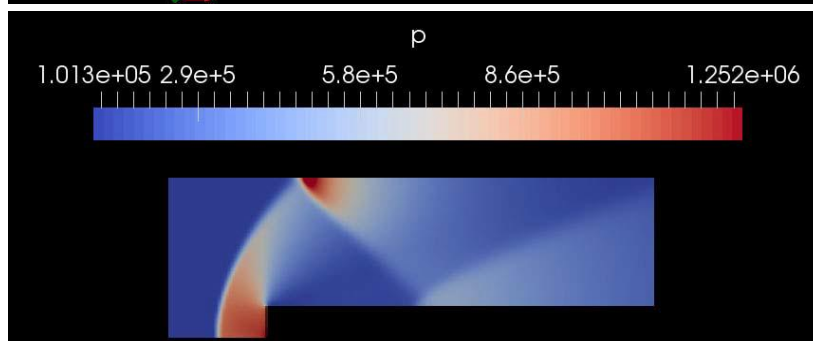


Рисунок 3 - Розрахункова область для каналу з уступом

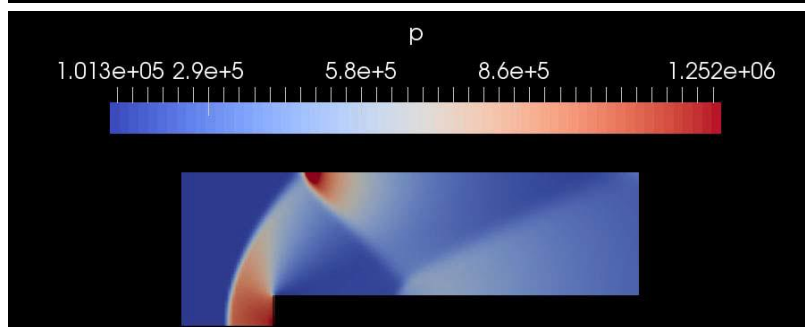
На рисунку 4 показано результати розрахунків для уступу у вигляді полів тисків. Розмір комірок розрахункової сітки для всіх варіантів однаковий.



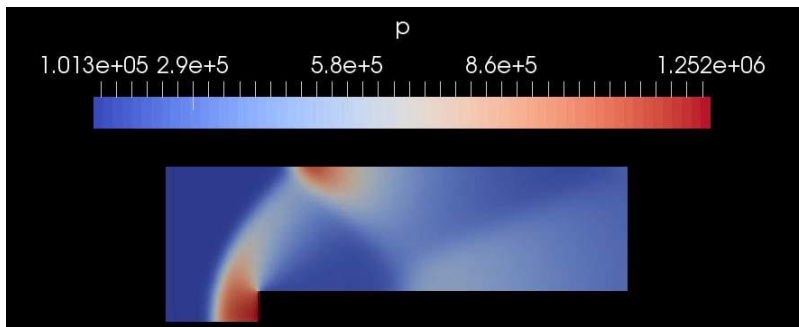
А - Метод Годунова



Б - Метод HLLC



В - Метод Роу



Г - Метод Русанова

Рисунок 4 – Результати розрахунків для уступу у вигляді полів тисків

Результати розрахунків показують, що реалізоване чисельне розв'язання в OpenFOAM за методом Годунова, HLLC, Роу збігається з розв'язаннями між собою. Метод Русанова має невеличку відмінну в порівнянні з іншими методами. Це видно за системою стрибків і чисельними значеннями параметрів газу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Greenshields C.J. OpenFOAM User Guide – v.6 – OpenFOAM Foundation Ltd., 2018. – 237 с.
2. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD / D.C. Wilcox. – California: DCW Industries, Inc. – 1993. – 460 p.
3. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – V. 32, № 8. – P. 1598-1605.
4. F. Moukalled The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics / F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – 791 p.
5. Годунов С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов – М.: Наука 1976. – 400 с.

REFERENCE

1. Greenshields C.J. OpenFOAM User Guide – v.6 – OpenFOAM Foundation Ltd., 2018. – 237 с.
2. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD / D.C. Wilcox. – California: DCW Industries, Inc. – 1993. – 460 p.
3. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – V. 32, № 8. – P. 1598-1605.
4. F. Moukalled The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics / F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – 791 p.

5. Hodunov S. K. Chyslennoe reshenye mnohomernykh zadach hazovoi dynamyky / S. K. Hodunov, A. V. Zabrodyn, M. Ya. Yvanov – M.: Nauka 1976. – 400 s.

Received 22.04.2024.

Accepted 24.04.2024.

Computer modeling of supersonic gas flow in variable cross-section channels using OpenFOAM

With the development of high-performance computing systems, various software products are being created for mathematical modeling of physical phenomena, including gas-dynamic processes. Today, there are a number of different software packages, both proprietary and open source. One of these open source packages is OpenFOAM.

OpenFOAM has a wide range of capabilities to solve any problem - from complex fluid flows, including chemical reactions, turbulence, and heat transfer, to acoustics, solid mechanics, and electromagnetism.

Let's consider the problem of mathematical modeling of supersonic gas flow in channels of variable cross-section.

When considering problems related to the formation and propagation of discontinuity surfaces in gases, gas leakage from supersonic engine nozzles, interaction of strong compression surges with obstacles, etc., it becomes necessary to solve the equations of gas dynamics.

We consider the flow of supersonic gas in channels of variable cross-section in one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional formulations.

The problem of decay of an arbitrary discontinuity was analyzed in detail by N.E. Kochin in 1928. The algorithm for solving this problem is described in detail. The system of equations for solving the problem of rupture decay in a 3-dimensional formulation for the Cartesian coordinate system in the form of column vectors.

The results of the calculations show that the implemented numerical solution in OpenFOAM using the Godunov, HLLC, and Rowe methods coincide with the solutions of each other. Rusanov's method has a slight difference compared to the other methods. This can be seen in the system of jumps and numerical values of gas parameters.

Keywords: computer modeling, supersonic gas flow, OpenFOAM

Дмитрієва Ірина Сергіївна - к.т.н., доцент, доцент кафедри ІТС Інститут промислових і бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій, Україна.

Dmytriieva Iryna Serhiivna - Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the ITS Department of the Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology, Ukraine.

Д.О. Кононов, В.О. Єрмократьев, І.В. Пелих

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОТА З ЕЛАСТИЧНИМИ СИТАМИ

Анотація. Грохочення є одною з основних операцій при переробки сипкого матеріалу.

У процесі експлуатації конструкції просіваючих поверхонь повинні мати високі показники ефективності процесу грохочення в залежності від умов класифікації і як можна довше зберігати постійними розміри просіваючих отворів (щілин), щоб мінімізувати можливість закрупнення або задрібненості класифікованого матеріалу розрахункової крупності.

На кафедрі галузевого машинобудування УДУНТ розроблено нову конструкцію еластичної просіючої поверхні, яка має високі експлуатаційні показники роботи.

На вібраційному грохоті з розробленим еластичним ситом, проведені експериментальні дослідження та отримані залежності ефективності грохочення від параметрів роботи вібраційного грохота.

Розроблено математичну та комп'ютерну моделі, які дозволять за допомогою отриманих експериментальних даних прогнозувати ефективності грохочення залежно від параметрів роботи вібраційного грохоту.

Проведено порівняння результатів, отриманих регресійним методом та машинним навчанням.

Найменшу похибку дають моделі регресії гаусівського процесу. Зокрема, найкращий результат показує регресія з експоненціальною функцією ядра.

Порівнюючи результати, можна зробити висновок, що моделі отримані методом машинного навчання, дають точніший результат ($\delta_{\max} = 5,3\%$), а при застосуванні рівняння множинної регресії похибка становить 16,2%.

Ключові слова: вібраційний грохот, еластичні сита, ефективність грохочення, прогнозування, множинна регресійна модель машинне навчання.

Постановка задачі. Грохочення є одною з основних операцій при переробки сипкого матеріалу [1, 2]. У процесі експлуатації конструкції просіваючих поверхонь повинні мати високі показники ефективності процесу грохочення в залежності від умов класифікації і як можна довше зберігати постійними розміри просіваючих отворів (щілин), щоб мінімізувати можливості закрупнення або задрібненості класифікованого матеріалу розрахункової крупності.

