

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-4(26)-58-66

УДК 004.896

**Ігор Масстенко<sup>1</sup>, Сергій Сапон<sup>2</sup>, Наталія Стельмах<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>магістр кафедри виробництва приладів  
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [ihormas@gmail.com](mailto:ihormas@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2953-4589>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [s.sapon@gmail.com](mailto:s.sapon@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. ResearcherID: [G-7764-2014](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри виробництва приладів  
Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [n.stelmakh@kpi.ua](mailto:n.stelmakh@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1876-2794>. ResearcherID: [K-1827-2017](https://orcid.org/0000-0003-1876-2794)

**MACHINE VISION ЯК НЕВІДЄМНА ЧАСТИНА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**

*Розвиток сучасних технологій в умовах Industry 4.0 стимулює широке впровадження інтелектуальних кіберфізичних технологічних систем. Технологія Machine Vision є невід'ємним компонентом таких систем. В роботі проаналізовано галузі застосування машинного зору. Особливу увагу зосереджено на застосуванні Machine Vision в інтелектуальних технологічних системах для контролю якості продукції. Проказано доречність і перспективність використання математичного апарату штучних нейронних мереж для розробки інтелектуальної технологічної системи моніторингу геометричного стану виробів. Стаття є оглядовою.*

**Ключові слова:** Machine Vision; машинний зір; інтелектуальна технологічна система; контроль якості; нейронні мережі.

Рис.: 1. Бібл.: 19.

**Актуальність теми дослідження.** Сучасне технологічне обладнання різного функціонального призначення повинно повною мірою відповідати вимогам цифрових виробництв і мати здатність швидко інтегруватись у структуру інтелектуальних smart-підприємств, які поступово перетворюються в інтелектуальні кіберфізичні технологічні системи. Machine Vision (MV) – необхідний компонент подібних інтелектуальних кіберфізичних технологічних систем та перспективний спосіб автоматизації, що дозволяє виконувати операції захвату, переміщення різних об'єктів, зокрема деталей [1], здійснювати контроль якості [2; 3], сприяти підвищенню техніки безпеки [4] тощо. Крім того, машинний зір знаходить все більше застосування в обробних верстатах модульного типу [9].

Машинний зір – одна з галузей, що найшвидше розвиваються у сфері інтелектуальних технологій. За прогнозами, у США загальний ринок машинного зору в промисловості до 2023 року досягне 12,29 млрд дол. США [5].

Наведені дані свідчать про високу потребу великих компаній у здійсненні максимальної автоматизації технологічних процесів, зокрема операцій контролю якості продукції [6]. Зростання попиту на системи машинного зору зумовлено четвертою промисловою революцією Industry 4.0 та розвитком таких технологій, як штучний інтелект та Інтернет речей.

Стрімке зростання попиту на технології Machine Vision тісно пов'язане з розвитком інформаційних технологій. Технологія Machine Vision виділяється розпізнаванням образів об'єктів за допомогою зображень з подальшим представленням їх у вигляді двовірних проекцій, які в свою чергу обробляються за допомогою математичних перетворень у текстову інформацію.

Щоразу коли йдеться про масове виробництво, виникають питання забезпечення якості, ефективності та мінімізації витрат часу. Щоб вирішити ці питання промисловість дедалі частіше вдається до сучасних засобів автоматизації, а саме неперервної роботи автоматизованих ліній виробництва з проміжним контролем якості. Останнім часом завдяки ефективному поєднанню інформаційних технологій та сучасних цифрових камер, обробка зображень стала доступнішою. Якість та можливості програмного забезпечення для обробки зображень стали більш високими, надійними, забезпечуючи

при цьому кращий вихідний контроль якості продукції [7]. Тому застосування технологій Machine Vision в інтелектуальних технологічних системах для контролю якості продукції є доречним і актуальним.

**Постановка проблеми.** Нині машинний зір широко використовується в медицині, автомобільній промисловості, робототехніці, військовій галузі, біотехнологіях, промисловому виробництві. Це пов'язано з тим, що в цих галузях є чітко сформульовані завдання, які можна успішно вирішити із застосуванням технології Machine Vision [8].

Застосування класичних методів контролю якості продукції пов'язане з додатковими витратами людської праці та великою мірою залежить від емоційного та фізіологічного стану працівників-контролерів. Важливим аспектом також є максимально швидкий та ефективний аналіз якості виробів безпосередньо на етапі технологічного процесу з високою точністю визначення дефектів продукції, що випускається. Тому застосування сучасних технологій комп'ютерного зору набуває все більшої актуальності в інтелектуальних технологічних системах для контролю якості продукції та стану технологічних процесів і засобів виробництва (верстат, інструмент, технологічне оснащення тощо).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наш час розробці методів та алгоритмів обробки зображень і машинного зору присвячено достатньо вітчизняних та закордонних публікацій у різних галузях механічної інженерії. Так, у роботі [10] автори детально розглядають методи розв'язання задач комп'ютерного бачення, наводять їхні переваги та недоліки. Відзначено прерогативу використання гаусівських перетворень для спрощення обчислень алгоритмами, базуючись на інтерпретації об'єктів. Автори розглядають альтернативні застосування машинного бачення при розв'язанні задач в системах в умовах обмежених ресурсів, а саме безпілотних літальних апаратах, мобільних пристроях, роботизованих та супутникових системах.

Широкі можливості застосування нейронних мереж, через їхню гнучкість, та можливість прилаштуватись практично в будь-якій галузі, зокрема і в машинному зорі показано в роботі [11]. Розглянуто можливості комп'ютерного зору навчатись під запрограмовані цілі. Перевагою, наведеною в цій роботі, є те, що створенні системи є гнучкими і дозволяють адаптуватись під схожі завдання, враховуючи мінливість умов і змінних факторів.

Автор Kazemian та інші розробили систему комп'ютерного бачення для вихідного контролю якості екструзії адаптивного виробництва в режимі реального часу [12]. Нейронна мережа в цій роботі використовується для створення системи контролю із зворотнім зв'язком, яка визначає швидкість екструзії, і за необхідності керує подачею. У цій системі камери розташовані перпендикулярно до об'єкта контролю, і система сприймає шар матеріалу як пряму, математичними перетвореннями інтерпретує її як динамічну ширину, яка використовується для аналізу процесу екструзії [12].

Дослідники Mori і Vogto у своїй роботі [13] використали високоточне обладнання для розробки системи комп'ютерного бачення, спрямованої на субпіксельну перевірку якості зубчастих коліс. Камери з телецентричним об'єктивом мають похибку калібрування лише 0,06 пікселя, що, у свою чергу, дало можливість забезпечити точність вимірювання до  $\pm 0,02$  мм. Для здійснення контролю, вони розробили три одночасно працюючих алгоритми перевірки внутрішнього, зовнішнього діаметру та кількості зубів.

У роботі [14] авторами Sahoo S.K., Sharma M.M., Choudhury, B.V. запропонована система динамічного контролю скляних пляшок. Спершу зображення розглядалось інтелектуальною камерою високої роздільної здатності. Потім застосувались методи обробки зображень, щоб зменшити зашумленість і покращити якість здійснених зображень. За допомогою методів сегментації було відокремлено фон від вихідного зображення та надано зображення у векторній формі для визначення відхилень. Штучна нейронна мережа, навчена за допомогою алгоритму зворотного поширення похибки, була використана для

аналізу отриманої графіки на вилучення дефектних ознак. Автори цієї роботи провели порівняння між різними алгоритмами класифікації за допомогою трьох методів виділення ознак з реалізацією датчика та без нього в системі перевірки машинного зору.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав фактично необмежене використання технологій Machine Vision. Важливим елементом технологій Machine Vision в інтелектуальних технологічних системах має бути можливість оперативного і максимально точного розпізнавання заданих типів дефектів із подальшим їх відокремленням та утилізацією, що значно підвищить продуктивність процесів контролю якості продукції.

**Метою статті** є огляд застосування технологій машинного зору в різних сферах промисловості з метою порівняння та аналізу можливостей удосконалення методу на базі математичного апарату нейронних мереж для підвищення ефективності контролю якості продукції за заданими параметрами в інтелектуальних технологічних системах.

**Виклад основного матеріалу.** Machine Vision є трирівневою системою, що складається з: системи збирання відеоінформації, системи аналізу, опису та розпізнавання та штучного інтелекту [15].

У системі збирання відеоінформації інформація про зображення, за допомогою оптико-електронних перетворювачів та відеосенсорів, подається у формі електричних сигналів. Отримана в такий спосіб інформація обробляється ієрархічно. Спочатку зображення обробляється відеопроцесорами. Тут ключовий параметр – контур зображення, який задається координатами безлічі його точок. Оптична система проектує зображення на чутливий елемент, при цьому попередньо визначається розмір робочої зони, що охоплюється сенсором.

Система аналізу, опису та розпізнавання включає в себе високопродуктивний обчислювальний вузол і складне програмно-алгоритмічне забезпечення для обробки отриманого зображення.

Штучний інтелект здебільшого містить у собі спеціалізований обчислювальний блок та програмну нейронну мережу.

Основними компонентами системи машинного зору є [16]:

- елементи висвітлення;
- оптика;
- сенсор захоплення оптичних даних (камера машинного зору);
- система обробки оптичних даних та обчислювальний вузол;
- система передачі даних та засоби зв'язку.

Компоненти системи машинного зору забезпечують автоматизацію промислових процесів в інтелектуальних технологічних системах наступним чином (рис. 1). Робоча зона, де розміщуються деталі, освітлюється лампами. Над робочою зоною розташовується відеокамера, від якої по кабелю або бездротовому зв'язку інформація подається в основний блок системи Machine Vision. З основного блока інформація (в обробленій формі) подається на пристрій системи автоматизації, що управляється. Система автоматизації у вигляді робота або

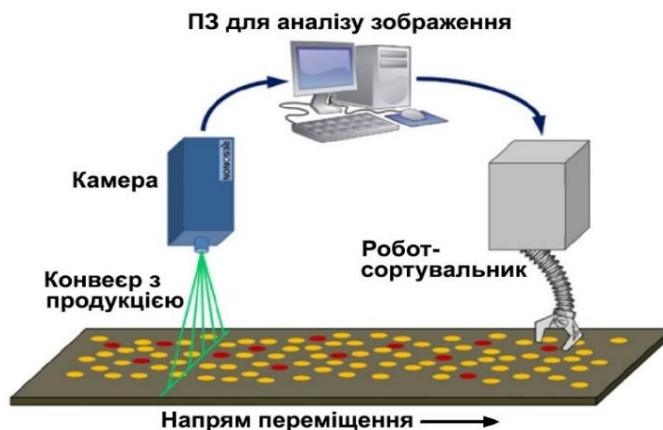


Рис. 1. Схема роботи системи машинного зору [15]

актуаторів здійснює сортування або контроль якості деталей, їх упорядковане укладання в тару в чіткій відповідності з інформацією, що надходить від програмного забезпечення системи Machine Vision.

Інтенсивне впровадження і розвиток Industry 4.0 висуває на передові ролі робототехніку, штучний інтелект, машинний зір, великі хмарні дані обчислень та машинне навчання. Це створило масштабні можливості для підвищення якості виробів, зменшення забруднень, автоматизації процесів, підвищення стабільності виробничих циклів, зниження експлуатаційних витрат на залученні людського фактору в операціях технологічного процесу виготовлення. Індустрія 4.0 надає можливість створювати інтелектуальні кіберфізичні технологічні системи, так звані «розумні заводи», які базуються на використанні різноманітних датчиків для контролю автоматизованих процесів. Одна з основних ефективних технологій, які цьому сприяють, є саме Machine Vision, що є невід'ємною складовою автоматизованого виробництва. Найбільшого поширення ця технологія отримала для автоматизованого контролю якості виробів. Технологія Machine Vision дозволяє виключити такі людські фактори, як втома, неуважність, обмежена здатність швидко обробляти велику кількість інформації та інші. Перевагою машинного зору є безперервний контроль заданих параметрів у режимі 24/7, з можливістю обробки інформації, зі швидкістю в 20 000 к/с, у той же час коли людські можливості обмежуються до 24 к/с.

Як було зазначено вище, методи комп'ютерного зору для свого функціонування передбачають використання датчиків, камер та обчислювальні потужності, часто хмарні, що, в свою чергу, робить виробничі лінії більш оптимізованими, економить площу виробничих приміщень, забезпечує підвищення промислової безпеки за рахунок виключення багатьох компонентів. Також ця технологія ефективна для зниження витрат праці. Крім цього, вона також забезпечує загальний рівень якості продукції, детальніше відсіюючи не якісні або браковані вироби [17].

Технологія працює на основі алгоритмів, із запрограмованими дефектами, які виявляються комп'ютерною програмою під час аналізу отриманих зображень із виробничої лінії. Отримані двовимірні значення аналізуються програмним забезпеченням, на базі математичного апарату гаусівських перетворень. Відсіюється непотрібний шум та опорні елементи конструкцій виробничих ліній. Отримується фінальний результат цифрової обробки і порівнюється із запрограмованою базою наявних дефектів для виявлення стану контрольованого об'єкта. У разі знаходження відхилень, виріб направляється в один із двох потоків, повторна обробка або переробка у відходи [18].

Для прикладу важливості застосування технологій Machine Vision приведемо дослідження Світового фонду безпеки. За їх даними, майже 75 % аварій літаків при заході на посадку та посадці відбуваються в аеропортах, де недоступні або відсутні прилади точного заходу на посадку, в умовах поганої видимості. У зв'язку з цим одним із важливих напрямів удосконалення бортової авіоніки є розробка апаратно-програмних комплексів покращеного бачення (Enhanced Vision Systems, EVS). Як джерела інформації в таких системах можуть використовуватися телевізійні відеодатчики, інфрачервоні (ІЧ) датчики різних діапазонів, міліметрові радари (МР), лазерні локатори (ЛЛ), бази даних рельєфу місцевості вздовж маршрутів польоту, бази даних аеропортів та об'єктів злітно-посадкової смуги (ВПП), навігаційні параметри та ряд інших [19].

**Аналіз систем та можливостей методології комп'ютерного бачення.** Описані вище переваги використання Machine Vision, більш детально розглянемо на прикладі вирішення типових задач [13]:

1) Розпізнавання – класичне завдання, яке полягає в обробці зображення і виявленні деяких характеристик об'єкту. Це завдання легко вирішується, але машинне бачення і нині не спроможне протистояти людським якостям, у ситуації з об'єктами, які виходять за межі запрограмованих.

2) Ідентифікація – вказання на особливий екземпляр об'єкта. Наприклад, ідентифікація людини, відбитка пальців чи номерів автомобіля. В інтелектуальних технологічних системах – зчитування QR-кодів, якими позначається інструмент або технологічна документація.

3) Виявлення – отримані результати перевіряються на наявність певної умови. Наприклад, в медицині, знаходження можливих пошкоджених клітин чи тканин в знімках з мікроскопу. Іноді використовується для порівняння ділянок на аналізованих зображеннях, для виявлення не значних відхилень.

4) Оцінка – визначення положення або орієнтації певного об'єкта відносно камери. Прикладом застосування цієї техніки може бути сприяння руці робота у вийманні об'єктів зі стрічки конвеєра на лінії складання виробів.

5) Переміщення – є декілька завдань, пов'язаних з оцінкою руху, у яких послідовність зображень обробляються для знаходження оцінки швидкості кожної точки зображення або 3D сцени. Прикладами таких завдань є: спостереження, тобто слідування за переміщеннями об'єкта.

6) Відновлення зображень – завдання відновлення зображень це видалення шуму (шум датчика, розмитість об'єкта, що рухається тощо). Найбільш простим підходом до вирішення цього завдання є різні типи фільтрів, наприклад, такі як нижніх або середніх частот. Більш складні методи використовують уявлення про те, як мають виглядати ті чи інші ділянки зображення, і основі цього здійснюється їх зміна.

Machine Vision не обмежується основними методами для вирішення завдань. Воно є багатогранним. Кожне із завдань можливо розглядати по різному, так званими генетичними алгоритмами, але все ж основними підходами є:

- контурний аналіз – це крива (набір кривих), які відповідають кінцевим точкам об'єкта на зображенні, тому при цьому методі аналізується не повноцінне зображення об'єкта, а лише отриманий контур, що надає алгоритму швидкодію, за рахунок першопочаткового обмеження;

- пошук по шаблону – найбільш поширений метод в комп'ютерному баченні, призначений для виявлення певних, запрограмованих, особливостей об'єкту на згенерованому зображенні;

- пошук поза шаблонами – полягає в розпізнаванні відхилень від еталонного, а саме знаходження дефектів, сколів, тріщин, пігментації, відхилень від заданих геометричних параметрів;

- поєднання даних – призначений для отримання ефективних результатів, обробляючи різні типи сигналів, отриманих із камер та датчиків.

Для комплексного вирішення завдань використовують багатокамерні системи, які ще називають масивами. Камери використовуються для відстеження переміщення окремих людей усередині приміщень або в місцях з обмеженою видимістю (склади в морських портах, заводські території тощо). Також їх застосовують для управління дорожнім рухом в інтелектуальних транспортних системах. Основними сферами використання цієї технології є:

- Автоматизація виробництва;
- Відеоспостереження з БПЛА;
- 3D-фільми;
- Інтерактивні ігри AR/VR;
- Розпізнавання осіб, переміщень, ідентифікації та ін.

На сьогодні при вирішенні завдань в інтелектуальних кіберфізичних технологічних системах не обійтись без використання спеціалізованого програмного забезпечення. Основними з них є перелічені нижче [12].

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) – бібліотека алгоритмів комп'ютерного зору, обробки зображень та чисельних алгоритмів загального призначення. Реалізована мовою C/C++, також розробляється для Python, Java, Ruby, Matlab, Lua та інших мов.

PCL (Point Cloud Library) – великий масштабний відкритий проект для обробки 2D/3D-зображень та хмар точок. Платформа PCL містить безліч алгоритмів, включаючи фільтрацію, оцінку характеристик, реконструкцію поверхні, реєстрацію, підбір моделі та сегментацію.

ROS (Robot Operating System) – платформа розробки програмного забезпечення для роботів. Вона є набором інструментів, бібліотек та застосунків, які спрощують розробки складних та ефективних програм для управління багатьма типами роботів.

MATLAB – високорівнева мова та інтерактивне середовище для програмування, чисельних розрахунків та візуалізації результатів. За допомогою MATLAB можна аналізувати дані, розробляти алгоритми, створювати моделі та програми.

CUDA (Compute Unified Device Architecture) – програмно-апаратна архітектура паралельних обчислень, яка дозволяє суттєво збільшити обчислювальну продуктивність завдяки використанню графічних процесорів фірми Nvidia.

SimpleCV – система для створення прикладного комп'ютерного зору. Надає доступ до великої кількості інструментів комп'ютерного зору, схожих з OpenCV, Pygame та ін. Не вимагає глибокого завантаження в тему. Є придатною для швидкого прототипування.

**Висновки до статті.** Стрімке поширення технології машинного зору охоплює практично всі сфери промислового виробництва. Впровадження технології Machine Vision в інтелектуальних технологічних системах типу smart – підприємство надає високі результати там, де впроваджено дану технологію. Це, у свою чергу, сприяє впровадженню ідей четвертої промислової революції Industry 4.0 та зменшує участь людей в однотипних, рутинних завданнях на виробництві.

У перспективі подальших досліджень є розробка системи комп'ютерного бачення, що забезпечить моніторинг фактичного геометричного стану виробу (заготовки) та порівняння його з передбаченим (навченим), використовуючи математичний апарат нейронних мереж.

### Список використаних джерел

1. Domel A. Autonomous pick and place operations in industrial production / Domel A., Kriegel S., Brucker M., Suppa M. // 12th Intern. Conf. on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2015). – 2015. October. – KINTEX, Goyang city, Korea. – 356 p.
2. Zhong Y. Analysis and experiment of workpiece quality detection based on industrial robot / Zhong Y., Fengyu X., Yue W. // 23rd Intern. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). – 2016. November. – Pp. 1–6.
3. Zuxiang W. Design of safety capacitors quality inspection robot based on machine vision/ Zuxiang W., Lei Z., Junpeng F. // 1st Intern. Conf. on Electronics Instrumentation Information Systems (EIS). – 2017. June. – Pp. 1–4.
4. Stankov S. An application of deep neural networks in industrial robotics for detection of humans/ Stankov S., Ivanov S., Todorov T. // IEEE XXVIII Intern. Sci. Conf. Electronics (ET). – 2019. September. – Pp. 1–3.
5. Industrial Machine Vision Market by Component (Hardware (Camera, Frame Grabber, Optics, Processor), and Software (Deep Learning, and Application Specific)), Product (PC-based, and Smart Camerabased), Application, End-User [Electronic resource]. – Global Forecast to 2023 – Access mode: [https://www.researchandmarkets.com/research/k6lrbk/global\\_industrial?w=5](https://www.researchandmarkets.com/research/k6lrbk/global_industrial?w=5).
6. Guo Y. Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition / [Guo Y. et al.] // International journal of computer vision. – 2013. – Vol. 105, no. 1. – Pp. 63-86.
7. Johnson A. E. Spin-images: a representation for 3-D surface matching : PhD Thesis / Andrew Edie Johnson; Robotics Institute, Carnegie Mellon University. – Pittsburgh, Pennsylvania, 1997. – 308 p.