Нові перспективні конструкції просіваючих поверхонь шихтових грохотів і грохотів металургійної сировини повинні бути надійними і довговічними в роботі, мати максимально можливий живий перетин, високу поглинаючу здатність і низьку забиваємість просіваючих отворів класифікованими частками важкопросіюваних «граничних класів крупності».

В даний час, широкого поширення набули сита, які виготовляються з неметалевих матеріалів, зокрема з гуми або поліуретану, що мають високу зносостійкість.

На кафедрі галузевого машинобудування УДУНТ розроблено нову. конструкцію еластичної просіючої поверхні, яка має високі експлуатаційні показники роботи [0, 3,]. Загальний вид грохоту наведено на рис 1.

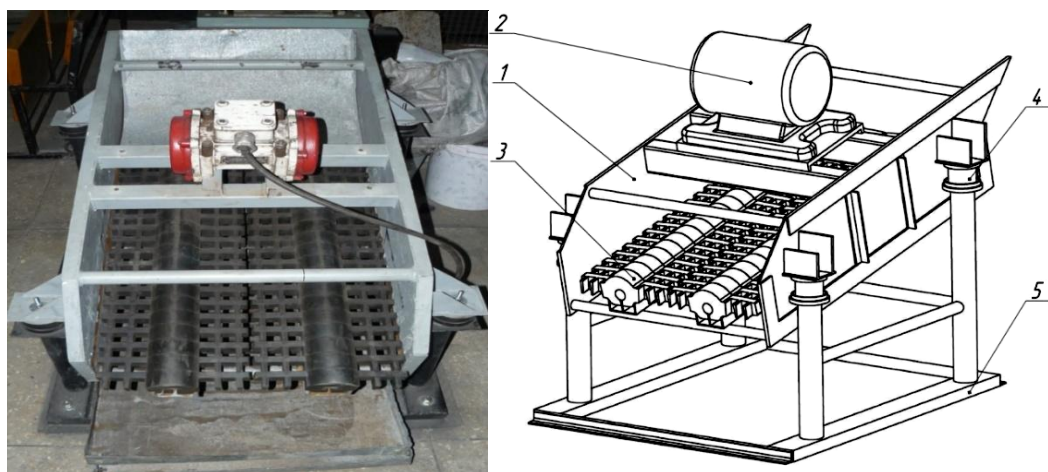


Рисунок 1 - Загальний вид вібраційного грохота: 1 – короб;
2 – вібропривод; 3 – просіюча поверхня; 5 – стійка

Були проведені експериментальні дослідження та отримані залежності ефективності грохочення від параметрів роботи вібраційного грохота. Деякі з них наведені на рис. 2-3 [0, 3].

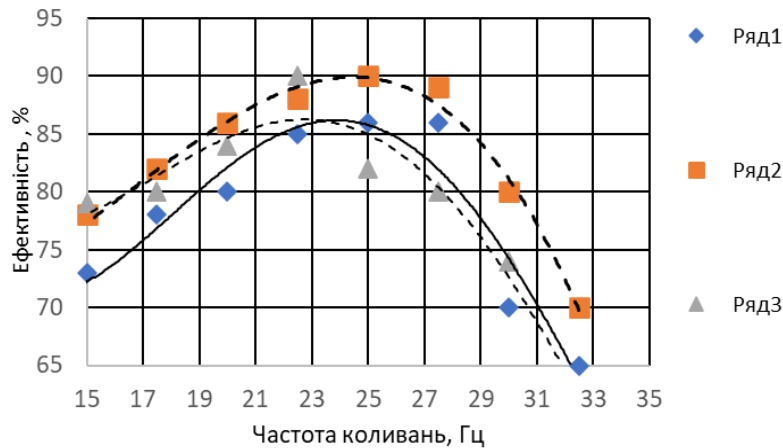


Рисунок 2 - Залежності технологічних показників грохочення коксу по класу крупності -25 мм від частоти (ω) і амплітуди (A_i) коливань:
 1 – $A_1 = 3$ мм, 2 – $A_2 = 5$ мм, 3 – $A_3 = 7$ мм

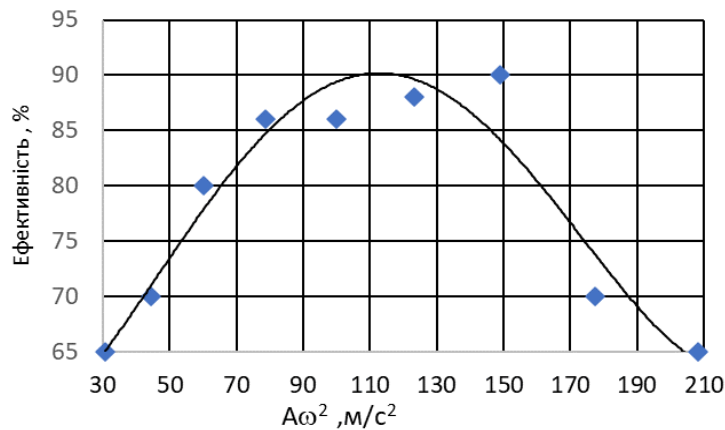


Рисунок 3 - Графічні залежності технологічних показників грохочення коксу від прискорень коливань ($A\omega^2$)

Мета роботи: розробити математичну та комп'ютерну моделі, які дозволять за допомогою отриманих експериментальних даних прогнозувати ефективності грохочення залежно від параметрів роботи вібраційного грохоту.

Основна частина. Вихідні дані та постановка задачі

Задачі, які необхідно вирішити для прогнозування ефективності грохочення вібраційного грохота з еластичними ситами:

1. Розробити та розрахувати математичну модель на підставі традиційних методів аналізу, використовуючи класичний регресійний метод, реалізований в офісних пакетах *Microsoft Excel* або *LibreOffice*.

2. Розробити комп'ютерну модель, ґрунтуючись на методах машинного

навчання (*Machine Learning*).

Вихідними даними для розрахунку є:

- частота обертання валу мотор-вібратора (частота коливання короба грохоту), w , Гц;
- амплітуда коливань короба грохоту, A , мм;
- продуктивність живлення, Π , т/год;
- ефективність грохочення, E , %.

У нашому випадку кількість експериментів дорівнює 27. Вихідні дані наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані до розрахунку

№	1	2	3	4	5	6	7
w , Гц	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5
A , мм	3	3	3	3	3	3	3
Π , т/год	87	86	84	83	81	78	72
E , %	71	73	78	80	85	86	86

...

№	8	9	10	11	12	13	14
w , Гц	30	32.5	12.5	15	17.5	20	22.5
A , мм	3	3	5	5	5	5	5
Π , т/год	62	50	90	89	88	87	86
E , %	70	65	73	78	82	86	88
№	15	16	17	18	19	20	21
w , Гц	25	27.5	30	32.5	12.5	15	17.5
A , мм	5	5	5	5	7	7	7
Π , т/год	85	80	72	62	91.5	90.5	89.5
E , %	90	89	80	70	77	79	80

...

№	22	23	24	25	26	27
w , Гц	20	22.5	25	27.5	30	32.5
A , мм	7	7	7	7	7	7
Π , т/год	89	88	87	84	77	68
E , %	84	90	82	80	74	62

Як відомо, точність регресійних моделей залежить від кількості вихідних даних, чим більше тим краще. При розробці моделей прогнозування загальна кількість даних ділиться на три групи:

- тренувальні дані (70-80%);
- дані для валідації (10-15%);
- дані для тестування (10-15%).

У нашому випадку кількість експериментів дорівнює 27, що досить мало. Спочатку визначити параметри моделей за тренувальними даними, без валідації моделі. А потім перевірити модель за атестованими даними.

Пропонується розділити наші дослідні дані (табл. 1) на дві групи:

- тренувальні дані (22 експерименти);
- дані для тестування (5 експериментів).

Після отримання результатів для кількох моделей проведемо порівняння.

Побудова множинної регресійної моделі

Для розрахунку та оцінки регресійної моделі скористаємося програмою *Microsoft Excel* та її надбудова **Аналіз даних** або розрахунком **Статистика/Регресія** пакету *LibreOffice*.

Для цього сформуємо вихідні дані та введемо такі позначення:

x_1 – частота обертання валу мотор-вібратора (частота коливання короба грохоту), ω , Гц;

x_2 – амплітуда коливань короба грохоту, A , мм;

x_3 – продуктивність по живленню, P , т/год;

В результаті отримуємо рівняння регресії:

$$Y = -51,66 + 1,60 X_1 - 2,55 X_2 + 1,329 X_3.$$

З розрахунку показників *t-статистики* статистична значимість коефіцієнтів регресії підтверджується.

На рис. 4. наведено порівняння експериментальних даних (Y) та регресійної моделі (Y_{teor}) для 22 експериментів.

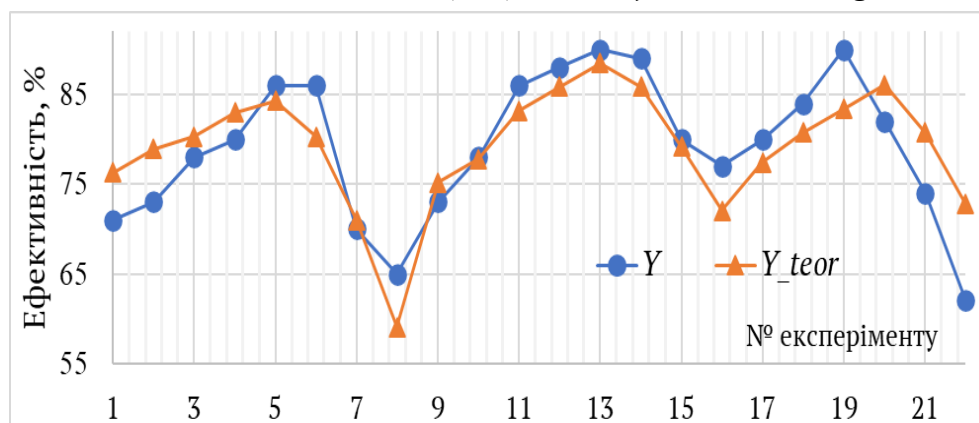


Рисунок 4 - Порівняння експериментальних даних (Y) та розрахунків за множиною регресійною моделлю ($Y_{теор}$)

Перевірка загальної якості рівняння множинної регресії.

Для перевірки використовується F -критерій Фішера. При цьому обчислюють фактичне значення F -критерію, що спостерігається, через коефіцієнт детермінації R^2 , розрахований за даними конкретного спостереження.

Критерій Фішера

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{n - m - 1}{m} = \frac{0,6692}{1 - 0,6692^2} \frac{22 - 3 - 1}{3} = 12,14$$

де R^2 – коефіцієнт детермінації; $n = 22$ – число експериментів; $m = 2$ – число оцінюваних параметрів.

Табличне значення при ступенях свободи $k_1 = 3$ та $k_2 = 22 - 3 - 1 = 18$, $F_{кр}(3, 18) = 3,16$.

Оскільки фактичне значення $F > F_{кр}$ коефіцієнт детермінації статистично значимий і рівняння регресії статистично надійно (тобто коефіцієнти рівняння спільно значущі).

Побудова комп'ютерної моделі визначення ефективності грохочення методами машинного навчання (*Machine Learning*)

Розробимо алгоритм побудови комп'ютерної моделі визначення ефективності грохочення, яка дозволяє за допомогою отриманих експериментальних даних прогнозувати ефективність грохочення, залежно від параметрів роботи вібраційного грохоту.

Розглянемо такі моделі три моделі:

- регресія гаусівського процесу Gaussian Process Regression (GPR), Model 1;

- машинних опорних векторів регресії (regression support vector machines SVM) Model 2;
- лінійна регресія Linear Regression, Model 3.

Результати наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку похибок для розрахункової вибірки ($n=22$)

	Gaussian Process Regression	Regression support vector machines (SVM)	Linear Regression
RMSE (Validation)	3,1599	3,5641	4,3529
R-Squared (Validation)	0,79	0,81	0,72
MSE (Validation)	14,137	12,703	18,947
MAE (Validation)	2,7317	2,5348	3,022

Прим. Root Mean Square Error (RMSE) – середньоквадратична похибка; Mean Square Error (MSE) – середній квадрат похибки; Mean absolute error (MAE) – середня абсолютна похибка; R – Squared (R^2)- коефіцієнт детермінації.

Результати тестування вибірки із 5 експериментів.

Таблиця 3

Результати розрахунку похибок для тестуючої вибірки ($n = 5$)

	Gaussian Process Regression	Regression support vector machines (SVM)	Linear Regression
RMSE (Validation)	0,88355	0,92796	2,4495
R-Squared (Validation)	0,98	0,97	0,76
MSE (Validation)	0,78067	0,8611	6,0001
MAE (Validation)	0,68893	0,87959	1,7316

Як бачимо з розрахунків найменшу похибку дають моделі регресії гаусівського процесу (GPR). Зокрема, найкращий результат показує регресія з експоненціальною функцією ядра.

Порівняння результатів моделювання за різними моделями з експериментальними даними

Проведемо порівняння результатів, отриманих регресійним методом та машинним навчанням.

Крім трьох моделей ML, додаємо до них раніше розраховану модель множинної лінійної регресії (*Model LR*) для тестових даних.

На рисунку 5 наведено суміщені результати розрахунку за математичними моделями та експериментальними даними.

На рис. 6 показані графіки відносних похибок розрахунків

$$\delta = \frac{abs(Y_{exp} - Y_i)}{Y_{exp}} 100\%$$

де Y_i - значення вологості, розраховане за математичними моделями;

Y_{exp} - значення вологості по експериментальними даними.

Як бачимо результати, отримані методом машинного навчання, дають точніший результат ($\delta_{max} = 5,3\%$), а при застосуванні рівняння множинної регресії похибка становить 16,2%.

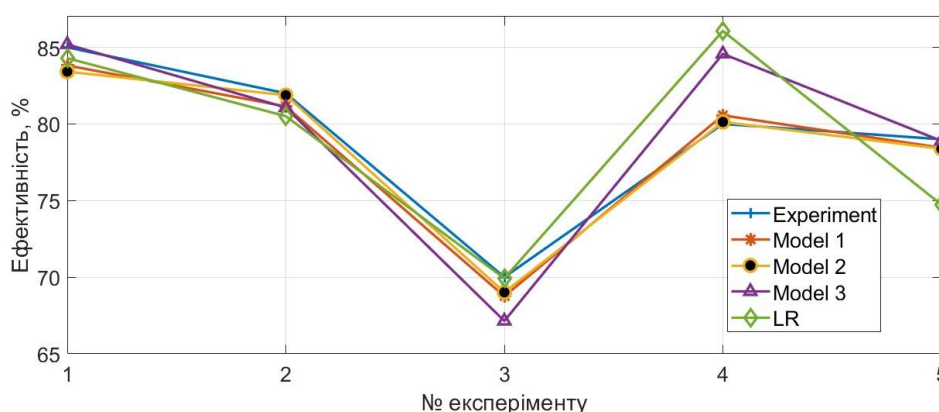


Рисунок 5 - Суміщені результати розрахунку за математичними моделями та експериментальними даними, для $n = 5$

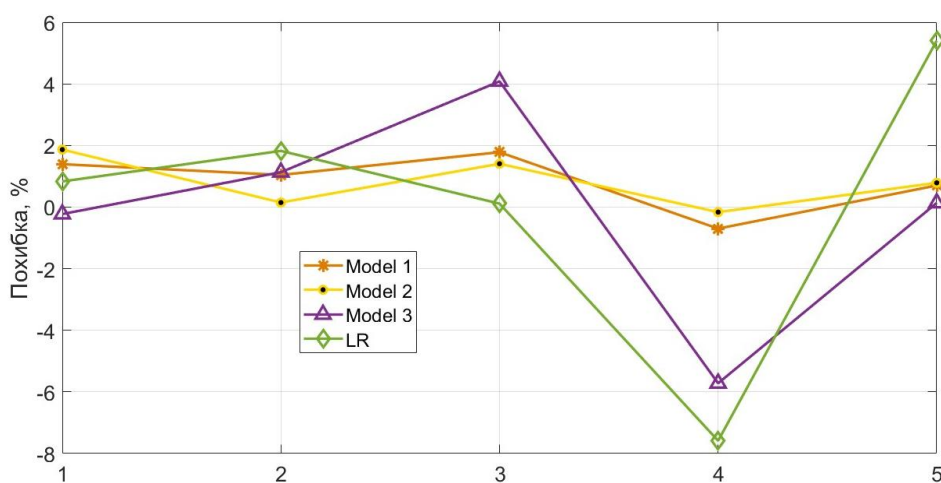


Рисунок 6 - Відносна похибка розрахунків

На рисунку 7 наведено суміщені результати розрахунку за математичними моделями та експериментальними даними для всіх 27 експериментів.