8. Дятлов Е. И. Машинное зрение (аналитический обзор) / Е. И. Дятлов // Математичні машини і системи. – 2013. – № 2. – С. 32-40.
9. Применение машинного зрения в задачах автоматического позиционирования инструмента модульного оборудования / Афанасьев М. Я., Федосов Ю. В., Крылова А. А., Шорохов С. А. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – № 9(63). – С. 830-839.
10. Сучасні підходи до розв'язання задач комп'ютерного зору / Р. М. Тимчишин, О. Є. Волков, О. Ю. Господарчук, Ю. П. Богачук // Управляющие системы и машины. – 2018. – № 6. – С. 46-73.
11. Lisovsky A. L. Application of neural network technologies for management development of systems / A. L. Lisovsky // Strategic decisions and risk management. –2020. – Vol. 11(4). – Pp.378-389.
12. Kazemian Ali. (2019) Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction / Kazemian, Ali, et al // Automation in Construction. – 2019. – № 101. – Pp. 92-98.
13. Moru Desmond K., Borro D. A machine vision algorithm for quality control inspection of gears / Moru Desmond K., and Diego Borro. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – № 1-2 (106). – Pp. 105-120.
14. Sahoo S. K. A Dynamic Bottle Inspection Structure / Sahoo S. K., Sharma M. M., Choudhury B.B. // Computational Intelligence in Data Mining / Eds. Behera, H.S., Nayak, J., Naik, B., Abraham, A. – Singapore, 2019. – Vol. 711. – Pp. 873–884.
15. Машинное зрение и технологии сенсорики. – М. : ГБУ «АИР», 2020. – 90 с.
16. Machine Vision [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.cognex.com/en-ua/products/machine-vision>.
17. Mastenko I. V. Generative design of a frame type construction / I. V. Mastenko, N. V. Stelmakh. // KPI Science News. – 2021. – № 2. – Pp. 81-89. – DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.2.236954>.
18. Румбешта В. О. Прийняття рішень в автоматизованій системі технологічної підготовки приладобудівного виробництва на базі дискретної оптимізації / В. О. Румбешта, Н. В. Стельмах // Науковий вісник Кремен. ун-ту економіки, інформ. технолог. і управ. Нові технології. – 2009. – № 1(23). – С. 189–191.
19. Масненко, И. В. Влияние плотности заполнения 3-D печатных моделей на их прочностные характеристики / И. В. Масненко, Н. В. Стельмах // Материалы МНТК Новые направления развития приборостроения. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 138.

### References

1. Domel, A., Kriegel, S., Brucker, M., & Suppa, M. (2015). Autonomous pick and place operations in industrial production. *12th Intern. Conf. on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2015)*. KINTEX, Goyang city.
2. Zhong, Y., Fengyu, X., & Yue, W. (2016). Analysis and experiment of workpiece quality detection based on industrial robot. *23rd Intern. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)* (pp. 1–6).
3. Zuxiang, W., Lei, Z., & Junpeng, F. (2017). Design of safety capacitors quality inspection robot based on machine vision. *1st Intern. Conf. on Electronics Instrumentation Information Systems (EIS)* (pp. 1-4).
4. Stankov S., Ivanov S., & Todorov T. (2019). An application of deep neural networks in industrial robotics for detection of humans. *IEEE XXVIII Intern. Sci. Conf. Electronics (ET)* (pp. 1–3).
5. Industrial Machine Vision Market by Component (Hardware (Camera, Frame Grabber, Optics, Processor), and Software (Deep Learning, and Application Specific)), Product (PC-based, and Smart Camerabased), Application, End-User. Global Forecast to 2023. [https://www.researchandmarkets.com/research/k6lrbk/global\\_industrial?w=5](https://www.researchandmarkets.com/research/k6lrbk/global_industrial?w=5).
6. Guo, Y., Sohel, F., Bennamoun, M., Lu, M., & Wan, J. (2013). Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition. *International journal of computer vision*, 105(1), 63-86.
7. Johnson, A.E. (1997). *Spin-images: a representation for 3-D surface matching* [PhD Thesis; Carnegie Mellon University].
8. Diatlov, E.I. (2013). Mashynnoe zrenie (analiticheskii obzor) [Machine vision (analytical review)]. *Matematychni mashyny i systemy – Mathematical Machines and Systems*, (2), 32-40.



9. Afanasev, M.Ia., Fedosov, Yu.V., Krylova, A.A., & Shorokhov, S.A. (2020). Primenenie mashynnoho zreniia v zadachakh avtomaticheskogo pozitsionirovaniia instrumenta modulnoho oborudovaniia [Application of machine vision in the tasks of automatic positioning of a tool of modular equipment]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie – News of higher educational institutions. Instrumentation*, (9(63)), 830-839.
10. Tymchyshyn, R.M., Volkov, O.Ie., Hospodarchuk, O.Iu., Bohachuk, Yu.P. (2018). Suchasni pidkhody do rozviazannia zadach kompiuternoho zoru [Modern approaches to solving problems of computer vision]. *Upravliaiushchie sistemy i mashyny – Control systems and machines*, (6), 46-73.
11. Lisovsky, A.L. (2020). Application of neural network technologies for management development of systems. *Strategic decisions and risk management*, 11(4). 378-389.
12. Kazemian, A., Yuan, X., Davtalab, O., & Khoshnevis, B. (2019). Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction. *Automation in Construction*, 101, 92-98.
13. Moru, Desmond K., & Borro, D. (2020). A machine vision algorithm for quality control inspection of gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(1-2), 105-12.
14. Sahoo, S.K., Sharma, M.M., & Choudhury, B.B. (2019). A Dynamic Bottle Inspection Structure. In H.S. Behera, J. Nayak, B. Naik, A. Abraham (Eds.), *Computational Intelligence in Data Mining* (Vol. 711, pp. 873–884).
15. HBU «APR» (2020). *Mashynnoe zrenie i tekhnologii sensoriki [Machine vision and sensor technology]*.
16. Machine Vision. <https://www.cognex.com/en-ua/products/machine-vision>.
17. Mastenko, I.V., & Stelmakh, N.V. (2021). Generative design of a frame type construction. *KPI Science News*, (2), 81-89. <https://doi.org/10.20535/kpiscn.2021.2.236954>.
18. Rumbeshta, V. O., & Stelmakh, N.V. (2009). Pryiniattia rishen v avtomatyzovani systemi tekhnolohich-noi pidhotovky pryladobudivnoho vyrobnytstva na bazi dyskretnoi optymizatsii [Decision making in the automated system of technological preparation of instrument-making production on the basis of discrete optimization]. *Naukovyi visnyk Kremen. un-tu ekonomiky, inform. tekhnol. i uprav. Novi tekhnolohii – Scientific Bulletin of the Kremenchug University of Economics, Information Technology and Management. New technologies*, 1(23), 189–191.
19. Mastenko, I.V., & Stelmakh, N.V. (2019). Vliianie plotnosti zapolneniia 3-D pechatnykh modelei na ikh prochnostnie kharakterystiki [Influence of filling density of 3-D printed models on their strength characteristics]. *Materialy MNTK Novye napravleniia razvitiia priborostroeniia – Proceedings of MNTK New directions in the development of instrumentation* (p. 138). BNTU.

Отримано 11.11.2021

УДК 004.896

**Ihor Mastenko<sup>1</sup>, Serhii Sapon<sup>2</sup>, Nataliia Stelmakh<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Master of Instrument Production Department  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine).  
E-mail: [ihormas@gmail.com](mailto:ihormas@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2953-4589>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Wood Technology  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
E-mail: [s.sapon@gmail.com](mailto:s.sapon@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. ResearcherID: [G-7764-2014](https://orcid.org/G-7764-2014)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of instrument production department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
E-mail: [n.stelmakh@kpi.ua](mailto:n.stelmakh@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1876-2794>. ResearcherID: [K-1827-2017](https://orcid.org/K-1827-2017)

## MACHINE VISION AS AN INTEGRAL PART OF THE INTELLECTUAL TECHNOLOGICAL SYSTEMS

*Machine vision is used for automated control of machines and technological processes in various industries. Therefore, it is advisable today to spend more time developing new modern effective video information systems of machine vision.*

*The development of modern computer vision technology is becoming increasingly important in industrial applications, as classic methods of product quality control are associated with additional human costs and depend on the emotional and physiological condition of controllers such as fatigue, inattention and others. An important aspect is the rapid and efficient analysis of product quality directly at the stage of the technological process with high accuracy in determining the defects of products.*



Currently, there is a significant number of methods and algorithms for image processing and machine vision, which have their advantages and disadvantages and applications.

An important element of machine vision technology should be the ability to quickly identify certain types of defects with their subsequent separation and disposal, which will significantly increase the productivity of this process.

The purpose of the article is to review the variations in the use of machine vision technologies in various industries and analyze the possibilities of improving the method of computer vision based on the mathematical apparatus of neural networks to ensure product quality control for specified parameters.

The use of machine vision is almost unlimited in production, which can maximize efficiency and profits, including mechanical engineering and instrumentation. The paper considers and analyzes the main tasks that solve computer vision technologies, existing software tools for implementing algorithms for performing tasks, as well as the possibilities of the proposed method of computer vision based on the mathematical apparatus of neural networks to detect product defects and thus analyze the quality of the product being manufactured.

The article considers the areas of application of computer vision technologies in various branches of industrial production, where this method provides an effective solution to the problem. Therefore, it was proposed to use the above method at the stage of the technological process of manufacturing products in order to control and ensure the quality of the specified parameters of the product.

This article is a review.

**Keywords:** Industrial image processing, computer vision, machine learning, cloud computing.

Fig.: 1. References: 19.

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-4(26)-67-74

УДК 004.7:004.056.55

**Євген Риндич<sup>1</sup>, Андрій Боровик<sup>2</sup>, Олексій Боровик<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [yevhen.ryndych@stu.cn.ua](mailto:yevhen.ryndych@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2723-4144>

ResearcherID: [F-6080-2014](https://orcid.org/0000-0002-2723-4144). SCOPUS Author ID: [57188702150](https://orcid.org/0000-0002-2723-4144)

<sup>2</sup>керівник групи цифрового зв'язку АТ «Чернігівобленерго» (Чернігів, Україна)

E-mail: [a.borovyk@yahoo.com](mailto:a.borovyk@yahoo.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9834-325X>

<sup>3</sup>заступник начальника відділу 3 територіального вузла урядового зв'язку

Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України (Миргород, Полтавська обл., Україна)

E-mail: [drpeso.jr@gmail.com](mailto:drpeso.jr@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5404-5384>

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТУНЕЛЮВАННЯ В СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

У статті наведено результати напівнатурного моделювання мережевої системи та аналіз використання сучасних технологій створення конфіденційних каналів зв'язку (тунелів) у публічних та приватних комп'ютерних мережах. Дослідження проведено з метою виявлення особливостей реалізації та використання програмного забезпечення за умови використання різного апаратного забезпечення відомого виробника мережевого обладнання Mikrotik. Виявлено особливості різних технологій тунелювання, що використовуються в мережевих пристроях з апаратними засобами шифрування, та надано рекомендації щодо їх використання.

**Ключові слова:** комп'ютерна мережа; тунель; шифрування; конфіденційність; WireGuard; IPSec; GRE, L2TP; Open VPN; EoIP; ISP.

Рис.: 8. Табл.: 1. Бібл.: 9.

**Актуальність теми дослідження.** Сучасні комп'ютерні мережі є гетерогенними, що використовують різні технології та канали зв'язку. Корпоративна мережа підприємства є сукупністю внутрішніх та зовнішніх каналів зв'язку, що поєднують частини цієї корпоративної мережі. Питання конфіденційної передачі інформації в таких мережах є актуальним. Зміни у світі, що привели до збільшення частини працівників [1; 2], що працюють у віддаленому форматі, є одним із факторів, що активно сприяє впровадженню зовнішніх захищених каналів зв'язку з інформаційними системами та підсистемами, що перебувають у внутрішній приватній частині корпоративної мережі. Вимоги, що виникають перед виробниками програмного та апаратного забезпечення комп'ютерних мереж, приводять до впровадження нових програмних та апаратних реалізацій методів і мережевих протоколів конфіденційної передачі інформації [3].

**Постановка проблеми.** Використання додаткових засобів шифрування дозволяє забезпечити конфіденційність зв'язку, але при цьому впливають на продуктивність систем цифрового зв'язку: завантаження каналу службовими даними, затримки, навантаження на центральний обчислювальний модуль мережевого обладнання. Впровадження та використання нових технологічних рішень у системах безперервного циклу вимагають підвищеної уваги до тих змін, що можуть негативно вплинути на роботу системи загалом. Особливо це важливо для систем критичної інфраструктури.

Для зменшення ризиків, пов'язаних із впровадженням нових рішень у системи безперервного циклу, необхідно провести аналіз та оцінити вплив на основні характеристики систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні існує велика кількість мережевих протоколів, за допомогою яких можливе створення тунелів як конфіденційних, так і таких, що передають інформацію у відкритому вигляді [4]. Тунелі використовуються не тільки

для забезпечення конфіденційного зв'язку, а для забезпечення живучості комп'ютерних мереж [5]. Сучасне мережеве обладнання – це достатньо складні програмно-апаратні системи, що підтримують багато стандартів та протоколів. Нині відомий виробник мережевого обладнання MikroTik оновив операційну систему RouterOS до версії 7, де основною зміною є використання оновленого ядра Linux версії 5.6.3, що дозволяє використовувати маршрутизаторам декілька варіантів створення захищених з'єднань [3; 6].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** У сучасних дослідженнях основну увагу приділяють алгоритмам шифрування або протоколам тунелювання без урахування особливості пристроїв, що їх реалізують. У разі реалізації за допомогою обладнання або напівнатурного моделювання не оцінюють вплив використаних протоколів на характеристики мережі [7].

**Мета дослідження.** Метою статті є розвиток напівнатурного моделювання роботи комп'ютерних мереж та інших мережевих систем, який може використовуватися в навчальному процесі [8] та виробничих системах. Результатом моделювання є кількісні показники продуктивності мережевого обладнання та каналів зв'язку.

**Виклад основного матеріалу.** Напівнатурне моделювання – це моделювання з реальною апаратурою, при якому частина системи моделюється, а решта частини є реальною. Застосування такого методу моделювання стає необхідним у тих випадках, коли не вдається описати роботу деяких елементів системи математично [9].

Для моделювання корпоративної мережі використано реальне обладнання та міжміські канали зв'язку провайдерів. Для отримання точних кількісних характеристик тунелів, побудованих з використанням різних мережевих протоколів, інші види трафіку корпоративної системи приймаються рівними нулю, тобто мають бути відсутні. Запропонована напівнатурна модель з налаштованими інтерфейсами наведена на рис. 1.

Щоб результати були об'єктивними, у тестовій схемі з обох кінців встановлено обладнання MikroTik hAP ac2, у якому наявний апаратний чіп шифрування. Як програмне забезпечення маршрутизаторів використано RouterOS v.7.1. Одне з додаткових питань, які досліджуються, є взаємодія апаратного чіпа шифрування з центральним процесором. Як ISP з обох кінців використано канал 100 Mbps.

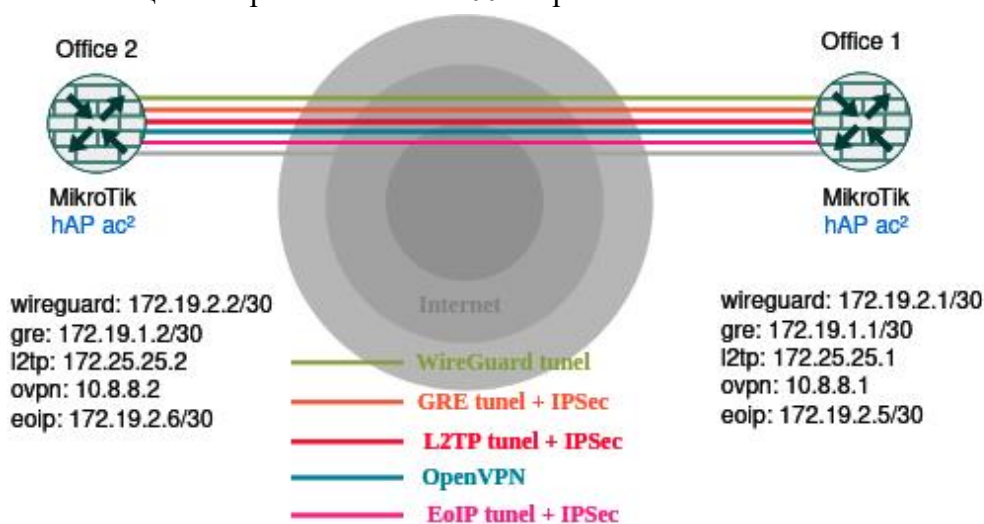


Рис. 1. Схема підключення маршрутизаторів у напівнатурній моделі комп'ютерної мережі

Критерії, які враховано при проведенні експериментів: мережевий протокол тунелювання та шифрування, тип з'єднання транспортного рівня, відправлення чи прийом даних. Як результат проведення експериментального дослідження розглянуто завантаження процесора, корисна пропускну здатність на прийом та передачу.

Для проведення експериментів послідовно налаштовувався один із зазначених типів тунелів. Також для якості зв'язку потрібно розмежувати дослідження пов'язані з транспортним рівнем моделі OSI. Тому для кожного з протоколів використано датаграмний режим передачі даних за допомогою протоколу UDP та зі встановленням з'єднання – протокол TCP.

Як генератор даних для навантаження каналу передачі даних використано стандартний вбудований у RouterOS інструмент Bandwith test. Наявність такого інструмента дозволяє проводити вимірювання саме на мережевому обладнанні та нівелює вплив роботи локальної мережі на результати експериментів. Налаштування типу потоку (транспортного рівня) знаходяться у вікні налаштування Bandwith test (рис. 2).

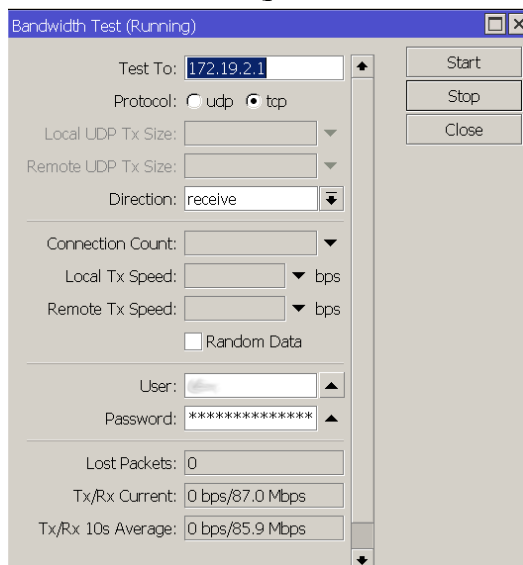


Рис. 2. Налаштування Bandwith test

На рис. 3 наведено результати тестування тунелю, який побудовано за допомогою вбудованого програмного забезпечення, що використовує протокол WireGuard. Як видно з рис. 3 основне навантаження виконується процесором, що свідчить про те, що чіп шифрування в цій реалізації не використовується.

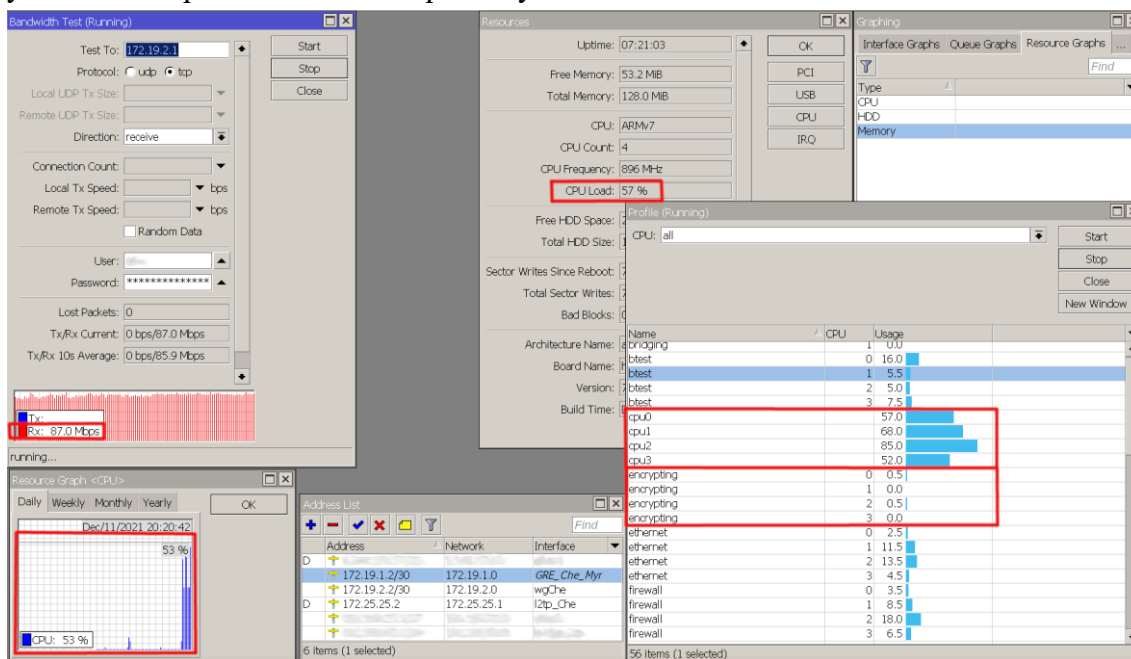


Рис. 3. Тестування тунелю з використанням протоколу WireGuard

На рис. 4 наведено результати тестування тунелю, який побудовано за допомогою вбудованого програмного забезпечення, що використовує протокол GRE + IPSec. Основне навантаження також виконується процесором, отже, чіп шифрування не використовується. Навантаження на процесор менше, ніж у попередньому експерименті.

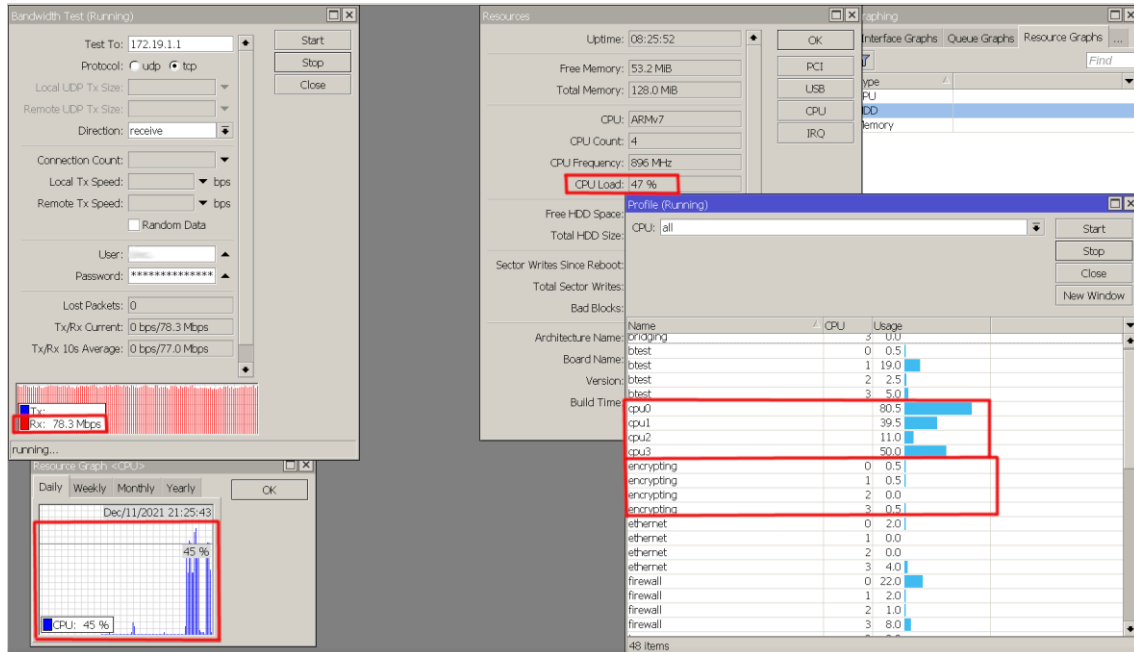


Рис. 4. Тестування тунелю з використанням GRE + IPSec

На рис. 5 наведено результати тестування тунелю, який побудовано за допомогою вбудованого програмного забезпечення, що використовує протокол L2TP + IPSec. Основне навантаження виконується процесором, що означає, що чіп шифрування не використовується. Слід зазначити, що не завжди розподіл навантаження на обчислювальні елементи пропорційний. Це особливо помітно, коли використовується протокол TCP. Згідно з припущенням при встановленні TCP з'єднання весь потік/сеанс оброблюється одним обчислювальним елементом і не змінюється динамічно залежно від навантаження.

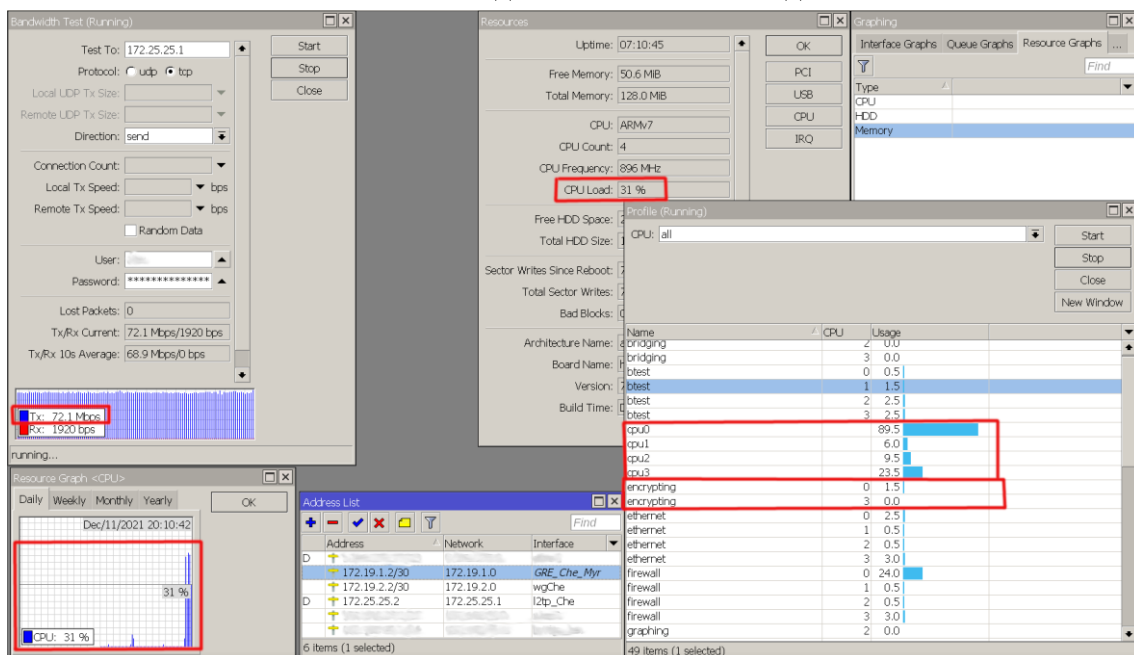


Рис. 5. Тестування тунелю з використанням L2TP + IPSec

На рис. 6 наведено результати тестування тунелю, який побудовано за допомогою вбудованого програмного забезпечення, що використовує протокол EoIP + IPSec. Основне навантаження виконується процесором, що означає, що чіп шифрування не використовується.

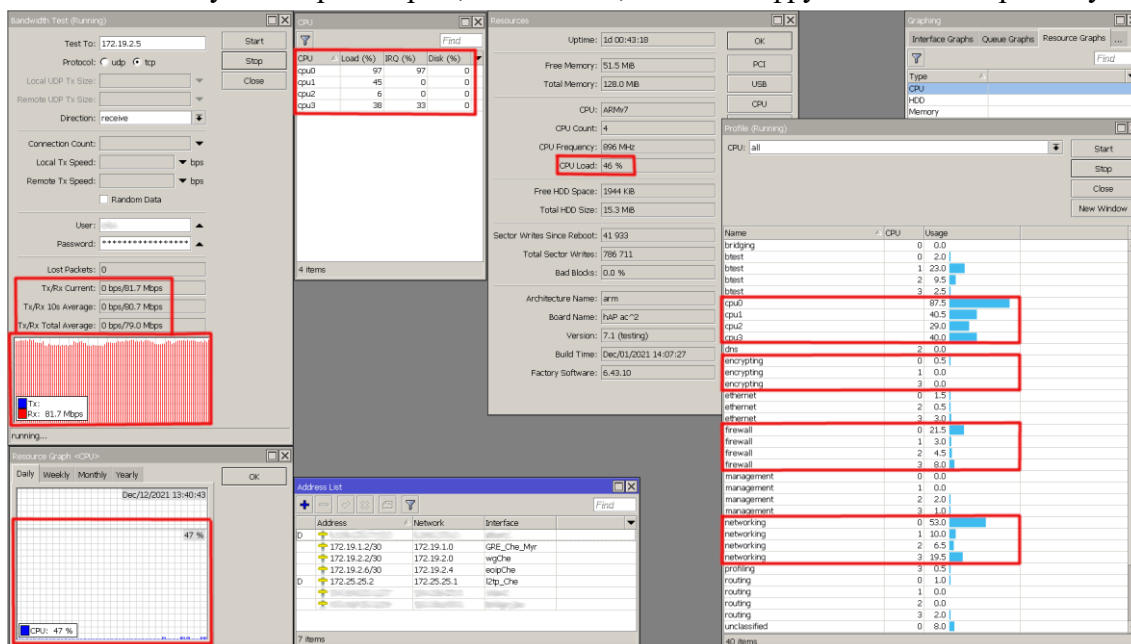


Рис. 6. Тестування тунелю з використанням EoIP + IPSec

На рис. 7 наведено результати тестування тунелю, який побудовано за допомогою вбудованого програмного забезпечення, що використовує протокол OpenVPN. Для цього протоколу передбачено шифрування з використанням апаратного шифрування, що одразу помітно, оскільки навантаження на центральний процесор менше, ніж у попередніх експериментах.

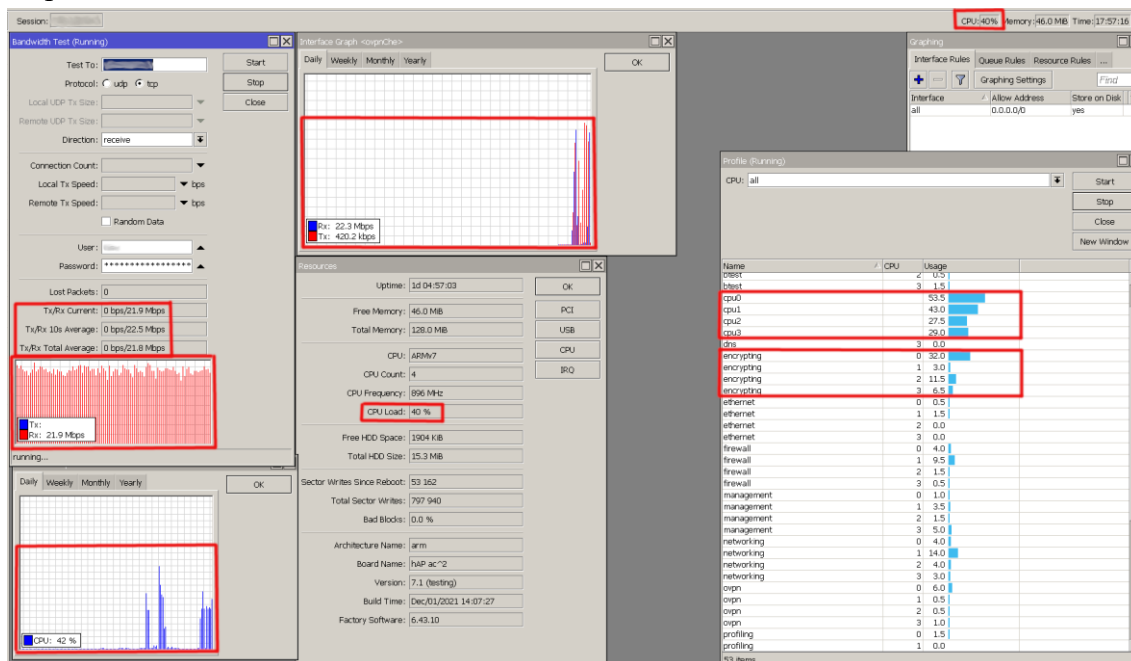


Рис. 7. Тестування тунелю з використанням OpenVPN

Для тунелів, для яких можливо використовувати як транспортний протокол TCP та UDP, було проведеного два експерименти, що підтвердили вже отримані результати.

Одним з основних критеріїв використання тунелів є корисна пропускна здатність каналу (рис. 8). Загальні результати моделювання наведено в таблиці.

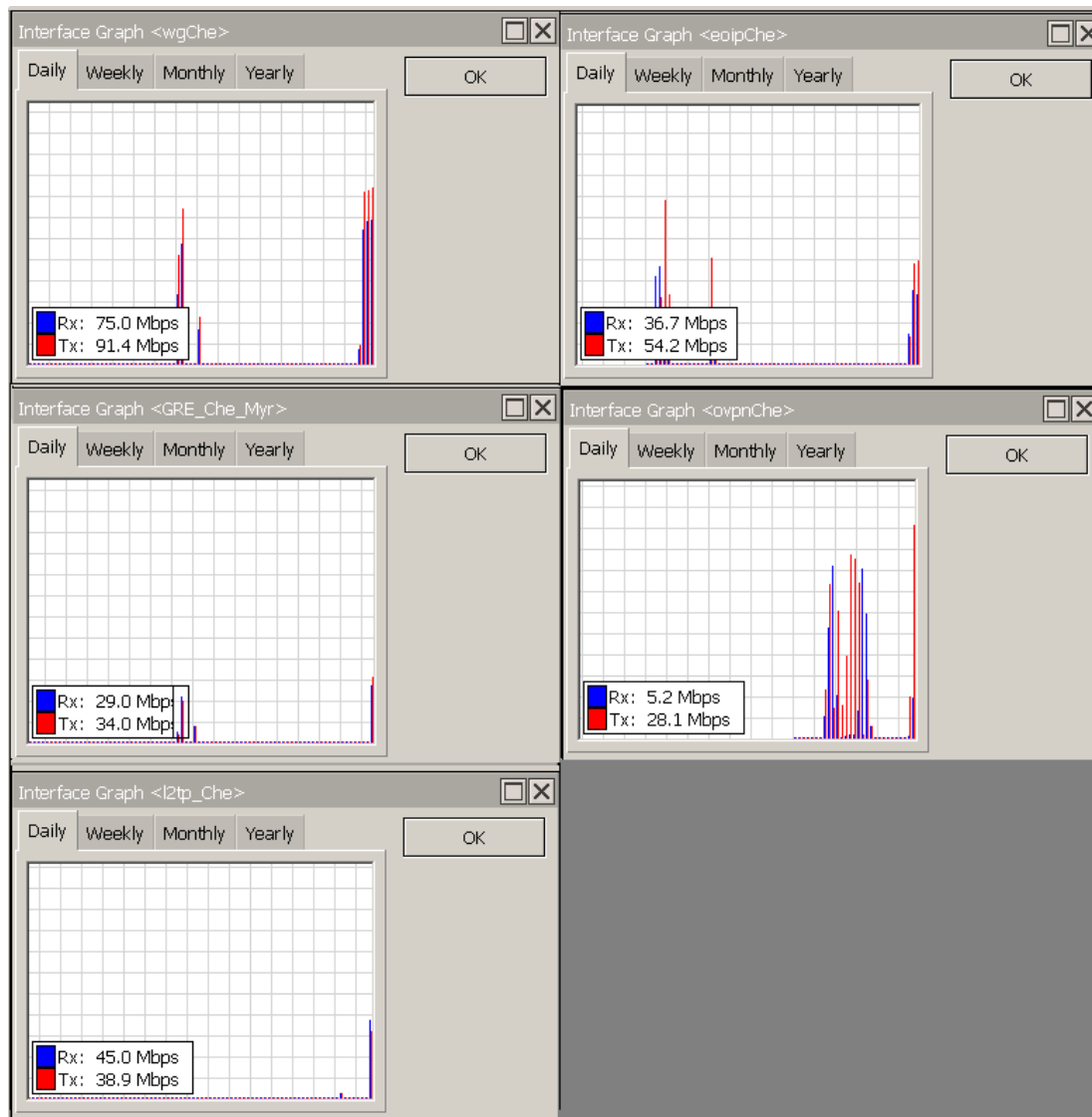


Рис. 8. Корисна пропускна здатність тунелів

Таблиця 1

Загальні результати напівнатурного моделювання

VPN Tunnel	Завантаження CPU, %	Rx, Mbps	Tx, Mbps
WireGuard	65	69,7	89,4
GRE + IPSec	43	35,3	50,2
L2TP + IPSec	48	40,3	41,1
EoIP + IPSec	46	50,2	35,0
OpenVPN tcp	40	16,2	12,8
OpenVPN udp	24	30,2	10,4

**Висновки.** Була створена напівнатурна модель мережевої системи з використанням маршрутизаторів MikroTik. Проведене дослідження дозволило визначити особливості роботи сучасної версії операційної системи RouterOS, а саме визначити протоколи, для яких можливе використання апаратної реалізації алгоритмів шифрування. Особливістю цієї версії є вбудована реалізація тунелю з використанням протоколу WireGuard, який показав високу продуктивність.



Також за допомогою моделі було отримано кількісні показники продуктивності використання тунелів із різними протоколами за умови шифрування даних, що передаються. Ці результати можуть бути використані на виробництві для обґрунтування вибору протоколів та необхідних каналів зв'язку. Як видно з результатів проведених експериментів вплив протоколів та їх реалізацій на корисну пропускну здатність значний та може зменшувати її в декілька разів.

Надалі ця модель може бути використана для тестування каналів зв'язку та аналізу впливу зовнішніх факторів, у тому числі для дослідження можливості несанкціонованого доступу до інформації, що передається в тунелях. Впровадження цієї моделі до навчальних стендів вивчення мережевих технологій забезпечить можливість поглибити знання та набутти практичні навички.

### Список використаних джерел

1. Количество удаленных работников вырастет до 34,4 % в 2021 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://biz.liga.net/ekonomika/it/novosti/kolichestvo-udalennyh-sotrudnikov-v-mire-udvoitsya-v-2021-godu-opros>.
2. Полная статистика по удалённой работе за 2021 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://promopoisk.com/articles/polnaya-statistika-po-udalynnoy-rabote-za-2021-god>.
3. MikroTik Routers and Wireless - Software [Electronic resource]. – Access mode: <https://mikrotik.com/download/changelogs>.
4. Generic Routing Encapsulation (GRE) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc2784.txt.pdf>.
5. Коваленко А. А. Метод забезпечення живучості комп'ютерної мережі на основі vpn-тунелювання / А. А. Коваленко, Г. А. Кучук, В. М. Ткачов // Системи управління, навігації та зв'язку : зб. наук. праць. – Полтава, 2021. – Т. 1 (63). – С. 90-95.
6. Download RouterOS 7.1.1 Stable / 7.2 RC 1 / 6.48.6 LTS / 6.49.2 Stable [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.softpedia.com/get/Internet/Other-Internet-Related/RouterOS.shtml>.
7. VPN Site to Site Implementation using Protocol L2TP and IPSEC / B. Santoso, A. Sani, T. Husain, N. Hendri // ТЕКНОКОМ. – 2021. – № 4(1) – Рр. 30-36.
8. Навчальний стенд для вивчення дисциплін із забезпечення мережевого захисту інформації / Є. В. Риндич, Т. А. Петренко, Л. Г. Черниш, С. М. Семендяй, Г.С. Біленький // Технічні науки та технології. – 2020. – № 2(20). – С. 229–236.
9. Яковлев Ю. С. Принципы организации и применение полу натурного моделирования / Ю. С. Яковлев, А. А. Тимашов // Математические машины и системы. – 2019. – № 2. – С. 80–89.

### References

1. Kolichestvo udalennykh rabotnikov vyrastet do 34,4 % v 2021 godu [The number of remote workers will grow to 34.4% in 2021]. <https://biz.liga.net/ekonomika/it/novosti/kolichestvo-udalennyh-sotrudnikov-v-mire-udvoitsya-v-2021-godu-opros>.
2. Polnaya statistika po udalynnoy rabote za 2021 god [Complete statistics on remote work for 2021]. <https://promopoisk.com/articles/polnaya-statistika-po-udalynnoy-rabote-za-2021-god>.
3. Routers and MikroTik Wireless Devices – Software. (n.d.). <https://mikrotik.com/download/changelogs>.
4. Generic Routing Encapsulation (GRE). (n.d.). <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc2784.txt.pdf>.
5. Kovalenko, A., Kuchuk, H., & Tkachov, V. (2021). Metod zabezpechennia zhyvuchosti kompiuternoi merezhi na osnovi vpn-tuneliuvannia [Method of ensuring the survivability of a computer mesh based on vpn tunneling]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Control systems, navigation and communication* (Vol. 1(63), pp. 90-95). PNTU.
6. Download RouterOS 7.1.1 Stable / 7.2 RC 1 / 6.48.6 LTS / 6.49.2 Stable. <https://www.softpedia.com/get/Internet/Other-Internet-Related/RouterOS.shtml>.
7. Santoso, B., Sani, A., Husain, T., & Hendri, N. (2021). VPN Site to Site Implementation using Protocol L2TP and IPSEC. *TEKNOKOM*, 4(1), 30-36.

8. Ryndych, Y.V., Petrenko, T.A., Chernysh, L.G., Semendiai, S.M., & Bilenkyi, H.S. (2020). Navchalnyi stend dlia vyvchennia dystsyplin iz zabezpechennia merezhevoho zakhystu informa-tsii. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, (2(20)), 229-236.

9. Yakovlev, Y.S.; Timashov, A.A. (2019). Prytsipy organizatsii i primenenie polu naturnoho modelirovaniia [Principles of organization and application of semi-natural modeling]. *Matematicheskie mashiny i sistemy – Mathematical machines and systems*, (2), 80–89.