На рис. 8. показані графіки відносних похибок цих розрахунків.

Як бачимо результати, отримані методом машинного навчання, дають точніший результат ($\delta_{max} = 5,9\%$), а при застосуванні рівняння множинної регресії похибка становить 16,2%.

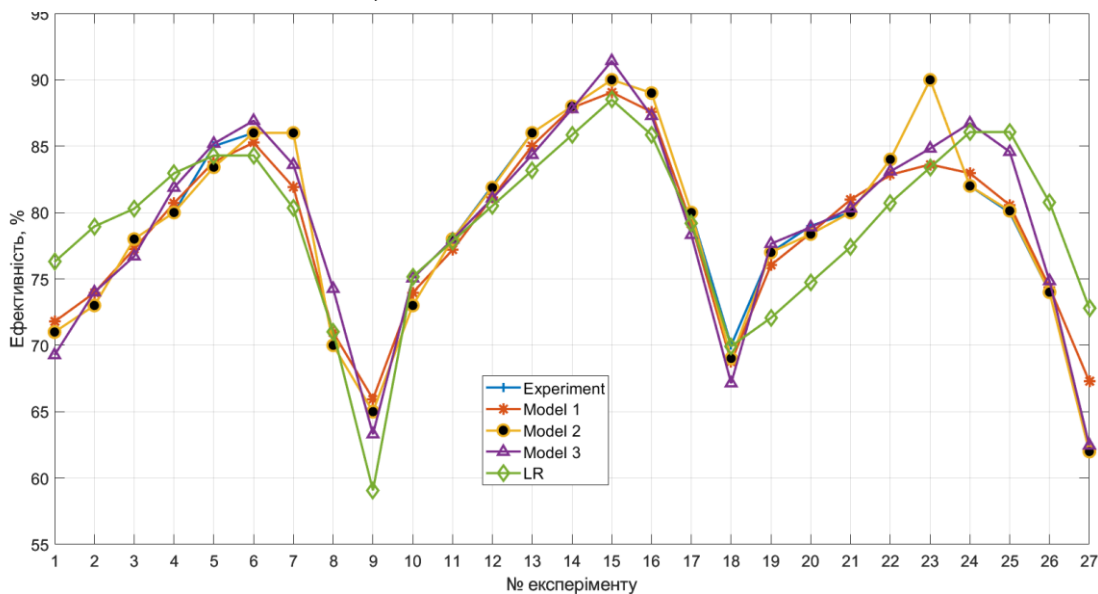


Рисунок 7 - Суміщені результати розрахунку за математичними моделями та експериментальними даними

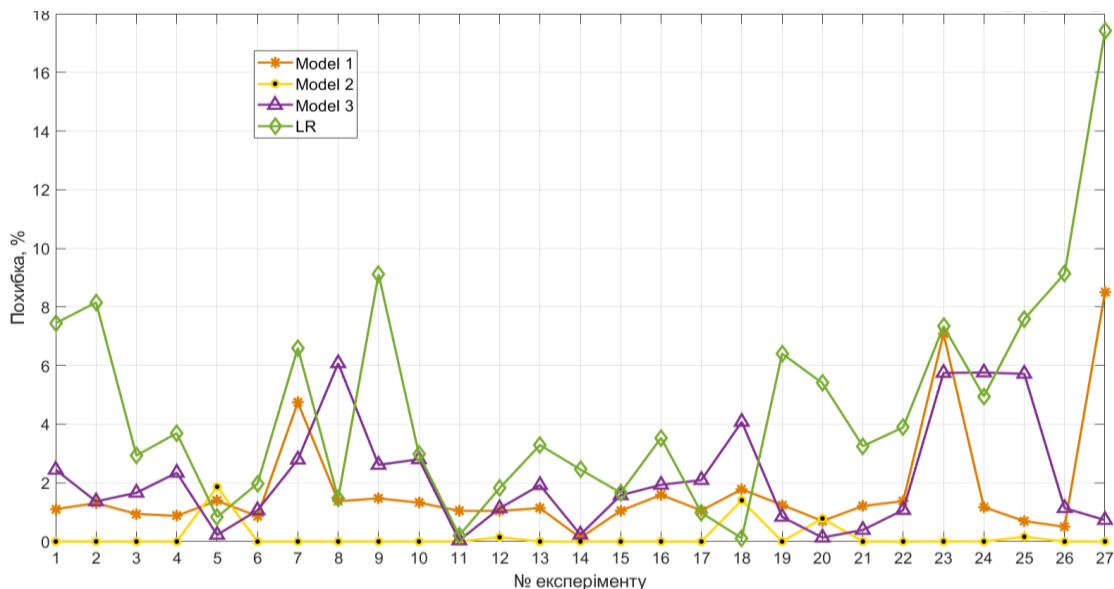


Рисунок 8 - Відносна похибка розрахунків для всіх розрахунків

Висновки. Розроблено математичну та комп'ютерну моделі, які дозволять за допомогою отриманих експериментальних даних прогнозувати ефективності грохочення залежно від параметрів роботи вібраційного грохоту.

Отримано рівняння множинної регресії: $Y = -51,66 + 1,60X_1 - 2,55X_2 + 1,329X_3$ (де X_1 — частота обертання валу мотор-вібратора (частота коливання короба грохоту), ω , Гц; X_2 — амплітуда коливань короба грохоту, A , мм; X_3 — продуктивність живлення, Π , т/год; Y — ефективність грохочення, E , %).

Статистична значущість рівняння за множиною регресії перевірена за допомогою коефіцієнта детермінації та критерію Фішера. Встановлено, що у досліджуваній ситуації 66,92% загальної варіабельності Y пояснюється зміною факторів X_j . Встановлено також, що один або кілька параметрів моделі статистично незначні.

Найбільший вплив на результативну ознаку має фактор X_3 (продуктивність по живленню).

Розроблено комп'ютерну модель з використанням, ґрунтуючись на методах машинного навчання (*Machine Learning*).

Результати, отримані методом машинного навчання, дають точніший результат ($\delta_{\max} = 5,3\%$), а при застосуванні рівняння множинної регресії похибка становить 16,2%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Удосконалення обладнання та процесів вуглепідготовки і кососортування металургійного виробництва: монографія /Засельський В. Й., Пополов Д. В., Зайцев Г. Л., Білодіденко С. В., Кононов Д. О., Пелих І. В. Кривий Ріг: Р. А. Козлов, 2019.- 203 с.
2. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин. [навчальний посібник] – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, 2012. – 286 с.
3. Обґрунтування раціональних параметрів і розробка динамічно активної колосниково-карткової просіючої поверхні вібраційних грохотів [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.08 / Пелих Ігор Володимирович; Нац. металург. акад. України. - Дніпро, 2017.
4. І.В. Пелих, С.В. Білодіденко, Д.О. Кононов, В.О. Петренко. Раціональна конструкція поверхні вібраційного грохоту металургійного виробництва /Металургійна та гірничорудна промисловість. -2009 - № 4 - с. 79-82.

5. Булат А.Ф., Дирда В.І., Пухальський В.Н., Лисиця М.І. Розробка та створення вібраційної техніки з використанням еластомерів для видобутку, переробки і збагачення мінеральної сировини/ Геотехнічна механіка. 2018. № 138.

REFERENCES

1. Improvement of equipment and processes of coal preparation and skew sorting of metallurgical production: monograph / Zaselskyi V.Y., Popolov D.V., Zaitsev G.L., Bilodidenko S.V., Kononov D.O., Pelikh I.V. Kryviy Rig: 2019.
2. Smirnov V.O., Biletskyi V.S. Preparatory processes of mineral enrichment. [study guide] - Donetsk: Eastern Publishing House, Donetsk branch of the National Academy of Sciences, 2012. - 286 p.
3. Justification of rational parameters and development of a dynamically active grate-card sieving surface of vibrating screens [Text]: diss. ... candidate technical Sciences: 05.05.08 / Ihor Volodymyrovych Pelikh; National metallurgist. Acad. of Ukraine. - Dnipro, 2017.
4. I.V. Pelikh, S.V. Bilodyedenko, D.O. Kononov, V.O. Petrenko. Rational design of the surface of the vibrating screen of metallurgical production / Metallurgical and mining industry. -2009 - No. 4 - p. 79-82.
5. Bulat A.F., Dyrda V.I., Puhalskyi V.N., Lysytsia M.I. Development and creation of vibration equipment using elastomers for extraction, processing and beneficiation of mineral raw materials/ Geotechnical mechanics. 2018. No. 138.