Отримано 30.11.2021

UDC 004.7:004.056.55

**Yevhen Ryndych<sup>1</sup>, Andrii Borovyk<sup>2</sup>, Oleksii Borovyk<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Information and Computer Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [yevhen.ryndych@stu.cn.ua](mailto:yevhen.ryndych@stu.cn.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2723-4144>  
**ResearcherID:** [F-6080-2014](https://orcid.org/0000-0002-2723-4144). **SCOPUS Author ID:** [57188702150](https://orcid.org/0000-0002-2723-4144)

<sup>2</sup>Head of the digital communication group of JSC «Chernihivoblenergo» (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [a.borovyk@yahoo.com](mailto:a.borovyk@yahoo.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9834-325X>

<sup>3</sup>Deputy Head Department of 3 Territorial Node of Government Communications  
State Service of Special Communications and Information Protection of Ukraine (Myrhorod, Poltava region, Ukraine)

**E-mail:** [drpeso.jr@gmail.com](mailto:drpeso.jr@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5404-5384>

## RESEARCH OF TUNNELING TECHNOLOGIES IN MODERN COMPUTER NETWORKS

*Modern corporate networks are a combination of internal and external communication channels. The issue of confidentiality in such networks is relevant. To reduce the risks associated with implementing new solutions in continuous cycle systems, it is necessary to analyze and evaluate their impact.*

*For now, there is a large number of network protocols that can be used to create tunnels. Modern network equipment is a rather complex software and hardware system that supports many standards and protocols. Well-known network equipment manufacturer MikroTik has upgraded the RouterOS operating system to version 7, where the main change is the use of an updated Linux kernel version 5.6.3, which allows routers to use several different ways to establish secure connections. In modern research, the main attention is paid to encryption algorithms and tunneling protocols without taking into account the peculiarities of implementation.*

*The aim of the article is to develop semi-natural modeling of networks that can be used in the educational process and production systems. The result of the simulation is quantitative indicators of the performance of network equipment and communication channels. The use of semi-natural modeling is necessary when it is not possible to describe the operation of some elements of the system mathematically. Real network equipment and long-distance communication channels of providers were used to model the corporate network. To make the results objective in the test scheme, MikroTik hAP ac2 equipment with a hardware encryption chip and RouterOS v.7.1 were installed on both ends. A 100 Mbps channel was used as the ISP at both ends. The standard Bandwith test tool built into RouterOS is used as a data generator. The study allowed to determine the features of the modern version of the operating system RouterOS. A feature of this version is the built-in implementation of the tunnel using the WireGuard protocol, which showed high performance. The model was also used to obtain quantitative indicators of the performance of tunnels with different protocols under the condition of encrypting the transmitted data. As can be seen from the results of the experiments, the impact of protocols and their implementations on the useful bandwidth is significant and can reduce it several times.*

**Keywords:** computer network; tunnel; encryption; privacy; WireGuard; IPSec; GRE; L2TP; Open VPN; EoIP; ISP.

**Fig.:** 8. **Table:** 1. **References:** 9.

**Юрій Матус<sup>1</sup>, Тетяна Осипова<sup>2</sup>, Борис Гусєв<sup>3</sup>, Андрій Сагун<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>старший викладач кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки  
Національний університет біоресурсів та природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: [umatius@nubip.edu.ua](mailto:umatius@nubip.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0974-4789>

<sup>2</sup>кандидат педагогічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки  
Національний університет біоресурсів та природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: [t\\_osipova@nubip.edu.ua](mailto:t_osipova@nubip.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9199-3436>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки  
Національний університет біоресурсів та природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: [gusevbs@nubip.edu.ua](mailto:gusevbs@nubip.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1658-7822>

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки  
Національний університет біоресурсів та природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: [a.sagun@nubip.edu.ua](mailto:a.sagun@nubip.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5151-9203>

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ  
РІШЕНЬ З ІНФРАЧЕРВОНОГО СУШІННЯ ЗЕРНА**

У статті представлено результати науково-методичного дослідження проблеми інформаційної підтримки технологічних процесів сушіння зерна на основі технології інфрачервоного випромінювання. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень. Запропонована удосконалена модель процесу інфрачервоного сушіння для зернових культур, яка на відміну від існуючих орієнтована на застосування в системах підтримки прийняття рішень при організації процесу сушіння. Результатами експериментів доведено, що за рахунок значного збільшення щільності теплового потоку на поверхні опромінюваного матеріалу та проникнення всередину матеріалу інфрачервоних променів, використання інфрачервоних променів посилює процес сушіння зерна. Доведено, що використання сучасних інформаційних технологій, раціональних схем і режимних параметрів процесів інфрачервоного сушіння зерна, дозволять скоротити час видалення вологи при «дбайливих» режимах сушіння для забезпечення необхідних якісних показників продукту. Доведено, що застосування сучасних інформаційних технологій, керованого плану процесу інфрачервоного сушіння зерна та параметрів моделі дозволить скоротити час сушки та забезпечити відповідність вимогам якості до отриманої продукції.

**Ключові слова:** сушка; інфрачервоне; зерно; комп'ютерні системи.

Рис.: 5. Табл.: 4. Бібл.: 9.

**Актуальність теми дослідження.** Швидкий розвиток інформаційних технологій зумовлює зміну багатьох технологічних процесів у виробництві. Поява нових розумних датчиків і пристроїв дозволяє значно вдосконалити процеси й підходи у процесі управління технологічними процесами, зокрема процесами інфрачервоного сушіння зерна. Існуючі ймовірнісні моделі підтримки прийняття рішень не відповідають сучасним вимогам до систем керування процесами сушки зерна. Зазначені проблеми зумовили актуальність теми тематики статті, її цілеспрямованість та зміст.

**Постановка проблеми.** Ефективність електротехнічних методів інфрачервоного (ІЧ) випромінювання зумовлена використанням нових, науково обґрунтованих методів опромінення матеріалу та застосування розумних контролерів, нових сучасних технологій та IoT-систем. Необхідність та ефективність інформаційного забезпечення процесу інфрачервоного сушіння зерна залежить від потреб управління процесом, що дає змогу забезпечити високі техніко-економічні показники за рахунок зменшення втрат кінцевого продукту, витрати сировини, умовного палива чи електроенергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наприкінці ХХ століття різко зріс інтерес до застосування ІЧ сушіння в сільському господарстві [1-7]. Слід зазначити, що існуючі методи використання енергії інфрачервоного випромінювання для покращення сушки зерна до кінця не досліджені та не враховані у процесі активної вентиляції зернової маси. У роботах [3-8] авторами було показано, що швидке підвищення температури матеріалу після критичної точки, при безперервному ІЧ сушінні, викликає погіршення властиво-

стей зерна. При цьому значний температурний градієнт уповільнює внутрішній масоперенос. Недостатньо відпрацьована технологія осцилюючого ІЧ сушіння та відсутність автоматизації регулювання підведення теплових потоків до матеріалу не дозволило адаптувати імпульсну ІЧ сушку для широкого застосування на елеваторах та зерноскладах.

Сучасна електроніка дозволяє керувати нагрівальними приладами та іншою технікою, необхідною для забезпечення оптимального режиму сушіння. У цьому випадку головним є інформаційне забезпечення процесу прийняття рішення щодо вибору конкретного режиму інфрачервоної технології сушіння, при цьому необхідно враховувати не тільки початкову вологість матеріалу, його оптичні та біологічні характеристики. Виконана перевірка адекватності запропонованих математичних моделей показала, що розбіжність між різними математичними моделями досить велика (7-12 %) [6; 7]. При цьому всі автори, що досліджують проблему моделювання процесу сушіння, зазначають, що навіть незначне перевищення порогового значення температури сушильного агента (звичай повітря) призводить до зниження схожості зерна та денатурації білків [6-9].

Існування різних сценаріїв процесу ІЧ сушіння зерна вимагає використання методу ідентифікації ситуації у вигляді набору експертних знань про характеристики матеріалу та доцільності створення модуля системи інформаційної підтримки інфрачервоного сушіння зерна (СПІЧСЗ). Інформаційна підтримка процесу інфрачервоного сушіння має включати розробку і аналіз інформації про матеріал та бази даних аналізу, а також визначення модуля прогнозування теплоємності, вмісту вологи, білка та клейковини тощо, що дозволяють знизити втрати в процесі ІЧ сушіння, у порівнянні з традиційною технологією управління процесом.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Враховуючи погляди попередніх досліджень, існує необхідність у подальшому розвитку математичних моделей, а також інформаційних технологій, що використовуються в системах підтримки прийняття рішень з ІЧ сушіння зерна елеваторів та зерноскладах.

**Метою статті** є подальший розвиток математичних моделей для обчислювального ядра системи підтримки прийняття рішень в процесі ІЧ сушіння зерна та удосконалення інформаційної технології підтримки процесу сушіння.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити математичну модель процесу інфрачервоного сушіння зерна, що дозволить обґрунтовувати вибір стратегії інформаційної підтримки та автоматизації цього процесу;
- розробити методику та алгоритм розрахунку щільності падаючого теплового потоку на поверхню зернової маси в сушильній камері з урахуванням факторів, що впливають на проникнення ІЧ хвиль у такі капілярно-пористі продукти, як зерно, крупа;
- розробити модуль системи інформаційної підтримки інфрачервоного сушіння зерна (СПІЧСЗ), що дозволить вибирати раціональні конструктивні та режимні параметри СПІЧСЗ зі зниженими питомими енерговитратами, та провести чисельні дослідження впливу різних параметрів СПІЧСЗ на процес сушіння та теплообміну в сушильних камерах.

**Виклад основного матеріалу.** На підставі проведеного аналізу було запропоновано схему системи інформаційної підтримки ІЧ сушіння зерна (СПІЧСЗ), з урахуванням зовнішніх та керуючих впливів (рис. 1).

З урахуванням теорії тепловіддачі інфрачервоного випромінювання отримано диференціальні рівняння тепло- і вологовіддачі зерна при двосторонньому нагріванні для інфрачервоного сушіння:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T + \varepsilon \frac{r}{c_p} \frac{\partial Y}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial Y}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 Y + D \delta \nabla^2 T \end{cases} \quad (1)$$

де  $\delta$  – коефіцієнт термовологопровідності, 1/К;  $\frac{\partial T}{\partial \tau}$  – градієнт температури, К/м;  $\frac{\partial Y}{\partial \tau}$  –

градієнт містимої вологи;  $\varepsilon$  – коефіцієнт пропорційності  $\varepsilon = \frac{F_{эф}}{F_{np}} = \frac{F_{эф}^{вюд}}{F_{np}^{вюд}}$  (вважаємо, що

поверхня джерела пропорційна видимій поверхні (проекції поверхні ІЧ випромінювання на площину, перпендикулярну променю), відношення ефективної випромінюючої поверхні спіралі  $F_{эф}$  до прямої поверхні нікель-хромового сплаву  $F_{np}$ );  $r$  – питома випаровувана теплота, КДж/кг;  $\Delta^2$  – оператор Лапласа;  $D$  – коефіцієнт пропускання матеріалом ІЧ випромінювання.

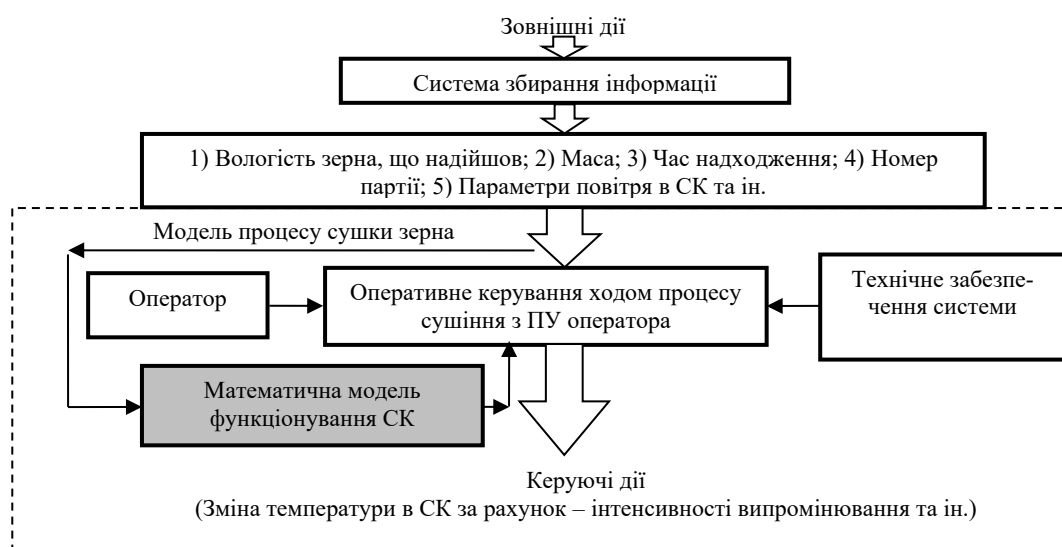


Рис. 1. Схема СПІЧСЗ

Джерело: розроблено авторами.

Інтегральне рівняння тепловологопереносу можна уявити так

$$q(\tau) = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \frac{d\bar{Y}}{d\tau} + \rho_0 \cdot R_v \cdot c_p \frac{dT}{d\tau}, \quad (2)$$

де  $R_v = v/F$  – відношення об'єму до поверхні тіла.

Таким чином, складові тепловологопереносу можна записати у вигляді таких рівнянь:

$$\begin{cases} q(\tau)_Y = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot \frac{dY}{d\tau}; \\ q(\tau)_T = \rho_0 \cdot R_v \cdot c_p \cdot \frac{dT}{d\tau}. \end{cases} \quad (3)$$

Отримані вище рівняння дозволяють визначити найголовніший параметр для СПІЧСЗ – вміст вологи в зерновій масі, тому що саме її кількість визначає якість інфрачервоної сушки.

Зовнішній теплообмін здійснюється шляхом вільної конвекції. При такому підході віддача теплоти залежить від форми та розмірів нагрівальної поверхні, температури цієї поверхні, температури зовнішнього середовища, коефіцієнта об'ємного розширення нагрівальної поверхні та інших її фізичних властивостей. Узагальнене рівняння для коефіцієнта віддачі теплоти  $a$  виражається функцією степеня  $n$ :  $Nu = C(GrPr)^n$ . Значення коефіцієнта  $C$  і степеневого показника  $n$  прямо залежать від режиму руху, який визначається поверхневою температурою продукту, різницею температур між продуктом та навколишнім середовищем, а також щільністю потоку теплоти від ІЧ випромінювача.

Розв'язком рівняння за крайових умов є функція  $T = f(x, \tau, E_n, W_{нач})$ . Щоб збільшити обидва види аргументів диференціації під час зневоднення зернової маси, замість води необхідно використовувати концентрацію сухої речовини:

$$\frac{\partial T}{\partial c_p} = \frac{a}{\frac{\partial c_p}{\partial \tau}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{r \cdot \rho}{c_p \cdot \rho} + \frac{w}{\frac{\partial c_p}{\partial \tau} \cdot c_p \cdot \rho}. \quad (4)$$

У результаті реалізації математичної моделі процесу ІЧ сушки зерна повинні бути встановлені діапазони температур по шару зернової маси, залежно від концентрації сухих речовин, оптимального часу фокусування випромінювання при різних рівнях вологості зерна та ін. Розв'язок системи диференціальних рівнянь переносу теплоти і вологи в умовах, що відповідають комбінованому сушінню колоїдних капілярно-пористих матеріалів, та аналіз їхніх критеріїв подібності й коефіцієнта внутрішнього випаровування вологи показав, що переміщення води від внутрішніх до зовнішніх шарів відбувається з постійною швидкістю у вигляді пари.

Оскільки реалізація оптимальних умов сушіння, що постійно змінюються, на нинішньому технологічному рівні технічно мало реальна й економічно не виправдана, доцільно ввести дисконтну позонну оптимізацію сушіння за наступними етапами:

- застосовуючи рівняння кривих зневоднення, розраховуємо інтеграл функції швидкості сушіння;
- вираховуємо цільову функцію – множимо сумарну інтегральну швидкість сушіння на параметр, який пропорційно впливає на продуктивність усього процесу сушіння;
- визначаємо значення оптимальних параметрів у кожній зоні сушки, максимальне значення шуканої функції в уточнених межах зон у раціональному режимі сушіння (наприклад, на етапі апробації математичної моделі можна використати програму Mathcad, застосовуючи опцію «maximize»);
- одержуємо апроксимуючі рівняння швидкості сушіння зерна по зонах у раціональному режимі (при заданих оптимальних параметрах сушки);
- з'ясовуємо тривалість сушки зернової маси за умови максимуму цільової функції.

Для СППЧСЗ система рівнянь доповнена статичною характеристикою, що дозволяє визначити кількість вологи, що видаляється в процесі сушки зерна –  $W$  (або вміст води  $u$ ) в  $j$ -ій серії регулювання за значеннями параметрів, що регулюються ( $q$  – середній питомий потік теплової енергії по шару зернової маси (регульований параметр), Вт/м<sup>2</sup>;  $V$  – швидкість руху зернової маси (регульований параметр), м/с;  $P$  – питома потужність джерела ІЧ випромінювання, у  $j$ -ій і  $(j-1)$  серіях;  $\tau$  – час ІЧ випромінювання, с.

При розгляді реального процесу сушіння зерна на стрічці конвеєра сушильного агрегату, можливі ситуації нерівномірної висоти шару зерна, що опромінюється. Отже, тепло від ІЧ випромінювання, нерівномірно проникає в шар зерна й у різних шарах зернової маси має різну температуру. Тому кожен шар зерна описаний своїм рівнянням, використовуючи процедури побудови математичної моделі кожного шару.

Для першого зернового шару (підвід теплоти безпосередньо від ІЧ джерела)

$$dT / d\tau = k_1 \cdot (T_{ук} - T_1) + k_2 \cdot (T_2 - T_1) - k_3 \cdot (T_0 - T_1).$$

При цьому зміна температури в  $i$ -ому і  $n$ -ому шарі можна описати відповідно такими рівняннями:

$$dT_i / d\tau = k_2 \cdot (T_{i+1} - T_i) + k_2 \cdot (T_{i-1} - T_i); dT_n / d\tau = k_2 \cdot (T_{n+1} - T_n).$$

Фактична температура в сушильній камері перетворюється на сигнал пристроєм  $T\phi$ . Позначаючи сигнали на виході цих пристроїв аналогічними літерами, висловимо відхилення фактичне від необхідного у вигляді сигналу:  $\Delta T = T_{\Sigma} - T\phi$ , який називається сигналом відхилення або неузгодженістю.

З урахуванням сушіння по шарах система виглядатиме таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{d\tau} = \frac{Q - F \cdot \chi \cdot (C_s \cdot T_n^4 - C_o \cdot T_o^4)}{m \cdot c}; \\ dT_i / d\tau = k_2 \cdot (T_{i+1} - T_i) + k_2 \cdot (T_{i-1} - T_i); \\ dT_n / d\tau = k_2 \cdot (T_{n+1} - T_n); \\ \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \frac{\partial \xi}{\partial \Lambda_{\zeta}}; \\ \frac{\partial T}{\partial W} = \frac{a}{\frac{\partial W}{\partial \tau}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r \cdot \rho}{c\rho} + \frac{w}{\frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot c\rho}; \\ \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{E_{p, \text{гран.}} + \alpha \cdot (T_o - T_{x=0(\text{нов.})})}{-\lambda(W)}; \\ \left( \frac{\partial \Delta F}{\partial U_p} \right)_{T, P} = \left( \frac{\partial \Delta E}{\partial U_p} \right)_{T, P} - T_0 \cdot \left( \frac{\partial \Delta S}{\partial U_p} \right)_{T, P} \end{array} \right. \quad (5)$$

Застосування сучасних датчиків СІПЧСЗ дозволяє по-новому підійти до питання моделювання даного процесу. При цьому нелінійна модель може коригуватися за результатами вимірювань у процесі роботи технологічного обладнання та безпосередньо використовуватись в оперативному управлінні. Для проведення експериментальних досліджень доопрацьовано установку для термообробки зерна, що складається з жолоба, конвеєра та нагрівальних елементів, що дозволяють змінювати щільність теплового потоку, що підводиться до зернової маси залежно від зміни часу із застосуванням отриманих математичних моделей та використанням системи інформаційної підтримки.

В алгоритмі роботи СІПЧСЗ краще вибрати більш простий варіант моделювання, з урахуванням того, що завдання відноситься до завдань нестационарної теплопровідності.

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + E(x, y, \tau, T). \quad (6)$$

Це рівняння описує динаміку розподілу  $T(x, y, \tau)$  на поверхні матеріалу залежно від часу. Фізичний смисл коефіцієнту  $\lambda$ , який може бути функцією як координат, так і самої температури, полягає в завдання швидкості перетікання тепла від більш нагрітих шарів матеріалу в менш нагріті. Функція  $E(x, y, \tau, T)$  визначає приплив тепла ззовні, тобто від ІЧ джерел тепла, які також залежать від просторових координат (що задає локалізацію джерел), і від часу та температури.

Виконано перевірку адекватності отриманої моделі в середовищі MathCAD, за таких додаткових умов:

- граничні умови, тобто динаміку функції  $T(x, y, \tau)$  і (або) її похідних на межах розрахункової області;
- початкову умову, тобто функцію  $T(x, y, \tau)$ .



На підставі аналізу отриманих розрахункових даних зроблено висновки про динаміку випаровування вологи при ІЧ сушінні та теплопровідності шару при різних початкових параметрах ІЧ джерела випромінювання.

Порівняння розрахункових значень інтенсивності ІЧ випромінювання по ширині зернової маси показало (рис. 2, 3), що ширина поля рівномірного опромінювання збігається з проектними значеннями та швидкість зменшення інтенсивності ІЧ потоку на краю зони сушіння істотно не впливає на температурні поля, створюваними джерелами.

В області значень вологості  $Y \leq 28\%$  зі зменшенням  $Y$  знижуються значення  $\alpha$ . Це пояснюється тим, що швидкість зміни температури в повітрі при ІЧ нагріванні вище, ніж у воді і волога в шарі зі збільшенням її вмісту насичує пори і виступає на поверхні, що сприяє зменшенню швидкості температури. В області підвищених значень вологості ( $Y \geq 28\%$ ) значення  $\alpha$  практично постійне, оскільки волога з матеріалу виступила в такій кількості, при якому швидкість зміни температури вже не зменшується, а зростає лише тепловий потік.

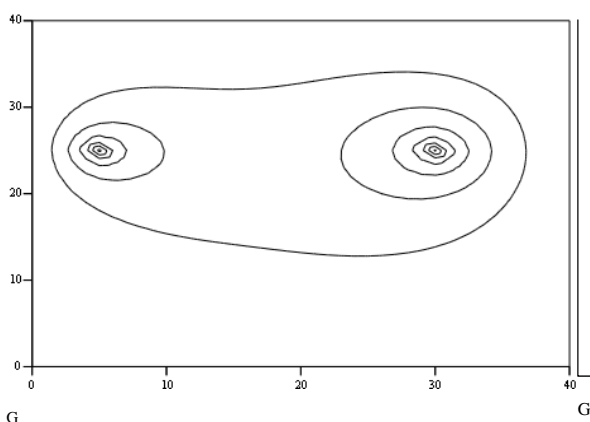


Рис. 2. Розподіл теплових потоків по поверхні зернового шару при ІЧ підводі теплоти

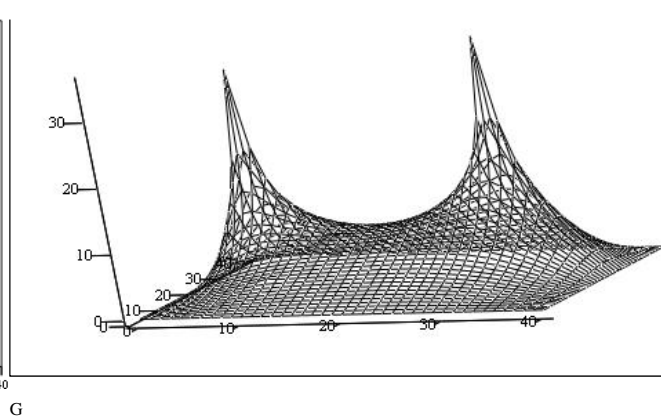


Рис. 3. Розподіл теплових потоків по глибині шару

Характер зміни теплопровідності можна пояснити різними формами зв'язку вологи з матеріалом. При вологості зерна до 30% волога заповнить дрібні пори, і після їх насичення перетворюється на міжзерновий простір; при цьому  $\lambda$  менше, оскільки в пори матеріалу замість води входить повітря, теплопровідність якого значно менша, ніж рідини. У матеріалі з високою вологістю відбувається різке збільшення  $\lambda$  за рахунок поверхневої вологи, оскільки волога виступає на поверхню окремих зерен і утворює водяні теплові «містки» у місцях контакту частинок матеріалу.

Лабораторні дослідження проведені на експериментальній установці, яка є двострічковою сушильною камерою, оснащеною ІЧ джерелами випромінювання та апаратно-програмним комплексом управління режимами роботи – «Контроль і регулювання температури ІЧ сушіння зернових».

Регулювання параметрів відбувалося за двома контурами. Вхідними параметрами, що регулюються є:

- кількість ІЧ випромінювання, що підводиться до зернової маси від установки «Квірін» – енергія випромінювання ( $E$ ) (для серії експериментів без конвекції);
- кількість сушильного агента (теплого повітря) для серії експериментів, у яких була конвекція.

Недолік гнучкості в реконфігуруванні СППЧСЗ – одна з основних проблем подальшого розвитку комп'ютерних систем в агропромисловому комплексі. На додавання до системи зовнішніх швидкісних периферійних пристроїв накладаються певні обмеження через невеликі можливості портів комп'ютера, що входить до складу комплексу СППЧСЗ.

У процесі експериментальних досліджень для експериментальної сушильної камери розроблено пристрої для зняття основних параметрів зернової маси в процесі сушіння – USB термометри. Ці пристрої, що вимірювали температуру зерна, а в деяких експериментів і сушильного агента, виводили отримані дані на екран комп'ютера по USB-роз'єму якого вони були підключені. У цих пристроях програмно реалізована схема низькошвидкісного USB для зв'язку з ПК пульта керування стенда.

Метою експериментального аналізу апаратно-програмної частини сушильної камери (АПЧСК) є дослідження системи управління режимами джерела ІЧ сушіння, виявлення та розгляд властивостей, що мають негативний вплив на працездатність системи в цілому, або вилучення цих властивостей, чи зменшення їх негативного впливу.

У кожній серії проведено три досліди: при температурі ІЧ нагрівачів  $T_p = 303...373$  К в експериментах із сушінням тільки за рахунок підведення променистої енергії та при постійній температурі підготовленого повітря  $T_v = 303...313$  К і  $T_p = 323...363$  К. Експерименти проведені за початкової вологості зерна в діапазоні – 20-22 %.

Таблиця 1

Основні режими експериментальних досліджень (ІЧ сушка)

№ Експерименту	Параметри									
	$T_p, K$ ( $X_1$ )	$T_{z_0}, K$	$T_{z_k}, K$	$T_0, K$	$Y_0, \%$	$Y_{z_0}, \%$	$Y_{z_k}, \%$	$V \cdot 10^{-3},$ м/с	$\tau_e, \text{ХВИЛ}$ ( $X_3$ )	$x, \text{ММ}$ ( $X_2$ )
1	303-333	292-295	310-330	288-298	38-45	20,8-20,4	16,1-14,7	0,5-1	0-60	5-6
2	313-343	292-295	310-335	288-298	40-47	20,9-20,5	14,5-14,1	0,5-1	0-45	5-6
3	323-353	292-295	320-345	288-298	41-49	20,7-20,6	14,3-13,9	0,5-1	0-40	6-8
4	333-363	292-295	328-348	288-298	36-42	21,2-20,9	13,9-13,8	0,5-1	0-30	6-8
5	343-373	292-295	343-353	288-298	38-44	21,4-20,6	13,9-13,6	0,5-1	0-30	8-10

Грунтуючись на аналізі науково-технічної літератури та результатів, одержаних під час попередніх практичних досліджень на працюючій установці, вибрано повний факторний експеримент за методикою активного планування, що дозволяє реалізувати можливі комбінації трьох незалежних повністю керованих факторів: температура джерела ІЧ випромінювання сушильної установки ( $X_1$ ) 303-353; товщина зернового шару ( $X_2$ ) 5-12 мм; час випромінювання ( $X_3$ ) 20-60 хв. Вихідні параметри: температура поверхні зернового шару і кількість поглиненої променистої енергії від ІЧ випромінювання. Базові режими сушіння зерна відображені в таблицях 1, 2.

Також важливим завданням експериментальної АПЧСК є забезпечення оптимальних технологічних температур сушіння зерна методом управління ІЧ випромінювачами в технологічних зонах сушіння. Крім того, до завдань експериментальних дослідів увійшли – вивірка теоретичних положень оптимального процесу ІЧ сушіння зерна, виявлення низки параметрів зерна й удосконалення програмної складової АПЧСК.

Таблиця 2

*Основні режими експериментальних досліджень  
(ІЧ сушка + конвективний теплообмін)*

№ Експерименту	Параметри										
	$T_p, K$ (X1)	$T_{z_0}, K$	$T_{z_k}, K$	$T_0, K$	$Y_0, \%$	$Y_{z_0}, \%$	$Y_{z_k}, \%$	$V \cdot 10^{-3},$ м/с	$\tau_e,$ хвиль (X3)	$x, мм$ (X2)	$V_e,$ м/с
1	303-323	292-295	310-330	288-298	39-44	20,7-20,4	15,7-14,5	0,5-1	0-60	5-8	2-5
2	313-333	292-295	310-335	288-298	42-49	20,6-20,5	14,2-14,0	0,5-1	0-45	5-8	2-5
3	323-343	292-295	320-345	288-298	42-47	20,7-20,6	14,0-13,8	0,5-1	0-40	8-10	2-5
4	333-353	292-295	328-348	288-298	40-45	20,9-20,5	13,8-13,7	0,5-1	0-30	8-10	2-5
5	343-353	292-295	343-353	288-298	45-49	21,7-21,1	13,7-13,6	0,5-1	0-30	10-12	2-5

Основні результати досліджень, отримані при проведенні натурного експерименту на стенді, з використанням апаратно-програмного комплексу управління процесом ІЧ сушіння зерна представлені в таблицях 3, 4, а також на рис. 4.

Таблиця 3

*Результати експериментальних досліджень*

№ Експерименту	Параметри					
	Керовані фактори			Функція відгуку		
	$T_p, K$ (X1)	$x, мм$ (X2)	$\tau_e, хвиль$ (X3)	$T_{z_k}, K$	$Y_{z_k}, \%$	$\Delta Y_{z_k}, \%$
1	303-333	5-8	60	300-330	16,1-14,7	3,9-5,3
2	313-343	5-8	45	309-341	14,5-14,1	6-6,4
3	323-353	8-10	40	321-352	14,3-13,9	6,2-6,6
4	333-363	8-10	30	331-361	13,9-13,8	6,6-6,7
5	343-373	10-12	30	342-370	13,9-13,6	6,85-7,25

Таблиця 4

*Результати експериментальних досліджень*

№ Експерименту	Параметри						
	Керовані фактори				Додатковий фактор	Функція відгуку	
	$T_p, K$ (X1)	$x, мм$ (X2)	$\tau_e, хвиль$ (X3)	$V_e, м/с$		$T_{z_k}, K$	$Y_{z_k}, \%$
1	303-333	5-8	60	2-5	301-328	15,7-14,5	5,5-6,7
2	313-343	5-8	45	2-5	307-339	14,2-14,0	6,3-6,5
3	323-353	8-10	40	2-5	318-349	14,0-13,8	6,8-7,0
4	333-363	8-10	30	2-5	327-358	13,8-13,7	6,95-7,05
5	343-373	10-12	30	2-5	339-367	13,7-13,6	7,1-7,2

Для всіх серій експериментів характерно, що зі збільшенням температури ІЧ джерела випромінювання температура зернового шару безперервно збільшується, що пов'язано зі зменшенням кількості вологи в зерні. При цьому зі збільшенням робочої температури ІЧ джерел до  $T_p = 343-353 K$ , вихід на оптимальну температуру зернової маси  $T_z = 333-368 K$  проходить на 15-18 хвилин швидше, що, у свою чергу, скорочує загальний час сушіння приблизно на 35-45 %.

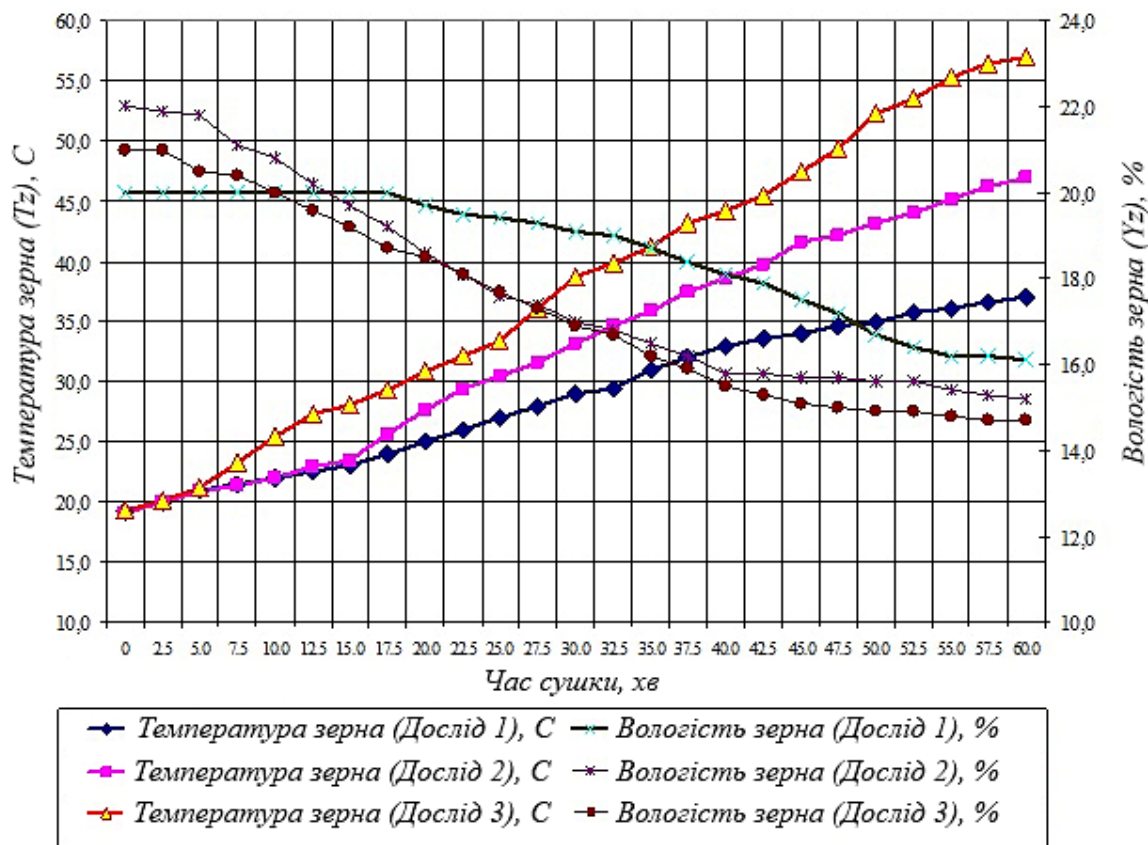


Рис. 4. Залежність температури зерна від часу сушки (експеримент 1 – ІЧ підвід теплоти)

Джерело: розроблено авторами.

Була розроблена комп’ютерна система управління ІЧ сушінням, що дозволяє вибрати та розрахувати раціональні параметри процесу з урахуванням особливостей зернового матеріалу.

У СППЧСЗ передбачено введення у спеціальні вікна, теплофізичних параметрів – початкової температури та вологості продукту сушіння, а також виведення на друк отриманих результатів: зміна температури та вологості зерна, підбір технологічних режимів, при якому продукти сушіння будуть мати харчову та біологічну цінність відповідно до максимального значення функціоналу якості.

На рис. 5 показана форма модуля математичного моделювання процесу прогнозу оцінки часу сушіння при заданих початкових параметрах зерна. Слід зазначити, що недостатня інформаційна підтримка цього завдання, а також питань поєднання існуючих інформаційних систем підприємств із заготівлі та переробки зернових різко знижує можливість оптимального вибору конкретного варіанта ІЧ сушіння та збільшує терміни адаптації технологічного обладнання до конкретних умов середовища функціонування підприємства.

Тому в межах розробки модуля СППЧСЗ та програми «System of automatic grain infrared drying» розроблено та створено таблиці БД з біологічними параметрами матеріалу сушіння. Це дозволило більш точно прогнозувати час виконання операцій залежно від таких факторів, як коефіцієнти теплопередачі та тепловіддачі різних сортів зернових, вміст у них білка та клейковини та ін.

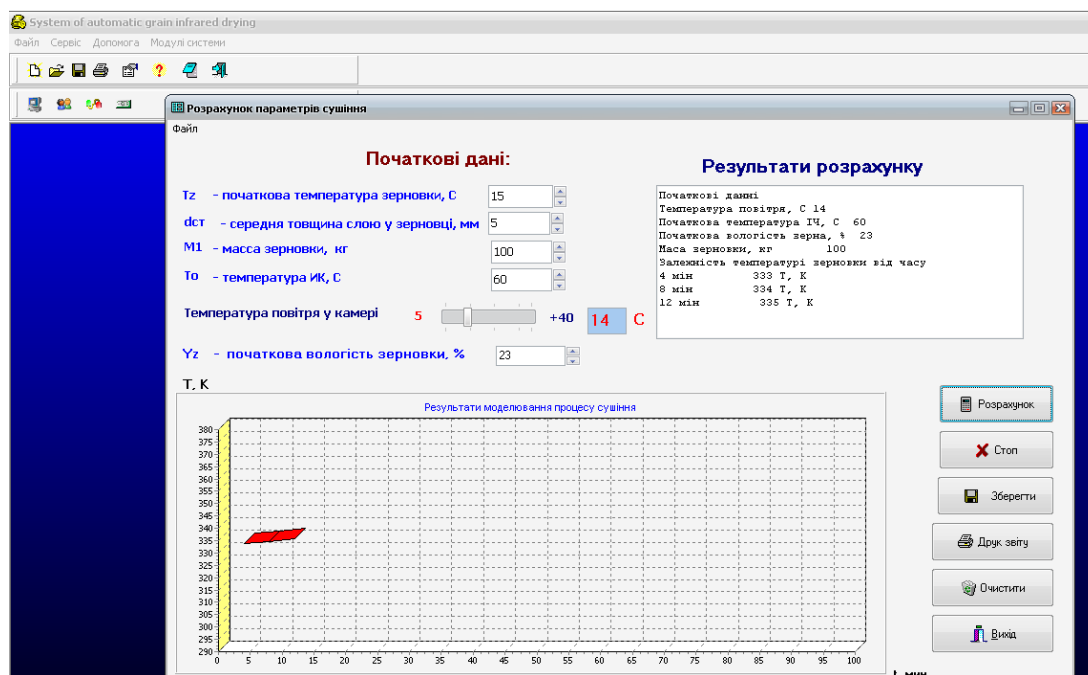


Рис. 5. Інтерфейс модуля математичного моделювання процесу і прогнозування часу сушки при заданих початкових параметрах зернової маси

**Висновки.** У статті розглянуто науково-ужиткове завдання підтримки прийняття рішень управління ІЧ сушінням зерна із застосуванням інформаційних технологій. Отримані результати досліджень дозволяють зробити такі висновки, основні з яких полягають у наступному:

1. Розроблено математичну модель ІЧ сушіння зерна. Отримано системи диференціальних рівнянь процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих тіл при односторонньому та двосторонньому підведенні теплоти.

2. Визначено алгоритм розрахунку щільності падаючого теплового потоку, а також визначення температур для кожного шару при ІЧ сушінні зерна.

3. Визначено раціональну товщину (5...7 мм), що дозволяє забезпечити найбільш рівномірний розподіл температури поверхні ІЧ установки. Виявлено температури джерела, необхідні для найбільшого поглинання променистої енергії зерном. Встановлено робочі температури ІЧ джерел  $T_p = 343\text{--}353\text{ K}$ , при яких швидший вихід на оптимальну температуру зернової маси  $T_z = 333\text{--}368\text{ K}$  скорочує загальний час сушіння на 35-45 % для варіанта використання лише ІЧ джерелом, та 40-50 % для комбінованого сушіння. Встановлено області значень вологості ( $> 23\%$ ), за яких знижуються значення коефіцієнта температуропровідності. Також встановлено значення вологості, за яких швидкість зміни температури не зменшується (20-23 %), а зростає лише тепловий потік у зерновій масі. Встановлено підвищені питомі витрати теплоти на випаровування вологи для варіанта ІЧ сушіння з конвективною складовою.

4. Виконано оцінку різних варіантів сушіння з використанням коефіцієнтів ефективності нагріву  $K_t$  та ефективності вологознімання  $K_w$  за допомогою якої встановлено, що для всіх проведених серій експериментів з комбінованим підведенням теплоти (ІЧ + конвективна складова), час сушіння, порівняно тільки з ІЧ варіантом, скорочується на 32-39 %. Встановлено скорочення часу сушіння від 32 до 39 % для всіх проведених серій експериментів з комбінованим підведенням теплоти (ІЧ + конвективна складова) порівняно тільки з ІЧ підведенням. Крім того, виявлено конвективний вплив на динаміку процесу випаровування вологи із зерна різної товщини шару.

5. Розроблено та апробовано систему контролю, вимірювання та реєстрації параметрів ІЧ сушіння, які визначаються сучасними апаратними засобами та сучасними інформаційними технологіями.

### Список використаних джерел

1. Цугленок Н. В. Функциональное описание процесса сушки зерна / Н. В. Цугленок // Вестник КрасГАУ. – 2005. – № 8. – С. 217–221.
2. Влияние ИК-обработки зерна пшеницы и ржи на параметры процесса его измельчения / Л. Н. Крикунова, Т. В. Андриенко, В. Я. Черных, А. В. Лебедев // Известия вузов. Пищевая технология. – 2007. – № 4. – С. 76-77.
3. Цугленок Н. В., Манасян С. К., Демский С. К. Техника и технология сушки зерна : учебное пособие / [Н. В. Цугленок, С. К. Манасян, Н. В. Демский]. – Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2007. – 119 с.
4. Анисимов А. В. Система автоматического управления температурой и влажностью при подготовке зерна к помолу / А. В. Анисимов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. НИ Вавилова. – 2013. – № 10. – С. 44-47.
5. Исследование температурного поля инфракрасной нагревательной системы для сушки зародышей зерна пшеницы и ржаных отрубей / С. Ф. Демидов, Б. А. Вороненко, С. С. Беляева, В. И. Марченко // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2013. – № 2. – С. 384-396.
6. Калініченко Р. А. Математичне моделювання тепломасообмінних процесів високотемпературної термообробки зернових матеріалів / Р. А. Калініченко, В. Д. Войтюк // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. –2017. – Вип. 275. – С. 59–67.
7. Лахно В. А. Использование компьютерных систем для повышения эффективности информационной поддержки инфракрасной сушки зерна : монография / В. А. Лахно, Д. А. Ширяев; Луган. нац. аграр. ун-т. – Луганск : Элтон-2, 2011. - 154 с.
8. Матус Ю. В. Інформаційна підтримка технологічного процесу інфрачервоного сушіння зерна / Ю. В. Матус, В. А. Лахно, Т. Ю. Осіпова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2019. – № 7(255). – С. 43-49.
9. Проничев С. А. Автоматическое регулирование температурных режимов при ИК-сушке семенного зерна / С. А. Проничев // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. – 2006. – № 1. – С. 52-53.

### References

1. Tsuglenok, N.V. (2005). Funktsionalnoe opisaniye protsessya sushki zerna [Functional description of the grain drying process]. *Vestnik KrasGAU – Vestnik KrasGAU*, (8), 217–221.
2. Krikunova, L.N., Andrienko, T.V., Chernykh, V.Ia., & Lebedev, A.V. (2007). Vliianie IK-obrabotki zerna pshenitsy i rzhi na parametry protsessya ego izmelcheniia [Effect of IR treatment of wheat and rye grain on the parameters of its grinding process]. *Izvestiia vuzov. Pishchevaia tekhnologiia – News of higher educational institutions. Food technology*, (4), 76-77.
3. Tsuglenok, N.V., Manasian, S.K., & Demskii, S.K. (2007). *Tekhnika i tekhnologiia sushki zerna [Technique and technology of grain drying]*. Krasnoiar. gos. agrar. un-t.
4. Anisimov, A.V. (2013). Sistema avtomaticheskogo upravleniia temperaturoi i vlazhnosti pri podgotovke zerna k pomolu [Automatic control system for temperature and humidity in the preparation of grain for grinding]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova – Bulletin of the Saratov State Agrarian University N.I. Vavilov*, (10), 44-47.
5. Demydov, S.F., Voronenko, B.A., Belyaeva, S.S., & Marchenko, V.Y. (2013). Issledovanie temperaturnogo polia infrakrasnoi nagrevatelnoi sistemy dlia sushki zarodyshei zerna pshenitsy i rzhanykh otrubei [Investigation of the temperature field of an infrared heating system for drying wheat germ germs]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriiia «Protcessy i apparaty pishchevykh proizvodstv» – Scientific Journal of the ITMO Research Institute. Series «Processes and devices of food production»*, (2), 384-396.
6. Kalinichenko, R.A., & Voitiuk, V.D. (2017). Matematichne modeliuвання teplomasoobminnikh protcesiv visokotemperaturnoi termoobrobki zernovikh materialiv [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes of high-temperature heat treatment of grain materials]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy. Seriiia: Tekhnika ta energetika – Scientific Bulletin of NULES of Ukraine. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex*, 275, 59-67.