Received 22.04.2024.

Accepted 24.04.2024.

Development of methods for forecasting the technological indicators of the work of a vibrating screen with elastic sives

Screening is one of the main operations in the processing of loose material.

In the process of operation, the structures of the sieving surfaces must have high indicators of the efficiency of the sieving process depending on the classification conditions and keep the sizes of the sieving holes (slots) constant as long as possible in order to minimize the possibility of coarsening or crushing of the classified material of the calculated size.

Currently, sieves made of non-metallic materials, in particular rubber or polyurethane, which have high wear resistance, have become widely used.

A new one has been developed at the Department of Mechanical Engineering of UST. the construction of an elastic sieving surface, which has high performance indicators.

On a vibrating screen with a developed elastic sieve, experimental studies were carried out and dependences of the screening efficiency on the operating parameters of the vibrating screen were obtained.

Mathematical and computer models have been developed, which will allow, using the obtained experimental data, to predict screening efficiency depending on the operating parameters of the vibrating screen.

The multiple regression equation for determining screening efficiency was obtained: $Y = -51,6593 + 1,598X_1 - 2,5501X_2 + 12329X_3$ (where X_1 is the rotation frequency of the motor-vibrator shaft (frequency of vibration of the screening box), Hz; X_2 is the amplitude of vibrations of the screening box, mm; X_3 - feeding productivity, t/h).

Gaussian process regression models give the smallest error. In particular, regression with an exponential kernel function shows the best result.

The results obtained by the regression method and machine learning were compared.

Comparing the results, it can be concluded that the models obtained by the machine learning method give a more accurate result ($\delta_{\max} = 5,3\%$), and when applying the multiple regression equation, the error is 16,2%.

Кононов Дмитро Олександрович - кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій, (м. Дніпро).

Єрмократьєв Віктор Олексійович - кандидат технічних наук, декан факультету дизайну машин та захисту довкілля, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій.

Пелих Ігор Володимирович - кандидат технічних наук, науковий співробітник Інститута геотехнічної механіки ім. Н. Полякова НАН України.

Kononov Dmytro candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Industrial Engineering Department, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology, (Dnipro).

Yermokratiev Viktor - Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Machine Design and Environmental Protection, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology.

Pelikh Ihor - candidate of technical sciences, researcher at the Institute of Geotechnical Mechanics named after N. Polyakova, National Academy of Sciences of Ukraine.

ЗМІСТ

CONTENTS

Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В.		Adjamskiy S., Kononenko A., Podolskyi R.	
Аналіз технологічних способів мінімізації залишкових внутрішніх напружень при SLM	3	Analysis of technological methods of minimizing residual internal stresses at SLM	3
Василів С.С., Токарева О.Л.		Vasiliv S.S., Tokareva O.L.	
Експериментальна методика визначення швидкості горіння твердого ракетного палива з електропровідними продуктами реакції в приладі постійного тиску	13	Experimental technique for determining the burning rate of solid rocket fuel with electrically conductive reaction products in a constant pressure device	13
Носов В.О., Островська К.Ю.		Nosov V.O., Ostrovska K.Yu.	
Дослідження системи розпізнавання природної мови Amazon Lex V2	22	Research on Amazon Lex V2 Natural Language Recognition System "	22
Горбатов В.С., Журба А.О.		Gorbatov V.S., Zhurba A.O.	
Дослідження впливу існуючих алгоритмів оптимізації обробки правил на швидкодію системи виявлення мережевих вторгнень snort 3	30	Influence of existing rule processing optimizations on the performance of the snort 3 network intrusion detection system	30
Зіборов І.К.		Ziborov I.K.	
Інформаційні технології супро- воду управлінських рішень в прокатному виробництві	44	Information technologies of management decisions supporting in the rolled metal manufacturing	44
Інкін О.А., Погорєлов О.В.		Inkin O.A., Pohorielov O.V.	
Моделювання ЕЕГ за допомогою глибоких нейронних мереж	57	EEG modeling using deep neural networks	57

Купін А.І., Косей М.П. Аналіз алгоритмів ройового інтелекту	69	Kupin A.I., Kosei M.P. Analysis Of Swarm Intelligence Algorithms	69
Мазуренко В.Б. Дослідження рівня відповідності мікроконтролера ESP32 міжнародним стандартам з кібернетичної безпеки інтернету речей	81	Mazurenko V.B. Assessment of ESP32 microcontroller compliance with international standards of cyber security for Internet of Things	81
Поляков М.О., Ленок А.А., Поляков О.М. Аналіз результатів неповного факторного експерименту на прикладі даних про відносну швидкість старіння целюлозної ізоляції	88	Polyakov M.O., Lenok A.A., Polyakov O.M. Analysis of the results of an incomplete factorial experiment using data on the relative aging rate of cellulose insulation as an example	88
Федотова М.О., Трушаков Д.В., Зубенко В.О., Березюк І.А., Заворуєв Р.С., Трипольський М.О. Оцінювання зміни висоти дисперсного матеріалу в сушильній камері непрямим методом	98	Fedotova M., Trushakov D., Zubenko V., Berezyuk I., Zavoruyev R., Trypolskyi M. Evaluation of the change in the height of the dispersed material in the drying chamber by an indirect method	98
Димо В.В., Гожий О.П., Калініна І.О. Застосування згорткових нейронних мереж для виявлення пошкоджених будівель	107	Dymo V.V., Gozhy O.P., Kalinina I.O. Application of convolutional neural networks to detect damaged buildings	107

Мала Ю.А., Селівьорстова Т.В., Гуда А.І. Використання технології Orange для інтелектуального аналізу да- них в освітній галузі	115	Mala Yu.A., Selivorstova T.V., Guda A.I. The use of Orange technology for intellectual data analysis in the educational field	115
Молодець Б.В., Булана Т.М. Аналіз існуючих архітектур для розробки системи оцінки якості повітря	128	Molodets B.V., Bulana T.M. Analysis of existing architectures for the development of an Information System of Air Quality Assessment	128
Монастирський Ю.А., Титюк В.К. Дослідження методів підвищення енергоефективності виробництва стисненого повітря шахтними турбокомпресорами	140	Monastyrskiy Yu.A., Tytyuk V.K. Research of methods of increasing the energy efficiency of compressed air production by mine turbocompressors	140
Дмитрієва І.С. Комп'ютерне моделювання течії надзвукового газу в каналах змінного перерізу засобами OpenFOAM компонентами	148	Dmytriieva I.S. Computer modeling of supersonic gas flow in variable cross-section channels using OpenFOAM	148
Кононов Д.О., Єрмократьєв В.О., Пелих І.В. Розробка методів прогнозування технологічних показників роботи вібраційного грохота з еластичними ситами	156	Kononov D.O., Yermokratiev V., Pelikh I.V. Development of methods for forecasting technological performance indicators of a vibrating screen with elastic sieves	156

РЕФЕРАТИ

УДК 669.1.017:621.785

Аджемський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. **Аналіз технологічних способів мінімізації залишкових внутрішніх напружень при SLM** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.3 – 12.

Аддитивне виробництво (далі –en. AM) є сучасним комплексом технологій, які дають змогу швидко та якісно створювати вироби з унікальною геометрією, яку неможливо або складно виготовити традиційними способами виробництва. Дана технологія має ряд переваг для виготовлення виробів авіаційно космічного призначення, але, як і всі технології виробництва, дана технологія має ряд недоліків та проблем. Залишкові внутрішні напруження є однією з особливостей металевих матеріалів, виготовлених шляхом пошарового сплавлення за SLM технологією, але вони можуть значно впливати на механічні властивості та геометричні параметри. Таким чином питання зменшення впливу внутрішніх напружень потребує фундаментального розуміння їх впливу на геометричні параметри та службові характеристики матеріалів AM.

Бібл. 18, іл. 5.

УДК 629.7.036.54., 621.45.18.

Василів С.С., Токарева О.Л. **Експериментальна методика визначення швидкості горіння твердого ракетного палива з електропровідними продуктами реакції в приладі постійного тиску** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.13 – 21.

Актуальність тематики даної роботи визначається необхідністю створення науково інформаційної бази процесу горіння твердих ракетних палив, що розробляються для перспективних ракетних двигунів. Мета роботи – розробка методики визначення швидкості горіння твердого ракетного палива з мінімальними похибками, обумовленими надлишковим утворенням електропровідних продуктів реакції в експериментальному приладі. Розроблено експериментальну методику вимірювання швидкості горіння твердого ракетного палива з електропровідними продуктами реакції в приладі постійного тиску (бомбі Кроуфорда). Відпрацювання методики проведено на зразках твердопаливних композицій на основі нітрату калію.

Бібл. 7., іл. 5.

УДК 004.8

Носов В.О., Островська К.Ю. **Дослідження системи розпізнавання природної мови Amazon Lex V2** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.22 – 29.

Технологія розпізнавання людської мови є фундаментальним для розвитку штучного інтелекту. Системи, які побудовані на цій технології, мають можливість вирішувати досить велику кількість задач, пов'язаних з аналізом даних, пошуку інформації, виконанням

запитів користувачів. Популярними і досить поширеними рішеннями систем з NLP (Natural Language Processing) є голосові помічники, системи розумного дому (такі як Amazon Alexa чи Google Assistant). Дослідження цієї технології та аналіз її інтеграції в хмарних середовищах надає можливість самостійно використати її особливості у якості автоматизованих ад'ютантів, чи наприклад, як частину вже існуючої інтелектуальної системи.

Бібл. 3., іл. 2.

УДК 004.051

Горбатов В.С., Журба А.О. **Дослідження впливу існуючих алгоритмів оптимізації обробки правил на швидкодію системи виявлення мережових вторгнень snort 3** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.30 – 43.

Розглянута архітектура системи Snort 3, а також основні алгоритми оптимізації обробки правил (FastPattern, групування за портами та групування за протоколами) та їх вплив на швидкодію системи в різних сценаріях. Швидкодія системи вимірювалася за часом обробки запису мережевого трафіку, який містить як звичайні робочі пакети, так і шкідливі, на двох різних конфігураціях.

Бібл. 13, іл. 1, табл. 4.

УДК: 004.896 : 621.745

Зіборов І.К. **Інформаційні технології супроводу управлінських рішень в прокатному виробництві** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.44 – 56.

Описано структуру та функції інформаційної технології супроводу управлінських рішень в прокатному виробництві. При керуванні таким виробництвом важливу роль грає розв'язання задач умовної багатовимірної багатокритеріальної оптимізації. Для вирішення цих задач запропоновано використовувати гібридний еволюційний метод на основі рою часток та моделювання імунної системи людини.

Запропонована інформаційна технологія дозволяє змінювати виробниче завдання в залежності від наявності матеріалів та зміни їх ринкової вартості. Практична цінність розв'язання такої задачі полягає у підтримці собівартості сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

Бібл. 14, іл. 2.

УДК 612.8:004.8

Інкін О.А., Погорєлов О.В. **Моделювання ЕЕГ за допомогою глибоких нейронних мереж** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.57 – 68.

Проаналізоване використання деяких моделей нейронних мереж для моделювання електроенцефалографічного сигналу. Для отримання та обробки числових значень ЕЕГ була оцінена можливість та оптимальність використання мови Julia та розробленого на її

основі пакета Flux. Наведені розраховані показники втрат дозволили визначити найбільш оптимальний підхід для моделювання як епілептичного, так і неепілептичного типів ЕЕГ.

Бібл. 7, іл. 11, табл. 1

УДК 004.8

Купін А.І., Косей М.П. **Аналіз алгоритмів ройового інтелекту** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.69 – 80.

Ця стаття пропонує поглиблений огляд алгоритмів роевого інтелекту, підкреслюючи їх зростаючу важливість та застосування у різних сферах, як от військовій справі, сільському господарстві та моніторингу навколишнього середовища. У ній обговорюються поточні дослідження та збільшення області застосування, пропонуючи інтеграцію міждисциплінарних підходів для вирішення складних проблем за допомогою роевого інтелекту. Стаття має на меті надати напрямки для майбутніх досліджень, включаючи детальні порівняння алгоритмів роевого інтелекту та їх інтеграцію з іншими методами ШІ, підкреслюючи потенціал технології у вирішенні реальних викликів.

Бібл. 9, іл. 1, табл. 1

УДК 044.056

Мазуренко В.Б. **Дослідження рівня відповідності мікроконтролера ESP32 міжнародним стандартам з кібернетичної безпеки інтернету речей** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.81 – 87.

Досліджується захист мікроконтролера ESP32 від кібернетичних загроз шляхом аналізу відповідності платформи (мікроконтролер, ОС, API, підтримка виробника) вимогам міжнародних стандартів з кібербезпеки. Зокрема розглядаються: засоби керування звітами щодо вразливості, оновлення програмного забезпечення, надійне зберігання конфіденційних параметрів безпеки, безпечне спілкування та захист персональних даних. Отримано висновок, що мікроконтролер ESP32 в цілому відповідає стандартам з кібернетичної безпеки інтернету речей, а рівень його кібернетичної безпеки для побудови звичайної, побутової системи IoT слід визнати достатньо високим.

Бібл. 6.

УДК 004.9: 517

Поляков М.О., Ленюк А.А., Поляков О.М. **Аналіз результатів неповного факторного експерименту на прикладі даних про відносну швидкість старіння целюлозної ізоляції** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.88 – 97.

З метою збільшення кількості значень шуканої функції за обмеженими експериментальними даними запропоновано методику яка дозволяє створити рівномірну сітку опорних значень, заповнити її з необхідним кроком зміни змінних, екстраполювати дані на межі простору даних, де вплив даного аргументу на функцію дорівнює нулю, виділити внесок окремих аргументів у значення функції, синтезувати значення функції у нових вузлах опорної сітки значень. Наведено приклад застосування запропонованої методики для

формування простору значень відносної швидкості старіння целюлозної ізоляції обмоток силового трансформатора.

Бібл. 7, табл. 4.

УДК 631.365.22+621.317

Федотова М.О., Трушаков Д.В., Зубенко В.О., Березюк І.А., Заворуєв Р.С., Трипольський М.О. **Оцінювання зміни висоти дисперсного матеріалу в сушильній камері непрямим методом** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.98 – 106.

Сушіння за допомогою киплячого шару має ряд переваг. Але поряд з цим одним з головних чинників, що впливають на зміну кінцевої вологості дисперсного матеріалу під час сушіння, є його висота на каскадах решетах безпосередньо в камері сушіння, значення якої впливає на якість «киплячості». Виміряти зміну висоти під час процесу на каскадах фізично не можливо, тому у даній роботі пропонується, як варіант, через відомий зв'язок зміни висоти з кінцевою вологістю оцінювати дисперсію висоти через виміряне датчиком вологості кінцевого значення. Математичний зв'язок вхідних і вихідних сигналів сушарки буде покладено в основу синтезу системи спостереження.

Бібл. 6, іл.2.

УДК 004.942

Димо В.В., Гожий О.П., Калініна І.О. **Застосування згорткових нейронних мереж для виявлення пошкоджених будівель** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.107 – 114.

В роботі розглянуто застосування згорткових нейронних мереж для виявлення пошкоджених будівель на зображеннях. Дослідження спрямоване на покращення розуміння та практичне застосування згорткових мереж в задачах розпізнавання пошкоджених будівель на знімках. Для досягнення мети було визначено оптимальну архітектуру згорткової мережі, а саме U Net. Архітектура U Net застосовується в задачах семантичної сегментації, що є перевагою для розпізнавання пошкоджених будівель, оскільки вносить більшу точність на рівні пікселів, серед інших переваг – простота моделі та можливість використання меншої кількості даних для навчання. Для навчання мережі було створено унікальний набір даних з використанням наявних зображень у сервісі Google Earth міста Маріуполь у 2022 році. В роботі розглянуто різні конфігурації моделей, для розрахунку якості були використані такі метрики як загальна точність, IoU (Intersection over Union) окремо для двох класів будівель та середній показник IoU для всіх класів. Було визначено найкращу модель серед навчених з оптимальними параметрами для вирішення поставленої задачі.