7. Shiriaev, D.A., & Lakhno, V.A. (2011). *Ispolzovanie kompiuternykh sistem dlia povysheniia effektivnosti informatcionnoi podderzhki infrakrasnoi sushki zerna [The use of computer systems to improve the efficiency of information support for infrared drying of grain]*. Elton-2.

8. Matus, Y.V., Lakhno, V.A., Osipova, T.Iu. (2019). Informatsiina pidtrimka tekhnologichnoho protcesu infrachervonoho sushinnia zerna [Information support of the technological process of infrared grain drying]. *Visnik Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universitetu im. Volodimira Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, (7(255)), 43-49.

9. Pronichev, S.A. (2006). Avtomaticheskoe regulirovanie temperaturnykh rezhimov pri IK-sushke semennogo zerna [Automatic control of temperature regimes during IR drying of seed grain]. *Khranenie i pererabotka selkhozsyria – Storage and processing of agricultural raw materials*, (1), 52-53.

Отримано 25.11.2021

UDC 004[66.04:631.563.2]

**Yurii Matus,<sup>1</sup> Tetiana Osypova<sup>2</sup>, Boris Gusev<sup>3</sup>, Sahun Andrii<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Senior Lecturer of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [umatus@nubip.edu.ua](mailto:umatus@nubip.edu.ua), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-0974-4789>

<sup>2</sup>PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [t\\_osipova@nubip.edu.ua](mailto:t_osipova@nubip.edu.ua), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9199-3436>

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [gusevbs@nubip.edu.ua](mailto:gusevbs@nubip.edu.ua), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1658-7822>

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [a.sagun@nubip.edu.ua](mailto:a.sagun@nubip.edu.ua), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5151-9203>

## INFORMATION TECHNOLOGIES FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS ON INFRARED GRAIN DEHYDRATION

*Rapid growth of information technologies causes the changes in many production processes. The effectiveness of electrotechnical means of infrared radiation is due to the application of new, scientifically grounded methods and means of energy supply control using controllers and personal computers, new information technologies and systems.*

*Therefore, there is a need for further mathematical models development as well as information technology used in decision support systems on infrared grain drying from elevators and granaries.*

*Research and publication analysis on information support questions of grain drying based on infrared radiation technology has shown that the issues of information support systems are currently underexplored in scientific literature.*

*The goal of this research is mathematical modeling of the IR grain drying process and information support development of the drying process, taking into account the obtained mathematical model.*

*The improved model of the infrared drying process for grain crops is proposed, which, in contrast to the existing ones, is focused on application in decision support systems when organizing the drying process. The results of the experiments proved that infrared radiation use contributes to the intensification of the grain drying process due to a significant heat flux rate increasing on the material's irradiated surface and the of infrared rays' penetration into material. It has been proved that modern information technology, rational schemes and operating parameters of infrared grain drying processes utilization will reduce dehydration time with "gentle" drying modes to ensure the required quality parameters of the product.*

*In this work it was first proposed to abandon probabilistic models of grain flow behavior under IR irradiation. A new mathematical model has been proposed based on information about the characteristics of the heat flow, dehydration and grain mass' condition. This will significantly improve the IR grain drying process and get a higher quality product.*

**Keywords:** drying; infrared; grain; computer systems, mathematical model; heat flux.

*Fig.: 5. Table: 4. References: 9.*



**Вячеслав Мамчуровський<sup>1</sup>, В'ячеслав Павлюк<sup>2</sup>, Дарина Прищеп<sup>3</sup>,  
Олена Трунова<sup>4</sup>, Марія Дорош<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>студент

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [slavuta1212@gmail.com](mailto:slavuta1212@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-6048>

<sup>2</sup>студент

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [dashaigor44@gmail.com](mailto:dashaigor44@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2713-8520>

<sup>3</sup>студент

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [prischepadarina@gmail.com](mailto:prischepadarina@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2450-2104>

<sup>4</sup>кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [e.trunova@gmail.com](mailto:e.trunova@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0689-8846>

ResearcherID: [G-3925-2014](https://orcid.org/0000-0003-0689-8846). Scopus Author ID: [57211429427](https://orcid.org/0000-0003-0689-8846)

<sup>5</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [mariyava5536@gmail.com](mailto:mariyava5536@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6537-9857>

ResearcherID: [AAF-2603-2019](https://orcid.org/0000-0001-6537-9857). Scopus Author ID: [56912183600](https://orcid.org/0000-0001-6537-9857)

## НЕЙРО-НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ РІВНЯ УСПІШНОСТІ STARTUP-ПРОЄКТІВ

*У роботі представлено концептуальну нейро-нечітку модель інформаційної технології оцінки рівня успішності startup-проектів, яка використовує комплексний підхід до її формування. Уперше запропоновано використання нечітких даних для інтелектуальної оцінки успішності startup-проектів. Крім прогнозу, представлена система вперше вирішує проблему надання рекомендації для підвищення успішності бізнес-ідей, а також пропонує підбір схожих за критеріальними ознаками startup-проектів. Запропонована 6-рівнева модель визначає основні підходи та технології збереження, обробки та відображення даних, механізми взаємодії між рівнями.*

**Ключові слова:** нейро-нечітка модель; оцінка startup-проектів; менеджмент startup-проектів; автоматичні інформаційні системи; конвергенція startup-проектів.

Рис.: 2. Табл.: 2. Бібл.: 19.

**Актуальність теми дослідження.** На сьогодні startup-проекти є однією з головних рушійних сил як економічного, так і технологічного розвитку. Передові інновації, відкриття нових і модернізація вже наявних ринків, стимуляція конкуренції, створення нових робочих місць – усі ці фактори підтверджують неабияку корисність startup-проектів для розвитку та зростання світової економіки [1; 2; 3]. Однак при цьому існує і невтішна статистика, що констатує невдачу близько 90 % всіх проектів через помилкове визначення ринкового попиту (42 % випадків), нестабільне фінансування (29 % випадків) тощо [4]. Саме тому нині доволі актуальним напрямком досліджень є розробка методів і моделей для оцінювання та прогнозування успішності startup-проектів та інформаційної підтримки реалізації таких моделей.

**Постановка проблеми.** На сьогодні вже є спроби застосування нейро-нечіткого моделювання успішності startup-проектів, але лише в контексті їхньої інвестиційної привабливості [17]. Дослідження на тему використання нейро-нечітких систем для комплексної оцінки рівня успішності startup-проектів взагалі відсутні, що лише підкреслює необхідність створення та подальшої реалізації такої системи в силу її беззаперечної актуальності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних моделях прогнозу успішності startup-проектів використовують доволі різноманітні інформаційні технології, які забезпечують реалізацію статистичних моделей, зокрема, логістичної регресії (Logistic Regression), ROC-індекс якої становить 0,81, а частка правильних відповідей (accuracy) – 86 % [5; 6]. Серед моделей, що використовують штучний інтелект (ШІ), можна відзначити нейронні мережі (Neural Network), які для навчання потребують достатньо велику

кількість попередньо оброблених даних. Наприклад, у роботі [5] використовують набір даних із платформи Crunchbase про більше ніж 15 000 компаній, де як фактори авторами було виділено фінансові (розмір інвестицій на кожному раунді фінансування, поточна ринкова вартість тощо) та управлінські (кількість співробітників, місце розташування, новини про компанію в мережі Інтернет тощо) змінні.

Також велика кількість робіт присвячена так званим ансамблевим методам машинного навчання. Наприклад, у дослідженні [7] для виконання прогнозу успішності виступали такі методи, як випадковий ліс (Random Forest) і градієнтний бустинг (Extreme Gradient Boosting), які, навчаючись на даних із мінімальною інформацією про підприємця та/чи характеристики команди керівників, досягають значення точності більше ніж 94 %.

Не можна не відзначити підхід, запропонований у роботі [8], який полягає в розробці методу гібридного інтелекту (Hybrid Intelligence). Це поєднання можливостей машинного (техніки для обробки великих масивів даних) та колективного (інтуїція) розумів для аналізу кількісної та «м'якої» (тієї, що не можна підрахувати) інформації в умовах ризику та невизначеності. Проте цей метод призначений для прогнозування успіху тільки для проєктів, які перебувають на ранньому етапі розвитку.

У роботах [9-12] обґрунтовується актуальність та доцільність створення систем, які б використовували апарат нечіткої математики та здійснювали комплексне й багатofакторне оцінювання startup-проєктів. Однак такі системи не позбавлені недоліків нечітких систем, які перераховані у дослідженні [13]: проблеми пошуку функцій належності, потреба у кваліфікованому експерті для визначення правил, цілковита прив'язаність до наявних у системі правил.

Саме тому доволі популярними стали дослідження можливостей комбінації двох принципово різних математичних конструкцій: нейронних мереж і нечіткої логіки, яка б компенсувала їх недоліки. Зауважимо, що нейро-нечіткі системи успішно використовуються для вирішення таких задач, як прогнозування часових рядів й ідентифікації динамічних систем [14], вирішення типових геотехнічних проблем [15], оцінювання об'єкта за багатьма критеріями [16] тощо.

**Виділення недосліджених частин.** У більшості з розглянутих вище моделей аналізу та оцінки startup-проєктів навчання ґрунтується на чітких, кількісних даних. При цьому надати точні дані відносно startup-проєкту далеко не завжди можливо, особливо на його початкових стадіях, коли більшість факторів можна описати лише узагальнено, нечітко. Окрім прогнозу наведені системи не пропонують користувачу стратегій подальшого розвитку, порад та підбору схожих startup-проєктів.

**Метою** цього дослідження є підтримка прийняття рішень при створенні startup-проєктів за допомогою розробки автоматизованої інформаційної системи комплексної оцінки рівня успішності startup-проєктів.

**Виклад основного матеріалу.** Зважаючи на актуальність цієї теми, було запропоновано таке математичне представлення моделі оцінки рівня успішності startup-проєктів, яку можна надати у вигляді мультиплікаційної згортки:

$$f: F_1 \times F_2 \times \dots \times F_n \times \tilde{Q}(q_1) \times \tilde{Q}(q_2) \times \dots \times \tilde{Q}(q_m) \rightarrow \tilde{SP}(\tilde{S}_{F_1}, \tilde{S}_{F_2}, \dots, \tilde{S}_{F_r}), \quad (1)$$

де  $F_1, F_2, \dots, F_n$  – масив обраних користувачем критеріальних ознак успішності startup-проєкту;

$\tilde{Q}(q_1), \tilde{Q}(q_2), \dots, \tilde{Q}(q_m)$  – масив нечітких відповідей на питання;

$\tilde{S}_{F_1}, \tilde{S}_{F_2}, \dots, \tilde{S}_{F_r}$  – масив нечітких критеріальних ознак успішності startup-проєкту;

$\tilde{SP}$  – нечітка оцінка рівня успішності startup-проєкту.

Концептуальну схему нейро-нечіткої моделі інформаційної технології комплексної оцінки рівня успішності startup-проєктів наведено на рис. 1.

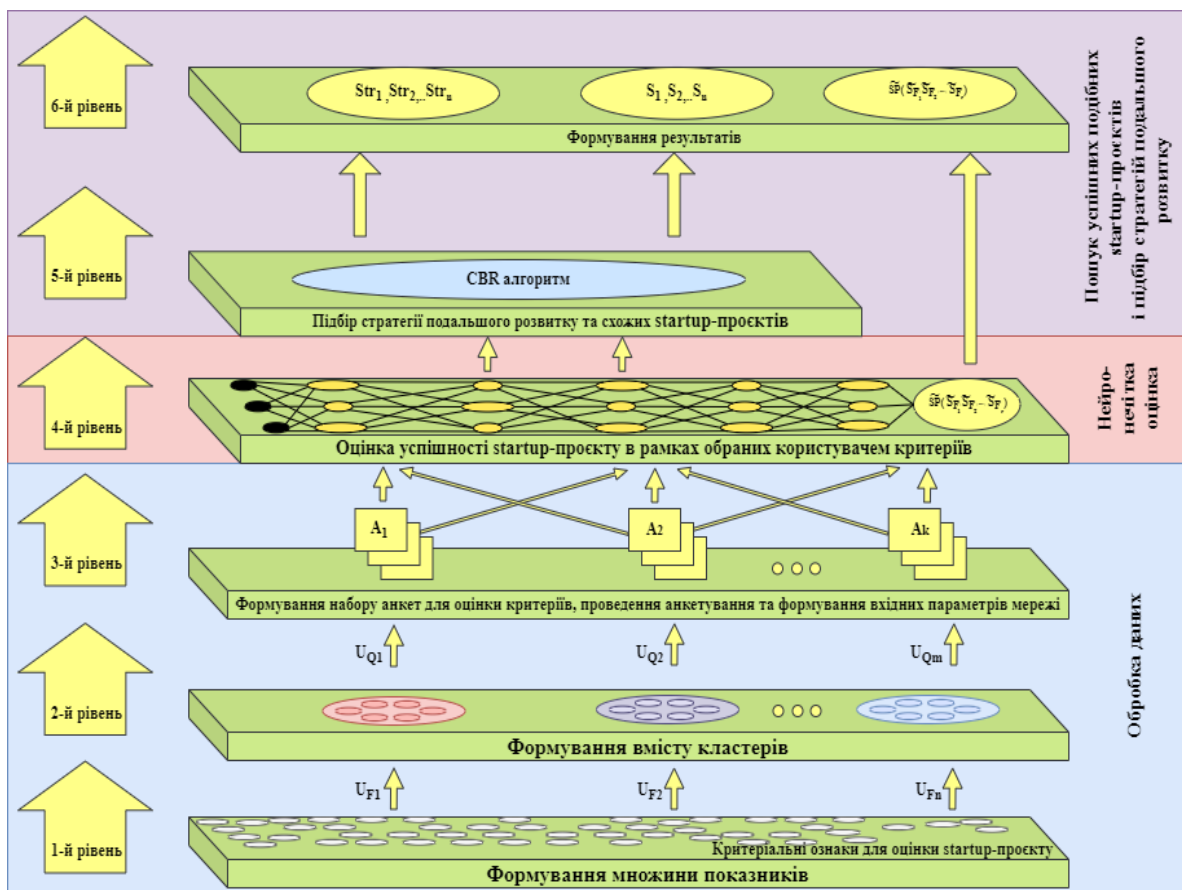


Рис. 1. Концептуальна схема нейро-нечіткої моделі інформаційної технології комплексної оцінки рівня успішності startup-проектів

Джерело: ророблено авторами.

Запропонована модель складається з шести основних рівнів обробки даних.

Перший рівень відповідає за формування множини критеріальних ознак успішності startup-проекту  $U_F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ , а також відповідних наборів для їх аналізу  $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ , які складаються з множини питань  $U_Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ . Під критеріальною ознакою розуміється ознака, що впливає на успішність startup-проекту (слухність ідеї, розмір ринку, склад команди тощо). Серед 52 критеріальних ознак користувач обирає ті, що вважає важливими для своєї бізнес-ідеї. Для збереження ознак пропонується створити окрему таблицю у базі даних (БД). Також необхідно створити таблицю для збереження питань. Критеріальні ознаки та питання для їх аналізу будуть пов'язані між собою зв'язком типу  $1:m$ , де одна ознака може містити  $m$  питань.

Також автоматизована система передбачає створення наборів із критеріальних ознак «за замовчуванням», їх можна використовувати за бажанням користувача. Такі набори пропонується зберігати у вигляді окремої таблиці БД. Залежності між наборами та ознаками визначені у вигляді зв'язку типу  $1:n$ , де один набір може містити  $0 < n \leq 52$  критеріальних ознак.

Після проходження першого етапу буде сформовано набір ознак для оцінки рівня успішності startup-проекту, де кожна ознака містить відповідні питання. Отриманий набір формує індивідуальний кластер  $C_k = \bigcup_{k=1}^n F_k$ , де  $F_k$  – множина критеріальних ознак вибраних  $k$ -м користувачем.

*Другий рівень* моделі відповідає за оптимізацію вмісту кластерів  $C_k = \bigcup_{k=1}^n F_k \subset U_k$ , зокрема за допомогою кореляційного аналізу (серед питань, що мають високий рівень кореляції, експертним шляхом виділяють більш значущі). Кореляційні залежності пропонується зберігати у створеній таблиці питань бази даних. Такий підхід забезпечує можливість виключення однакових питань для оцінки критеріальних ознак.

Після проведення кореляційного аналізу визначається ступінь значущості кожного питання, що використовується при формуванні оцінки критеріальної ознаки, а також впливу кожної з них на всю ієрархію показників оцінки startup-проєкту. Для розв'язання поставленої задачі розрахунку ваги ознак та питань всередині них пропонується використати метод аналізу ієрархій (MAI) [18].

Вихідними параметрами будуть вектори значущості питань  $w_{q_k}^1, w_{q_k}^2, \dots, w_{q_k}^r$ , де  $w_{q_k}^1 + w_{q_k}^2 + \dots + w_{q_k}^r = 1$ .

*Третій рівень.* Після проходження перших двох рівнів нейро-нечіткої моделі будуть сформовані анкети  $A_1, A_2, \dots, A_k$ , які стануть результатом видалення питань, що повторюються, а також малозначущих питань та критеріальних ознак ( $w_{q_k}^r \leq 0,05$ ) для оцінки успішності startup-проєкту. Після створення таких анкет користувачу пропонується відповісти на набір питань кожної з них.

Припускається, що за відповідь на питання користувач може отримати відповідну кількість балів, що змінюється від 0 (у разі, якщо питання було пропущене) до 1. При цьому оцінка варіантів відповідей здійснюється експертами та заноситься до відповідної таблиці у БД. Передбачається, що між таблицями питань і варіантів відповідей існуватиме зв'язок типу 1:m, де одне питання міститиме  $m$  варіантів відповіді.

На основі отриманих балів за відповіді на питання формується нечітка оцінка кожної критеріальної ознаки, що визначається за формулою:

$$\tilde{S}_{F_i} = \sum_{j=1}^{r_i} w_{q_{ij}} \tilde{Q}(q)_{ijk}, \quad (2)$$

де  $r_i$  – кількість питань з  $i$ -ої критеріальної ознаки;

$w_{q_{ij}}$  – вага  $j$ -го питання стосовно  $i$ -ої критеріальної ознаки;

$\tilde{Q}(q)_{ijk}$  – лінгвістична оцінка  $j$ -го питання  $i$ -ої критеріальної ознаки для  $k$ -ої анкети.

Отримані оцінки будуть представлені у вигляді лінгвістичних змінних залежно від її значення. Можливі варіанти значень наведені в табл. 1. Необхідно зауважити, що оцінку NA (невизначений) можливо отримати лише якщо користувач не відповість на жодне питання для аналізу критеріальної ознаки. Результатом роботи цього рівня стане набір отриманих лінгвістичних змінних.

Таблиця 1

Таблиця представлення лінгвістичних змінних оцінки критеріальної ознаки щодо інтервалів значень

Назва терму	Умовне позначення	Інтервал значень
Високий	H	[100;80)
Вище середнього	HA	[80;50)
Середній	A	[50;30)
Низький	L	[30;0)
Невизначений	NA	0

*Четвертий рівень* моделі відповідальний за оцінку успішності startup-проєкту в рамках критеріїв, яку планується отримувати на основі роботи ієрархічної системи нейро-нечітких мереж, що наведено нижче на рис. 2.

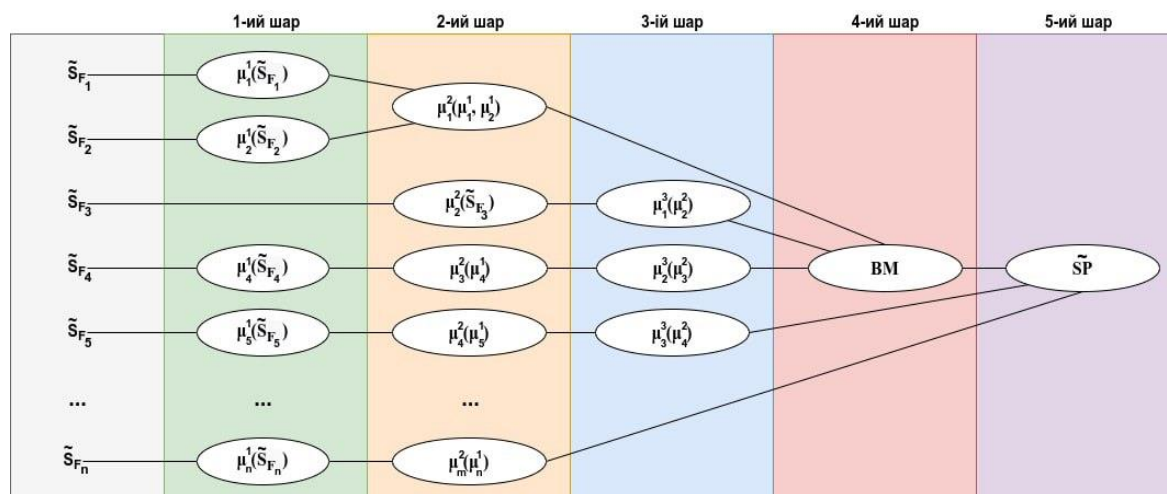


Рис. 2. Ієрархічна система нейро-нечітких мереж

Джерело: ророблено авторами.

На вхід нейро-нечіткої мережі першого шару подаються нечіткі оцінки критеріальних ознак startup-проєкту ( $\tilde{S}_{F_1}, \tilde{S}_{F_2}, \dots, \tilde{S}_{F_n}$ ), які визначають його успішність. Кожна ознака є агрегованою кількісною оцінкою, що отримана за допомогою функцій належності, зокрема на першому шарі маємо:  $\mu(\tilde{S}_F) = (\mu(\tilde{S}_{F_1}), (\mu(\tilde{S}_{F_2}), \dots, \mu(\tilde{S}_{F_n})))$  на інтервалі  $[0;1]$ .

У процесі налаштування системи визначається вага кожної критеріальної ознаки ( $W_{F_1}, W_{F_2}, \dots, W_{F_n}$ ), де  $W_{F_1} + W_{F_2} + \dots + W_{F_n} = 1$ , і функція належності з найкращим, тобто найменшим, показником помилки на основі контрольної вибірки. При цьому розглядаються такі функції належності: трикутна (triangular MF), трапецієподібна (trapezoidal MF), Гауссова (Gaussian MF) та дзвоноподібна (generalized bell MF).

Нейро-нечітка мережа являє собою ієрархічну систему нейро-нечітких підмереж, що характеризуються агрегованими кількісними оцінками  $\mu_n^l$ , де  $n$  – кількість критеріальних ознак,  $l$  – номер шару. Переходи до наступних шарів здійснюються засобами лінгвістичних моделей, що ґрунтуються на множинах нечітких правил. Мережі наступних шарів – результати роботи мереж попередніх, на основі яких спочатку отримується нейро-нечітка оцінка бізнес-моделі startup-проєкту  $BM$ , і наприкінці остаточна – агрегована нечітка оцінка  $\tilde{S}P$ .

Слід відзначити, що для кожної з нейро-нечітких мереж набір правил формується на основі навчальної вибірки, що зберігається у відповідній таблиці бази даних.

На виході отримуємо дефазифіковану нечітку оцінку рівня успішності startup-проєкту:

$$\tilde{S}P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{r_i} W_{F_i} w_{qij} \tilde{Q}(q)_{ijk}, \tag{3}$$

де  $r_i$  – кількість питань з  $i$ -ої критеріальної ознаки;

$w_{qij}$  – вага  $j$ -го питання стосовно  $i$ -ої критеріальної ознаки;

$W_{F_i}$  – вага  $i$ -ої критеріальної ознаки (визначається нейро-мережею);

$\tilde{Q}(q)_{ijk}$  – лінгвістична оцінка  $j$ -го питання  $i$ -ої критеріальної ознаки для  $k$ -ої анкети.

*П'ятий рівень.* Отримавши набір нечітких оцінок  $\{\tilde{S}_{F_1}, \tilde{S}_{F_2}, \dots, \tilde{S}_{F_n}\}$  критеріальних ознак обраних на попередньому рівні, серед яких можуть бути: ідея, склад команди, ключові партнери тощо, можна здійснити пошук подібних startup-проєктів та підбір стратегій подальшого їхнього розвитку. Ці функції пропонується реалізувати за допомогою визна-

чення конвергенції, для чого можна використати метод найближчих відстаней [19]. Конвергенція буде представлена у вигляді чисельного значення в діапазоні від 0 до 1 і розраховується за формулою:

$$Conv_j = \sqrt{\sum_{i=1}^r (1 - \frac{\tilde{S}_{ij}}{\tilde{S}_{ij_{\text{ET}}})}, \quad (4)$$

де  $r$  – кількість питань;

$\tilde{S}_{ij}$  – нечітке значення критеріальної ознаки в  $j$ -ому кластері;

$\tilde{S}_{ij_{\text{ET}}}$  – нечітке еталонне значення (найвища оцінка) критеріальної ознаки в  $j$ -ому кластері.

Тоді можна буде зробити висновок про схожість збережених у базі даних показників еталонних (успішних) startup-проектів із введеними користувачем, та відібрати ті, для яких значення конвергенції не менше ніж 70 %.

Також пропонується створення окремої бази даних, що буде використовуватись для зберігання множини стратегій  $U_{Str} = \{Str_1, Str_2, \dots, Str_n\}$ , які можуть бути запропоновані для підвищення успішності проекту залежно від обраних критеріальних ознак та їх нечітких оцінок, а також для збереження множини успішних startup-проектів  $U_s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , які будуть використовуватися як  $\tilde{S}_{ij_{\text{ET}}}$ .

Результатом роботи цього рівня є підібрані подібні startup-проекти, що матимуть конвергенцію не менше за 70 %, а також сформована індивідуальна стратегія підвищення успішності бізнес-ідеї, приклади якої наведені в табл. 2.

Таблиця 2

*Приклади індивідуальної стратегії підвищення успішності бізнес-ідеї*

Стратегія	Вхідні критеріальні ознаки	Нечіткий вектор ознак	Опис
1	2	3	4
$Str_1$	$i_1$ – новизна ідеї; $i_2$ – унікальність ідеї; $i_3$ – задоволення суспільних потреб; $i_9$ – комерційна привабливість	{L,A,H,A}	Ви можете мати конкурентну перевагу за рахунок швидкого виведення модернізованого продукту на освоєні та нові ринки. Проведіть більш глибокий аналіз конкурентів. Проведіть більш глибокий аналіз споживачів та визначте цінність продукту для різних сегментів споживачів. Терміново оформляйте права на власність. Якомога швидше виводьте продукт на ринок. Оцініть доцільність подальшої реалізації через поглиблений аналіз потреб споживачів. Проведіть ретельний аналіз позиціонування продукту на ринку.
$Str_2$	$i_4$ – відповідність духу й часу, $i_5$ – практична доцільність, $i_6$ – попередній досвід, $i_7$ – галузь застосування	{L,L,LA,A}	Адаптуйте технології для створення інших (нових) продуктів. Адаптуйте ідеї під технічні та технологічні реалії, або відкладіть реалізацію з поступовим її удосконаленням. Проведіть детальний проектний аналіз (технічний, технологічний, економічний, інституціональний, екологічний та ін.). Проведіть аналіз втрачених можливостей та залучіть успішних фахівців цієї галузі для підвищення ефективності виробництва та реалізації наявного продукту.
...			

Закінчення табл. 2

1	2	3	4
$Str_n$	$i_5$ – практична доцільність, $i_6$ – попередній досвід, $i_7$ – галузь застосування	{Н,А,Н}	Проведіть патентування та забезпечте швидкий вихід на ринок. Проведіть спільні розробки з постачальниками та підрядниками, а потім зосередьтеся на укладанні угод на першочергове право використання продукту та послуг. Проведіть роботу з фокус-групами та залежно від вимог споживачів швидко адаптуйте проблеми у результат. Забезпечте тісний зв'язок із споживачами (за допомогою окремих відомих фахівців). Забезпечте циклічність виходу продукту, побудуйте кампанію агресивного маркетингу та створіть нові (лімітовані) версії (наприклад, сезонні продукти). Підтримуйте зацікавленість інвесторів за рахунок розробки та впровадження спільних довгострокових інвестиційних проєктів.

*Шостий рівень.* На останньому етапі будуть відформатовані, інтерпретовані «зрозумілою» для користувача мовою та виведені такі результати:

- набори схожих startup-проєктів  $S_1, S_2, \dots, S_n$  для використання їхнього досвіду у власній бізнес-ідеї;
- набори індивідуальних стратегій подальшого розвитку  $Str_1, Str_2, \dots, Str_n$  для забезпечення успішності проєкту за обраними користувачем критеріями;
- висновок відносно рівня успішності startup-проєкту.

**Висновки.** Розроблена нейро-нечітка модель інформаційної технології комплексної оцінки рівня успішності startup-проєктів складається з трьох основних підсистем: підсистема обробки даних, яка буде виконувати функції перших трьох рівнів; підсистема нейро-нечіткої оцінки startup-проєкту, що буде результатом 4-го рівня; підсистема пошуку подібних успішних startup-проєктів і підбору стратегій подальшого розвитку власних бізнес-ідей – 5-й і 6-й рівні.

Загалом ця система дозволить здійснювати підтримку прийняття рішень шляхом отримання оцінки успішності та сформованої індивідуальної стратегії для досягнення успіху бізнес-ідеї, а також дозволить використовувати досвід схожих за обраними критеріями startup-проєктів.

Для створення підсистем підбору стратегій подальшого розвитку startup-проєкту, а також пошуку успішних startup-проєктів може бути використана мова програмування Python, у той час як для реалізації ієрархічної системи нейро-нечітких мереж будуть розглядатися можливості мов програмування Python, Java, R і MATLAB.

Зважаючи на актуальність запропонованої моделі, подальші дослідження можуть бути пов'язані з її програмною реалізацією. З метою підвищення швидкості роботи та безпеки системи пропонується створення окремих баз даних, що використовуватимуться для збереження необхідних для функціонування моделі даних.

#### Список використаних джерел

1. The Impact of Startup on Global Economy [Electronic resource]. – Access mode: <https://bit.ly/33PWUJr>.
2. How Startups Drive the Economy [Electronic resource]. – Access mode: <https://bit.ly/3EqHI2a>.
3. Tool-Based Support of University-Industry Cooperation in IT-Engineering : monograph / V. V. Lytvynov, V. S. Kharchenko, S. V. Lytvyn, M. V. Saveliev, E. V. Trunova, I. S. Skiter. – Chernihiv : Chernihiv National University of Technology, 2015. – 108 p.



4. 106 Must-Know Startup Statistics for 2021 [Electronic resource]. – Access mode: <https://bit.ly/3mz81wX>.
5. Shah V. Predicting the success of a startup company [Electronic resource] / V. Shah. – 2019. – Access mode: <https://www.sas.com/content/dam/SAS/support/en/sas-global-forum-proceedings/2019/3878-2019.pdf>.
6. Veloso F. Predicting startup success in the U.S. / F. Veloso. – 2020.
7. Ünal C. Searching for a Unicorn: A Machine Learning Approach Towards Startup Success Prediction / C. Ünal. – 2019. – DOI: 10.18452/20347.
8. Finding the Unicorn: Predicting Early Stage Startup Success Through a Hybrid Intelligence Method / D. Dellermann, N. Lipusch, P.A. Ebel, K.M. Popp, J.M. Leimeister // *Econometric Modeling: Corporate Finance & Governance eJournal*. – 2017. – DOI: 10.2139/ssrn.3159123.
9. Model of start-ups assessment under conditions of information uncertainty / N. Malyar, V. Polishchuk, M. Sharkadi, I. Liakh // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 3. – Pp. 43-49. – DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71222.
10. Comprehensive Risk Management using Fuzzy FMEA and MCDA Techniques in Highway Construction Projects / M. Ahmadi, K. Behzadian, A. Ardeshir, Z. Kapelan // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2016. – Vol. 23. – Pp. 300-310. – DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1068847>.
11. Університетсько-індустріальна кооперація. Інтелектуальна знання-орієнтована система прийняття рішень. Вимоги, алгоритми, верифікація і застосування / під ред. Ю. П. Кондратенка, В. С. Харченка ; Міністерство освіти та науки України, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ». – Харків, 2017. – 297 с.
12. Mathematical methods of identification of Ukrainian enterprises competitiveness level by fuzzy logic using [Електронний ресурс] / A. Azarova, O Zhytkevych // *Економічний часопис-XXI*. – 2013. – № 9-10(2). – С. 59-62. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/297477424\\_Mathematical\\_methods\\_of\\_identification\\_of\\_ukrainian\\_enterprises\\_competitiveness\\_level\\_by\\_fuzzy\\_logic\\_using](https://www.researchgate.net/publication/297477424_Mathematical_methods_of_identification_of_ukrainian_enterprises_competitiveness_level_by_fuzzy_logic_using).
13. Vieira J. Neuro-Fuzzy Systems: A Survey [Electronic resource] / J. Vieira, F. Morgado-Dias, A. Mota // *WSEAS Transactions on Systems*. – 2004. – Vol. 3. – Pp. 414-419. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/242073375\\_Neuro-Fuzzy\\_Systems\\_A\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/242073375_Neuro-Fuzzy_Systems_A_Survey).
14. Nürnberger A. A hierarchical recurrent neuro-fuzzy system [Electronic resource] / A. Nürnberger // *Proceedings Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference (Cat. No. 01TH8569)*. – 2001. – Vol. 3. – Pp. 1407-1412. – Access mode: <http://www.gbv.de/dms/goettingen/193650843.pdf>.
15. Hndoosh R. Fuzzy and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System of Washing Machine [Electronic resource] / R. Hndoosh, M. Saroa, S. Kumar // *European Journal of Scientific Research*. – 2012. – Vol. 86. – Pp. 1450-216. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/269928118\\_Fuzzy\\_and\\_Adaptive\\_Neuro-Fuzzy\\_Inference\\_System\\_of\\_Washing\\_Machine](https://www.researchgate.net/publication/269928118_Fuzzy_and_Adaptive_Neuro-Fuzzy_Inference_System_of_Washing_Machine).
16. Neuro-fuzzy multicriteria assessment model / N. Malyar, A. Polishchuk, V. Polishchuk, M. Sharkadi // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2019. – Pp. 83-91. – Access mode <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-4-8>.
17. Kiseleva E. Valuation of Startups Investment Attractiveness Based on Neuro-Fuzzy Technologies / E. Kiseleva, O. Prytomanova, S. V. Zhuravel // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2016. – Vol. 48. – Pp. 1-22. – DOI:10.1615/JAUTOMATINFSCIEN.V48.I9.10.
18. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process / T. L. Saaty // *Int. J. Services Sciences*. – 2008. – Vol. 1(1). – Pp. 83-97. – Access mode: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
19. The study of participants' values convergence on the example of international scientific project on cyber security / M. Dorosh, O. Trunova, D. Itchenko, M. Voitsekhovska, M. Dvoieglazova // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 6/3(84). – Pp. 4-10. – DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85215.



### References

1. The Impact of Startup on Global Economy. <https://bit.ly/33PWUJr>.
2. How Startups Drive the Economy. <https://bit.ly/3EqHI2a>.
3. Lytvynov, V.V., Kharchenko, V.S., Lytvyn, S.V., Saveliev, M.V., Trunova, E.V., & Skiter, I.S. (2015). *Tool-Based Support of University-Industry Cooperation in IT-Engineering*. Chernihiv National University of Technology.
4. 106 Must-Know Startup Statistics for 2021. <https://bit.ly/3mz81wX>.
5. Shah, V. (2019). *Predicting the success of a startup company*. <https://www.sas.com/content/dam/SAS/support/en/sas-global-forum-proceedings/2019/3878-2019.pdf>.
6. Veloso, F. (2020). *Predicting startup success in the U.S.*
7. Ünal, C. (2019). *Searching for a Unicorn: A Machine Learning Approach Towards Startup Success Prediction*. DOI 10.18452/20347.
8. Dellermann, D., Lipusch, N., Ebel, P.A., Popp, K.M., & Leimeister, J.M. (2017). Finding the Unicorn: Predicting Early Stage Startup Success Through a Hybrid Intelligence Method. *Econometric Modeling: Corporate Finance & Governance eJournal*. DOI: 10.2139/ssrn.3159123.
9. Malyar, N., Polishchuk, V., Sharkadi, M., & Liakh, I. (2016). Model of start-ups assessment under conditions of information uncertainty. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 43-49. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71222
10. Ahmadi, M., Behzadian, K., Ardeshir, A., & Kapelan, Z. (2016). Comprehensive Risk Management using Fuzzy FMEA and MCDA Techniques in Highway Construction Projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23, 300-310. DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1068847>.
11. Kondratenko, Yu.P., Kharchenko, V.S. (Eds.). (2017). *Universytetsko-industrialna kooperatsiia. Intelektualna znannia-oriietovana systema pryiniattia rishen. Vymohy, alhorytmy, veryfikatsiia i zastosuvannia [University-industrial cooperation. Intellectual knowledge-oriented decision-making system. Requirements, algorithms, verification and application]*. Chornomorskyi natsionalnyi universytet im. Petra Mohyly, Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet im. M. Ye. Zhukovskoho «KhAI».
12. Azarova, A. & Zhytkevych, O. (2013). Mathematical methods of identification of Ukrainian enterprises competitiveness level by fuzzy logic using. *Economic Journal-XXI*, 9, 59-62. [https://www.researchgate.net/publication/297477424\\_Mathematical\\_methods\\_of\\_identification\\_of\\_ukrainian\\_enterprises\\_competitiveness\\_level\\_by\\_fuzzy\\_logic\\_using](https://www.researchgate.net/publication/297477424_Mathematical_methods_of_identification_of_ukrainian_enterprises_competitiveness_level_by_fuzzy_logic_using).
13. Vieira, J., Morgado-Dias, F., & Mota, A. (2004). Neuro-Fuzzy Systems: A Survey. *WSEAS Transactions on Systems*, 3, 414-419. [https://www.researchgate.net/publication/242073375\\_Neuro-Fuzzy\\_Systems\\_A\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/242073375_Neuro-Fuzzy_Systems_A_Survey).
14. Nürnberger, A. (2001). A hierarchical recurrent neuro-fuzzy system. *Proceedings Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference (Cat. No. 01TH8569)*, 3, 1407-1412. <http://www.gbv.de/dms/goettingen/193650843.pdf>.
15. Hndoosh, R., Saroa, M., & Kumar, S. (2012). Fuzzy and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System of Washing Machine. *European Journal of Scientific Research*, 86, 1450-216. [https://www.researchgate.net/publication/269928118\\_Fuzzy\\_and\\_Adaptive\\_Neuro-Fuzzy\\_Inference\\_System\\_of\\_Washing\\_Machine](https://www.researchgate.net/publication/269928118_Fuzzy_and_Adaptive_Neuro-Fuzzy_Inference_System_of_Washing_Machine).
16. Malyar, N., Polishchuk, A., Polishchuk, V.V., & Sharkadi, M. (2019). Neuro-fuzzy multicriteria assessment model. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 83-91. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-4-8>.
17. Kiseleva, E., Prytomanova, O., & Zhuravel, S.V. (2016). Valuation of Startups Investment Attractiveness Based on Neuro-Fuzzy Technologies. *Journal of Automation and Information Sciences*, 48, 1-22. DOI:10.1615/JAUTOMATINFSCIEN.V48.I9.10.
18. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int J Serv Sci*, 1(1), 83-97. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).
19. Dorosh, M., Trunova, O., Itchenko, D., Voitsekhovska, M., Dvoieglazova, M. (2016). The study of participants' values convergence on the example of international scientific project on cyber security. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/3(84), 4-10. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85215.

Отримано 25.11.2021

UDC 004.94

***Viacheslav Mamchurovskyi<sup>1</sup>, Viacheslav Pavliuk<sup>2</sup>, Daryna Pryshepa<sup>3</sup>,  
Olena Trunova<sup>4</sup>, Mariia Dorosh<sup>5</sup>***

<sup>1</sup>Student

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [slavuta1212@gmail.com](mailto:slavuta1212@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7552-6048><sup>2</sup>Student

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [dashaigor44@gmail.com](mailto:dashaigor44@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2713-8520><sup>3</sup>Student

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [prischepadarina@gmail.com](mailto:prischepadarina@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2450-2104><sup>4</sup>PhD in Pedagogical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Information Technology and Software Engineering

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [e.trunova@gmail.com](mailto:e.trunova@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0689-8846>ResearcherID: [G-3925-2014](https://orcid.org/0000-0003-0689-8846). Scopus Author ID: [57211429427](https://orcid.org/0000-0003-0689-8846)<sup>5</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Information Technologies and Software Engineering Department

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [mariyava5536@gmail.com](mailto:mariyava5536@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6537-9857>ResearcherID: [AAF-2603-2019](https://orcid.org/0000-0001-6537-9857). Scopus Author ID: [56912183600](https://orcid.org/0000-0001-6537-9857)

## **NEURO-FUZZY MODEL OF INFORMATION TECHNOLOGY OF COMPLEX ASSESSMENT OF SUCCESS LEVEL OF STARTUP PROJECTS**

*Nowadays, there are sad statistics that about 90% of all startups have failed. That is why the development of methods and models for predicting the success of startup projects is significant.*

*There is no research on using neuro-fuzzy systems for a startup success integrated assessment. This statement only emphasizes the need to develop and implement such a system due to its undeniable relevance.*

*Fuzzy systems are widespread in modern startup success forecasting models, but they have disadvantages like finding membership functions, the need for an expert to determine the rules and total adherence to the existing system rules. That is why the search for the possibilities to combine neural networks and fuzzy logic has become quite popular.*

*Most of the existing analysis and projects evaluation models use accurate data-based training, but it is not always possible to provide accurate startup data.*

*The purpose of this research is to support decision-making in the creation of startup projects through the development of an automated information system for a comprehensive assessment of the startup success.*

*A neuro-fuzzy information technology model for startup success level integrated assessment has been developed, consisting of 3 main subsystems. The data processing subsystem, subsystem of neuro-fuzzy assessment for projects, subsystem for searching for successful startup projects and selecting strategies for further startup development.*

*The complex information system will allow you to get a success assessment, an individually formed strategy for project development, and use the experience of similar startups in the development.*

**Keywords:** *neuro-fuzzy model; evaluation of startup projects; management of startup projects; automatic information systems; convergence of startup projects.*

*Fig.: 2. Table: 2. References: 19.*

**Ольга Рибак**

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та дизайну  
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

E-mail: [olga.vol.rybak@gmail.com](mailto:olga.vol.rybak@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0250-3037>

SCOPUS Author ID: [57208656221](https://orcid.org/57208656221)

## ЗАСТОСУВАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ШЛІФУВАННЯ

*У статті розглянуто задачу визначення режимів шліфування за допомогою еволюційних методів оптимізації. З метою запобігання передчасній збіжності алгоритму важливо забезпечити поступову концентрацію набору розв'язків у напрямку області глобального екстремуму. Для цього параметри алгоритму мають бути налаштовані таким чином, щоб забезпечити покращення середньої пристосованості популяції на основі отриманих рішень та одночасний пошук нових рішень в області допустимих розв'язків. Результати оптимізації технологічного процесу шліфування за допомогою представленого еволюційного алгоритму, класичного генетичного алгоритму, методу мурашиної колонії, методу рою часток та методу розсіювання виявили перевагу запропонованого підходу з погляду швидкості збіжності при незмінній надійності для всіх алгоритмів.*

**Ключові слова:** еволюційні методи; оптимізація; параметри шліфування; генетичний алгоритм; швидкість збіжності.

Рис.: 6. Бібл.: 18.