Бібл. 8.

УДК 629.33:681.51

Мала Ю.А., Селівьорстова Т.В., Гуда А.І. **Використання технології Orange для інтелектуального аналізу даних в освітній галузі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.115 – 127.

У роботі розкрито визначення інтелектуального аналізу освітніх даних, показана актуальність і необхідність подальшого розвитку даного напрямку в сучасних умовах. В якості прикладу побудована схема аналізу освітніх даних з метою демонстрації ефективного використання інструменту візуального програмування Orange для дослідження освітніх даних з застосуванням методів Data Mining, що дозволяє фахівцям в освітній галузі проводити якісний аналіз з подальшим використанням отриманих результатів при розробці стратегій для забезпечення ефективного процесу навчання та розвитку освіти.

Бібл. 11.

УДК 004.021

Молодець Б.В., Булана Т.М. **Аналіз існуючих архітектур для розробки системи оцінки якості повітря** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.128 – 139.

Розглядається архітектури програмного забезпечення. Проведено опис існуючих архітектур, таких serverless архітектура, монолітна архітектура, мікросервісна архітектура та сервісно орієнтовна архітектура. Співставивши всі переваги та недоліки, для розробки інформаційної системи оцінки якості краще застосувати сервісно орієнтовну архітектуру.

Бібл. 10, табл. 1, іл. 3.

УДК 621.51

Монастирський Ю.А., Титюк В.К. **Дослідження методів підвищення енергоефективності виробництва стисненого повітря шахтними турбокомпресорами** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.140 – 147.

Стиснене повітря застосовується в різних галузях виробництва. У промисловості воно є другим за широтою використання енергоносієм (після електроенергії). Енергоефективність є найважливішою проблем для такого енергоємного процесу як виробництво стисненого повітря. Втрати, що виникають у системі повітропостачання, знижують її ефективність, що, своєю чергою, впливає на технологічний процес. В статті розглянуто методи підвищення ефективності роботи систем виробництва та розподілу стисненого повітря. Запропоновано методи та способи зниження питомої витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря на компресорних станціях, його втрат у системах виробництва та розподілу, а також підвищення продуктивності, економічності та надійності роботи компресорних станцій.

Бібл.5.

УДК 004.94

Дмитрієва І.С. **Комп'ютерне моделювання течії надзвукового газу в каналах змінного перерізу засобами OpenFOAM** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.148 – 155.

В роботі розглядається задача комп'ютерного моделювання течії надзвукового газу в каналах змінного перерізу. На сьогодні існує низка різних програмних комплексів, як пропрієтарних, так і з відкритим вихідним кодом. Одним з таких пакетів з відкритим вихідним кодом є OpenFOAM, який володіє широким спектром можливостей для

розв'язання будь яких завдань, від складних потоків рідини, включно з хімічними реакціями, турбулентністю і теплообміном, до акустики, механіки твердого тіла і електромагнетизму. Результати розрахунків показують, що реалізоване чисельне розв'язання в OpenFOAM за різними методами збігається з розв'язаннями між собою.

Бібл. 5, іл. 3

УДК 622.3:622.7

Кононов Д.О., Єрмократьєв В.О., Пелих І.В. **Розробка методів прогнозування технологічних показників роботи вібраційного грохота з еластичними ситами** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 3(152). – Дніпро, 2024. – С.156 – 167.

Грохочення є одною з основних операцій при переробки сипкого матеріалу.

У процесі експлуатації конструкції просіваючих поверхонь повинні мати високі показники ефективності процесу грохочення

Проведені експериментальні дослідження та отримані залежності ефективності грохочення від параметрів роботи вібраційного грохота з еластичним ситом.

Розроблено математичну та комп'ютерну моделі, які дозволять за допомогою отриманих експериментальних даних прогнозувати ефективності грохочення вібраційним грохотом. Розглянуто декілька моделей. Проведено порівняння результатів, отриманих регресійним методом та машинним навчанням.

Проведено порівняння результатів, отриманих регресійним методом та машинним навчанням.

Бібл. 5, іл. 8, табл. 3.

UDC 669.1.017:621.785

Adjamskiy S., Kononenko A., Podolskiy R. **Analysis of technological methods of minimizing residual internal stresses at SLM** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.3 – 12.

Additive manufacturing (hereinafter – en. AM) is a modern set of technologies that make it possible to quickly and qualitatively create products with a unique geometry that are impossible or difficult to produce by traditional production methods. This technology has a number of advantages for the manufacture of aerospace products, but, like all production technologies, this technology has a number of disadvantages and problems. Residual internal stresses are one of the features of metal materials produced by layer by layer fusion using SLM technology, but they can significantly affect mechanical properties and geometric parameters. Thus, the issue of reducing the influence of internal stresses requires a fundamental understanding of their influence on the geometric parameters and service characteristics of AM materials..

Bibl. 18, ill. 5.

UDK 629.7.036.54., 621.45.18.

Vasiliv S.S., Tokareva O.L. **Experimental technique for determining the burning rate of solid rocket fuel with electrically conductive reaction products in a constant pressure device** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.13 – 21.

The relevance of the topic of this work is determined by the need to create a scientific and information base of the process of burning solid rocket fuels, which are being developed for promising rocket engines. The purpose of the work is to develop a methodology for determining the burning rate of solid rocket fuel with minimal errors due to the excessive formation of electrically conductive reaction products in the experimental device. An experimental technique for measuring the burning rate of solid rocket fuel with electrically conductive reaction products in a constant pressure device (Crawford bomb) has been developed. The methodology was tested on samples of solid fuel compositions based on potassium nitrate.

Bibl. 7, ill. 5.

UDC 004.8

Nosov V.O., Ostrovska K.Yu. **Research on Amazon Lex V2 Natural Language Recognition System** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.22 – 29.

The technology of human speech recognition is fundamental for the development of artificial intelligence. Systems built on this technology have the ability to solve a fairly large number of tasks related to data analysis, information search, and user request fulfillment. Voice assistants and smart home systems (such as Amazon Alexa or Google Assistant) are popular and fairly common solutions for systems with NLP (Natural Language Processing). Research of this technology and analysis of its integration in cloud environments provides an opportunity to independently use its features as automated assistants, or for example, as part of an already existing intelligent system.

Bibl. 3., ill. 2.

UDC 004.051

Gorbatov V.S., Zhurba A.O. **Influence of existing rule processing optimizations on the performance of the snort 3 network intrusion detection system** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.30 – 43.

Study investigates the architecture of the Snort 3 system, as well as the main optimization algorithms used for rule processing (FastPattern, grouping by ports and grouping by protocols) and their impact on the performance of the system in various scenarios. The performance of the system was measured by the processing time of a recording of network traffic, which contains both normal packets and malicious ones, on two different configurations.

Bible 13, fig. 1, table 4.

UDC: 004.896 : 621.745

Ziborov I.K. **Information technologies of management decisions supporting in the rolled metal manufacturing** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.44 – 56.

The structure and functions of information technology support for management decisions in rolled manufacturing are described. In the management of such production, an important role is devoted to solving the problems of conditional multidimensional multicriteria optimization. To solve these problems, it is proposed to use a hybrid evolutionary method based on a swarm of particles and modeling of the human immune system.

The proposed information technology allows changing the production task depending on the availability of materials and changing of their market value. The practical value of solving such a problem lies in keeping the cost of steel at a minimum level during fluctuations in the prices of materials, a significant change in the properties of cast iron, or when replacing one cooler with another.

Bible 14, Ill. 2

UDC 612.8:004.8

Inkin O.A., Pohorielov O.V. **EEG modeling using deep neural networks** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.57 – 68.

The use of some models of neural networks for modeling the electroencephalographic signal was analyzed. To obtain and process EEG numerical values, the possibility and optimality of using the Julia language and the Flux package developed on its basis were evaluated. The given calculated loss indicators made it possible to determine the most optimal approach for modeling both epileptic and non epileptic types of EEG.

Bible 7, ill. 11, tab. 1

UDC 004.8

Kupin A.I., Kosei M.P. **Analysis Of Swarm Intelligence Algorithms** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.69 – 80.

This paper offers an in depth review of swarm intelligence algorithms, emphasizing their growing importance and applicability across diverse fields like military, agriculture, and environmental monitoring. It discusses the ongoing research and expanding application areas, advocating for the integration of multidisciplinary approaches to address complex problems with swarm intelligence. The paper aims to provide future research directions, including detailed comparisons of swarm intelligence algorithms and their integration with other AI methods, underlining the technology's potential in solving real world challenges.

Bible 9, ill. 1, tab. 1.

UDC 044.056

Mazurenko V.B. **Assessment of ESP32 microcontroller compliance with international standards of cyber security for Internet of Things** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.81 – 87.

The protection of the ESP32 microcontroller from cyber threats is studied by analyzing the compliance of the platform (microcontroller, OS, API, manufacturer support) with the requirements of international cybersecurity standards. In particular, the following topics are covered: means to manage reports of vulnerabilities, keeping software updated, securely storing sensitive security parameters, secure communication, and protecting personal data. Generally, it is concluded that the ESP32 microcontroller meets the cybersecurity standards of the Internet of Things, and its cybersecurity level should be considered as a quite high to produce a regular, household IoT system.

Bible. 6.

UDC 004.942:517

Polyakov M.O., Lenok A.A., Polyakov O.M. **Analysis of the results of an incomplete factorial experiment using data on the relative aging rate of cellulose insulation as an example** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.88 – 97.

In order to increase the number of values of the desired function based on limited experimental data, a technique is proposed that allows you to create a uniform grid of reference values, fill it with the necessary step of changing variables, extrapolate data to the boundaries of the data space where the influence of a given argument on the function is zero, highlight the contribution of individual arguments in function values, synthesize function values in new nodes of the reference grid of values. An example of the application of the proposed methodology for forming the space of values of the relative aging rate of the cellulose insulation of the windings of a power transformer is given.

Bibl. 7, tab. 4.

UDC 631.365.22 + 621.317

Fedotova M., Trushakov D., Zubenko V., Berezyuk I., Zavoruyev R., Trypolskyi M. **Evaluation of the change in the height of the dispersed material in the drying chamber by an indirect method** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.98 – 106.

Fluidized bed drying has several advantages. But along with this, one of the main factors affecting the change in the final moisture content of the dispersed material during

drying is its height on the sieve cascades directly in the drying chamber, the value of which affects the quality of "boiling". It is physically impossible to measure the height change during the process on the cascades, therefore, this paper proposes, as an option, due to the known relationship between the height change and the final humidity, to estimate the height dispersion through the final value measured by the humidity sensor. The mathematical connection of input and output signals of the dryer will be the basis of the synthesis of the monitoring system.

Bibl. 6, ill. 2.

UDC 004.942

Dymo V.V., Gozhy O.P., Kalinina I.O. **Application of convolutional neural networks to detect damaged buildings** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.107 – 114.

The paper considers the use of convolutional neural networks for detecting damaged buildings in images. The research is aimed at improving the understanding and practical application of convolutional networks in the tasks of recognizing damaged buildings in images. To achieve the goal, the optimal convolutional network architecture, namely U Net, was determined. The U Net architecture is used in semantic segmentation tasks, which is an advantage for damaged building recognition, as it introduces higher accuracy at the pixel level, among other advantages is the simplicity of the model and the ability to use less data for training. To train the network, a unique dataset was created using the available Google Earth images of the city of Mariupol in 2022. Different configurations of models were considered in the work, such metrics as overall accuracy, IoU (Intersection over Union) separately for two classes of buildings and the average IoU for all classes were used to calculate the quality. The best model among those trained with the optimal parameters for solving the task was determined.

Bibl. 8.

UDC 629.33:681.51

Mala Yu.A., Selivorstova T.V., Guda A.I. **The use of Orange technology for intellectual data analysis in the educational field** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.115 – 127.

The work reveals the definition of intellectual analysis of educational data, shows the relevance and necessity of further development of this direction in modern conditions. As an example, a scheme for the analysis of educational data was built in order to demonstrate the effective use of the Orange visual programming tool for the study of educational data using Data Mining methods, which allows specialists in the educational field to conduct qualitative analysis with the subsequent use of the obtained results in the development of strategies to ensure an effective learning process and development of education.

Bible 11.

UDC 004.021

Molodets B.V., Bulana T.M. **Analysis of existing architectures for the development of an Information System of Air Quality Assessment** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.128 – 139.

Software architectures are considered. The existing architectures are described, such as serverless architecture, monolithic architecture, microservice architecture, and service oriented architecture. After comparing all the pros and cons, it is better to use the service oriented architecture to develop a quality assessment information system.

Bible 10, tab 1, ill 3.

UDC 621.51

Monastyrskiy Yu.A., Tytyuk V.K. **Research of methods of increasing the energy efficiency of compressed air production by mine turbocompressors** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.140 – 147.

Compressed air is used in various industries. In industry, it is the second most widely used energy carrier (after electricity). Energy efficiency is the most important issue for such an energy intensive process as the production of compressed air. Losses occurring in the air supply system reduce its efficiency, which, in turn, affects the technological process. The article discusses methods of increasing the efficiency of compressed air production and distribution systems. Methods and methods of reducing the specific consumption of electricity for the production of compressed air at compressor stations, its losses in the production and distribution systems, as well as increasing the productivity, efficiency and reliability of the operation of compressor stations are proposed.

Bibl.5.

UDC 004.94

Dmytriieva I. S. **Computer modeling of supersonic gas flow in variable cross section channels using OpenFOAM** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.148 – 155.

The paper deals with the problem of computer modeling of supersonic gas flow in variable cross section channels. Today, there are a number of different software packages, both proprietary and open source. One of these open source packages is OpenFOAM, which has a wide range of capabilities for solving any problem, from complex fluid flows, including chemical reactions, turbulence, and heat transfer, to acoustics, solid mechanics, and electromagnetism. The calculation results show that the numerical solutions implemented in OpenFOAM using different methods coincide with each other.

Ref. 5, illus. 3.

UDC 622.3:622.7

Kononov D.O., Yermokratiev V., Pelikh I.V. **Development of methods for forecasting technological performance indicators of a vibrating screen with elastic sieves** // System technologies. N 3(152) Dnipro, 2024. P.156– 167.

Screening is one of the main operations in the processing of loose material.

In the process of operation, the structures of sieving surfaces must have high indicators of the efficiency of the screening process

Experimental studies were carried out and dependences of the screening efficiency on the operating parameters of the vibrating screen with an elastic sieve were obtained.

Mathematical and computer models have been developed, which will make it possible to predict the effectiveness of screening with a vibrating screen using the obtained experimental data. Several models are considered. The results obtained by the regression method and machine learning were compared.

Gaussian process regression models give the smallest error. In particular, regression with an exponential kernel function shows the best result.

Bible 5, fig. 8, tab. 3.

Системні технології

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Випуск 3 (152)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 01.04.2024. Підписано до друку 29.04.2024.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 13,0. Обл.–видавн. арк. – 11,375.

Тираж 300 прим. Замовл. – 03/24

Український державний університет науки і технологій,
ІНІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік

Редакційна колегія

Селівьорстова Тетяна Віталіївна
(головний редактор)

доцент, кандидат технічних наук

Алпатов Анатолій Петрович

Член-кореспондент НАН України,
професор, доктор технічних наук

Архипов Олександр Євгенійович
професор, доктор технічних наук

Бабічев Сергій Анатолійович

доцент, доктор технічних наук

Білозьоров Василь Євгенович

професор,

доктор фізико-математичних наук

Гече Федір Елемирович

професор, доктор технічних наук

Гуда Антон Ігорович

(заст. головного редактора)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Вікторія Володимирівна

(вчений секретар)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Володимир Володимирович

професор, доктор технічних наук

Гожий Олександр Петрович

професор, доктор технічних наук

Єрьомін Олександр Олегович

професор, доктор технічних наук

Кіріченко Людмила Олегівна

професор, доктор технічних наук

Світличний Дмитро Святозарович

професор, доктор технічних наук

Скалозуб Владислав Васильович

професор, доктор технічних наук

Хандецький Володимир Сергійович

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет

України «Київський політехнічний інститут»
імені Ігоря Сікорського», Україна

Jan Evangelista Purkyně University
in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне,
Усті над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара, Україна

Ужгородський національний університет,
Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет
імені П.Могили, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет
радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія
ім. С. Сташіца, Польща

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» Україна

Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара, Україна