**Актуальність теми дослідження.** При розробці системи автоматизованого проектування технологічного процесу шліфування постає задача вибору оптимальних параметрів обробки, що забезпечують найкраще значення цільової функції та виконання комплексу граничних і обмежувальних умов, покликаних забезпечити необхідну якість поверхні. Оскільки залежно від особливостей конкретного технологічного процесу, таких цільових функцій може бути декілька, задача перетворюватиметься на багатокритеріальну оптимізацію, а самі критерії оптимальності, такі як продуктивність, можуть бути нелінійними. Вирішення цієї задачі за допомогою традиційних методів математичного програмування та чисельних методів зазвичай виявляється недостатньо ефективним, а тому впродовж останніх років розвиваються та набувають дедалі більшої поширеності еволюційні методи визначення оптимальних режимів технологічного процесу обробки.

**Постановка проблеми.** Одним з основних еволюційних методів пошуку оптимальних значень параметрів багатокритеріальної задачі є генетичні алгоритми. Перевага класичного генетичного алгоритму полягає у його швидкій збіжності. Але швидка збіжність може стати важливим недоліком у випадку збіжності до локального екстремуму, адже тоді не вдається знайти значення оптимальних параметрів для глобального екстремуму. Крім того, перешкодити правильному визначенню режимів обробки можуть загальний низький рівень пристосованості отриманих розв'язків та значні коливання середніх значень пристосованості у послідовності поколінь. Саме тому постає питання адаптації еволюційних методів для задачі вибору режиму шліфування з урахуванням особливостей цього технологічного процесу та засобів запобігання можливим ускладненням під час розв'язку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед робіт, присвячених дослідженню питання визначення оптимального режиму шліфування, пропонуються різні способи розв'язку поставленої задачі та наводяться їхні особливості.

У роботі [1] формулювання та вирішення задачі вибору параметрів обробки розглянуто з погляду квадратичного програмування. У ролі змінних обрано швидкість шліфувального круга, швидкість подачі та параметри правки, а цільові функції включають загальну вартість та продуктивність процесу, а також шорсткість обробленої поверхні.

У роботі [2] представлено пошук множини Парето оптимальних розв'язків задачі шліфування за допомогою багатокритеріального еволюційного алгоритму. Отримані результати виявилися кращими в порівнянні з іншими методами.

У роботі [3] зроблено спробу адаптації генетичного алгоритму для оптимізації процесу шліфування на основі математичної моделі, представленій в роботі [1]. Попри низку переваг, у цього методу існує висока ймовірність збіжності до локального екстремуму, що перешкоджає розв'язку цієї задачі.

Автори роботи [4] виконали пошук оптимальних значень параметрів шліфування за допомогою алгоритму оптимізації мурашиної колонії, що ґрунтується на моделюванні руху мурах, розміщених у вершинах уявного графа, з певною ймовірністю вибору того чи іншого маршруту. Результат роботи алгоритму для даної задачі виявився достатньо ефективним.

Роботи [5-7] присвячені дослідженню впливу параметрів шліфування на якість обробленої поверхні на основі методу Тагучі. Метод Тагучі є дієвим статистичним інструментом оптимізації технологічних процесів, який набув значної поширеності при проектуванні виробничих систем та контролю якості отриманої продукції.

Оскільки при оптимізації процесу шліфування розглядаються нелінійні цільові функції від багатьох змінних, деякі автори [8; 9] віддають перевагу алгоритму диференціальної еволюції та його модифікаціям. Алгоритм диференціальної еволюції побудований на основі генетичного алгоритму, але не вимагає представлення змінних у бінарному вигляді.

У роботі [10] представлена модифікація методу розсіювання для оптимізації процесу шліфування. Особливість методу розсіювання полягає в тому, що особини з базової популяції повинні бути достатньо розсіяні по множині допустимих розв'язків.

Серед поведінкових еволюційних методів слід відзначити також метод рою часток, за допомогою якого можна здійснювати пошук глобального екстремуму тоді, коли обчислення градієнта оптимізованої функції пов'язане з певними труднощами. Алгоритм рою часток побудований на моделі колективної поведінки тварин і відзначається корекцією швидкості, від якої залежить збіжність алгоритму. У роботі [11] наведено приклад застосування методу рою часток для розв'язку задачі оптимізації параметрів процесу шліфування. Для покращення результатів роботи в межах цієї задачі автори роботи [12] запропонували вдосконалений алгоритм рою часток. Робота [13] присвячена розробці гібридного методу рою часток, який поєднує оптимізацію динамічної топології сусідства рою часток зі стратегією мутації, що ґрунтується на умовах процесу плоского шліфування.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Детальний аналіз робіт, зазначених у наведеному огляді, виявив низку невирішених проблем, пов'язаних з алгоритмом розв'язку задачі оптимізації режимів шліфування. Найважливішою умовою запобігання помилковим результатам еволюційного пошуку є правильне регулювання параметрів алгоритму на етапах селекції, схрещування та мутації. Збільшення розміру популяції, яке зазвичай вважається основним шляхом вирішення проблеми збіжності, одночасно призводить до зростання обчислювальних витрат і ускладнення процесу розв'язку. Тому першорядною залишається проблема налаштування фундаментальних еволюційних операторів для умов конкретної прикладної задачі.

**Метою статті** є визначення особливостей пошуку оптимальних параметрів шліфування за допомогою еволюційних методів, вироблення рекомендацій щодо алгоритму вирішення поставленої задачі та запобігання ускладненням, типовим для цього способу розв'язку.

**Виклад основного матеріалу.** Провідна ідея генетичного алгоритму полягає у відтворенні способів оптимізації, властивих живим організмам: генетичного наслідування та природного відбору. При цьому для пояснення роботи алгоритму використовується біологічна термінологія. Базовий принцип природного відбору ґрунтується на твердженні, що в процесі еволюції виживають та розмножуються найбільш пристосовані особини. У зв'язку з правилом генетичного наслідування, їхні нащадки зберігають головні характе-

ристики батьків, а зазнаючи випадкових мутацій, набувають також низку нових властивостей. Якщо набуті зміни сприяють адаптації організму, вони будуть зберігатися та наслідуватися в наступних поколіннях. Таким чином, середня пристосованість особини в подальшому зростатиме [14].

Для розв’язку задачі оптимізації технологічного процесу за допомогою генетичного алгоритму, необхідно визначити генотип та фенотип досліджуваної системи. Вектор параметрів  $\bar{X}$  за аналогією зі світом природи називається фенотипом, тобто сукупністю ознак та властивостей проєктованого об’єкта. Кожен набір параметрів  $\bar{X} = (X_1, \dots, X_n)$  з області допустимих розв’язків є можливим рішенням оптимізаційної задачі. Щоб представити інформацію про заданий об’єкт у числовому вигляді, його набору властивостей необхідно поставити у відповідність певний генотип. Генотип містить відомості про ознаки об’єкта на рівні набору хромосом, тобто у якості коду, який можна розглядати як окремих розв’язок при пошуку оптимальних параметрів технологічної системи. Отже, на початку роботи генетичного алгоритму необхідно виконати перетворення вектору параметрів  $\bar{X}$  у кодований набір даних  $\bar{C}_h$ , який називається хромосомою, і подальший процес вирішення задачі відбуватиметься на рівні генотипу, що дозволить узагальнено представити особливості оптимізації конкретного технологічного процесу [15].

Кодування набору параметрів оптимізованої системи зазвичай відбувається за допомогою бітових рядків, тобто ланцюжків певної довжини, елементи яких набувають значення 1 або 0. Кожній змінній вектора  $\bar{X} = (X_1, \dots, X_n)$  ставиться у відповідність бітовий рядок  $g_k$ , який називають геном. Сукупність генів, що описують характеристики об’єкта, утворюють унікальну хромосому. Скінченна множина особин  $\{C_h^j = (X_1^j, \dots, X_n^j); j = 1, \dots, M\}$  з області допустимих розв’язків називається популяцією, де  $M$  – розмір популяції,  $C_h^j$  –  $j$ -та хромосома з генами  $g_k^j$ . Схема перетворення фенотипу вектора параметрів процесу шліфування на його генотип наведена на рис. 1.

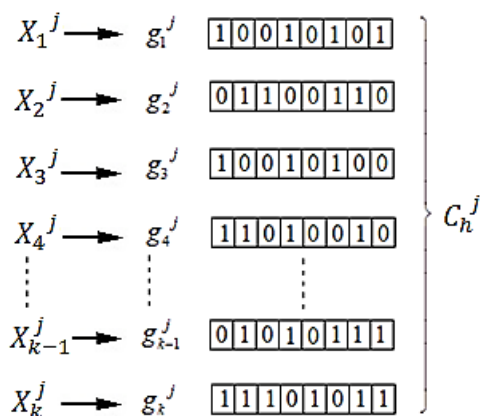


Рис. 1. Кодування параметрів процесу шліфування в межах  $j$ -ої хромосоми  
Джерело: власна розробка автора.

Кодування фенотипу допустимих розв’язків можна реалізувати як за допомогою загального бінарного коду, так і використовуючи рефлексивний код Грея, відмінність якого полягає в неперервності двійкової комбінації [16]. При переведенні кодованого числа зі звичайного бінарного коду в код Грея, кожен розряд повинен дорівнювати сумі по модулю два поточного та наступного старшого розряду бінарного коду. Зворотне перетворення коду Грея має відбуватися таким чином, щоб кожен розряд бінарного коду дорівнював сумі по модулю два поточного та всіх старших розрядів у коді Грея. Отже, найстарший розряд кодової комбінації в бінарному коді та в коді Грея збігається.

Наприкінці рішення задачі для того, щоб відновити отриманий розв'язок за кодом хромосоми, слід задати зворотнє перетворення  $\bar{C}_h \xrightarrow{f^{-1}} \bar{X}$ , де  $f^{-1}$  – функція декодування. Якщо кодування відбувалося за допомогою коду Грея, відповідне значення необхідно спочатку перевести у бінарний код, а потім – у десяткову форму.

Аби не допустити передчасної збіжності алгоритму та попередити втрату розв'язків, які можуть виявитися корисними, необхідна поступова концентрація набору розв'язків задачі в напрямку області глобального екстремуму. Для цього параметри генетичного алгоритму мають бути налаштовані таким чином, щоб забезпечувати покращення середньої пристосованості популяції на основі отриманих рішень та одночасний пошук нових рішень в області допустимих розв'язків. У випадку задачі багатокритеріальної оптимізації, що розглядає максимізацію продуктивності  $Z_1 = \max(P_i)$  та мінімізацію втрат матеріалу  $Z_2 = \min(h_i)$  як критерії оптимальності, може бути побудована адитивна згортка критеріїв, зважених коефіцієнтами відносно ступеня їхньої важливості [17]. Отже, для заданих умов комплексний критерій оптимальності виглядатиме наступним чином:

$$Z = w_1 \cdot Z_1 - w_2 \cdot Z_2. \quad (1)$$

Вагові коефіцієнти можуть бути задані в явному вигляді або визначені аналітично з метою направити еволюційний пошук у напрямку оптимального рішення [18]. Для оцінки значень вагових коефіцієнтів слід розглянути множину перспективних розв'язків та їхню пристосованість з погляду критеріїв оптимальності (рис. 2).

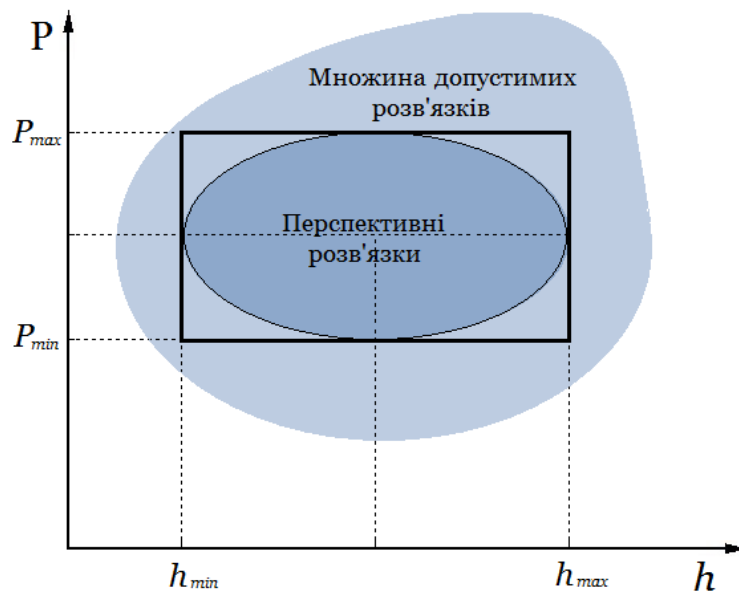


Рис. 2. Пристосованість розв'язків у просторі критеріїв оптимальності  
Джерело: власна розробка автора.

На кожній ітерації еволюційного процесу множина перспективних розв'язків може бути виділена в межах умовного прямокутника, заданого екстремальними точками в просторі критеріїв оптимальності:

$$(P_{\max}, h_{\max}); (P_{\max}, h_{\min}); (P_{\min}, h_{\min}); (P_{\min}, h_{\max}), \quad (2)$$

де  $P_{\max} = \max \{ Z_1(\bar{C}_h^j); j = 1, \dots, M \}$ ;  $P_{\min} = \min \{ Z_1(\bar{C}_h^j); j = 1, \dots, M \}$ ;

$h_{\max} = \max \{ Z_2(\bar{C}_h^j); j = 1, \dots, M \}$ ;  $h_{\min} = \min \{ Z_2(\bar{C}_h^j); j = 1, \dots, M \}$ .



Для кожної особини  $\bar{C}_h^j$  зважена функція пристосованості може бути визначена на основі максимальних та мінімальних значень кожного з критеріїв оптимальності:

$$Z(\bar{C}_h^j) = w_1 \cdot (Z_1(\bar{C}_h^j) - P_{\min}) - w_2 \cdot (Z_2(\bar{C}_h^j) - h_{\min}); j = 1, \dots, M, \quad (3)$$

де  $M$  – розмір популяції. Вагові коефіцієнти для кожного з критеріїв оптимальності розраховуються за формулами:

$$w_1 = \frac{1}{P_{\max} - P_{\min}}; w_2 = \frac{1}{h_{\max} - h_{\min}}. \quad (4)$$

Завдяки такому вигляду вагових коефіцієнтів, відбуватиметься нормування критеріїв  $Z_1 = \max(P_1)$  та  $Z_2 = \min(h_1)$  у межах адитивної згортки. Виходячи з того, що екстремальні точки  $(P_{\max}, h_{\max}); (P_{\max}, h_{\min}); (P_{\min}, h_{\min}); (P_{\min}, h_{\max})$  апроксимують глобальний екстремум функції пристосованості, еволюційний пошук у виділеному просторі перспективних розв’язків поступово наблизитиметься до оптимального рішення задачі. Оскільки координати екстремальних точок змінюються протягом усього ходу розв’язку, значення вагових коефіцієнтів оновлюватимуться на кожній ітерації оптимізаційного процесу. Таким чином, вага критеріїв оптимальності адаптуватиметься відповідно до напрямку ідеальної точки на кожному етапі генетичного алгоритму.

На рис. 3–6 показані графіки порівняння результатів оптимізації технологічного процесу шліфування за допомогою запропонованого еволюційного алгоритму та класичного генетичного алгоритму, а також таких еволюційних методів, як метод мурашиної колонії, метод рою часток та метод розсіювання. Для узагальнення результатів пошуку, розв’язки в межах  $i$ -ої популяції можна представити за допомогою відносної пристосованості:

$$\xi = \frac{f_i^j}{\max Z(\bar{X}_i)}, \quad (5)$$

де  $f_i^j$  – функція пристосованості для  $j$ -го розв’язку  $i$ -ої популяції;  $\max Z(\bar{X}_i)$  – максимальне значення цільової функції для  $i$ -ої популяції.

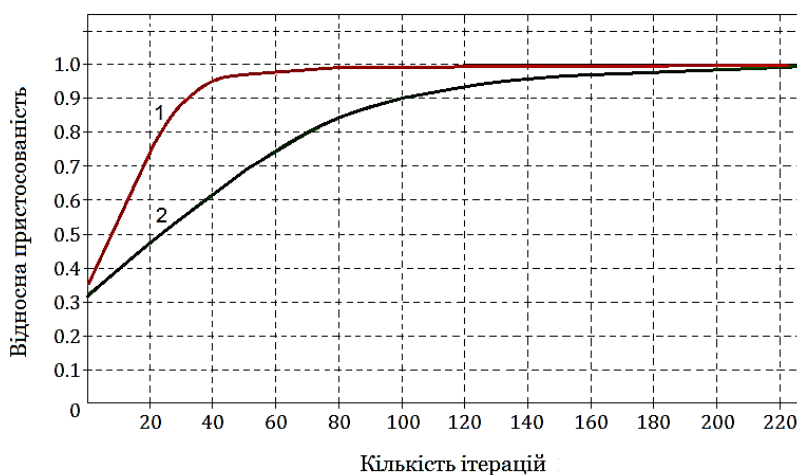


Рис. 3. Порівняння швидкості збіжності запропонованого (крива 1) та класичного (крива 2) генетичного алгоритму

Джерело: власна розробка автора.



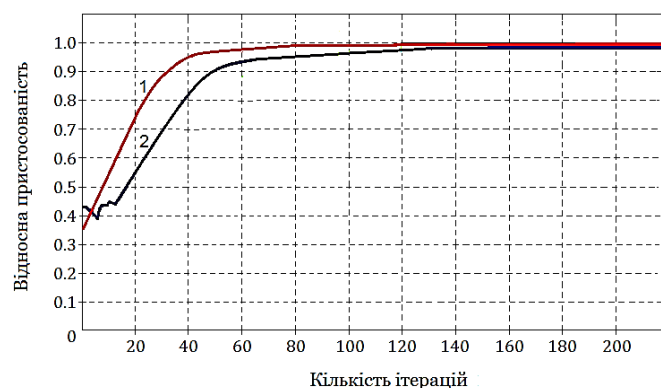


Рис. 4. Порівняння швидкості збіжності запропонованого алгоритму (крива 1) та методу мурашиної колонії (крива 2)

Джерело: власна розробка автора.

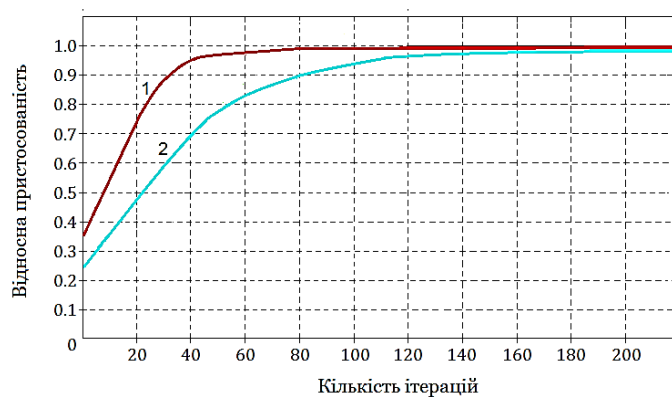


Рис. 5. Порівняння швидкості збіжності запропонованого алгоритму (крива 1) та методу рою часток (крива 2)

Джерело: власна розробка автора.

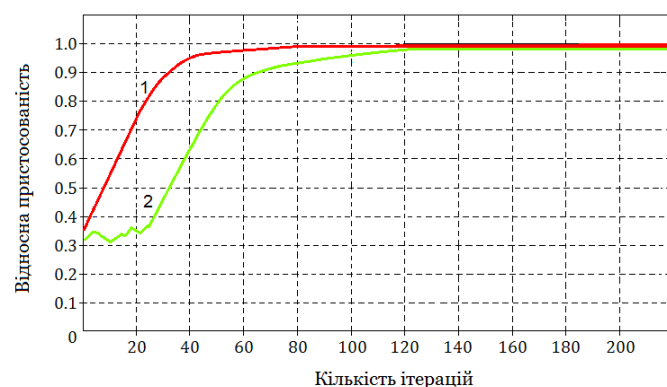


Рис. 6. Порівняння швидкості збіжності запропонованого алгоритму (крива 1) та методу розсіювання (крива 2)

Джерело: власна розробка автора.

Оскільки надійність алгоритмів, тобто частка успішних запусків, для заданих параметрів в усіх випадках виявилась практично однаковою, порівняння роботи зазначених методів проводилось на основі швидкості збіжності. З представлених графіків можна зробити висновок, що виконання наведених рекомендацій сприяє зменшенню кількості ітерацій, необхідних для визначення оптимального рішення, а отже, і зниженню обчислювальних витрат під час розв'язку.

**Висновки.** При розв'язку прикладних задач, таких як пошук оптимальних режимів шліфування, за допомогою еволюційних методів принципово важливим є правильне налаштування параметрів алгоритму. Завадити його ефективній роботі може передчасна зупинка алгоритму до досягнення глобального екстремуму. Достатній розмір популяції та підтримка її різноманітності стають необхідною умовою функціонування генетичного алгоритму.

Завдяки запропонованому підходу до процесу розв'язку задачі, пошук оптимальних рішень на певному етапі зосереджується в деякій спільній області простору допустимих розв'язків, а багатокритеріальний оптимізаційний процес переходить до загальної оптимізації шляхом побудови адитивної згортки згідно з методом зваженої суми критеріїв. Це дозволяє зменшити обчислювальні витрати та знизити ймовірність передчасної збіжності алгоритму до локального екстремуму. Значення вагових коефіцієнтів комплексного критерію оптимальності можуть бути визначені аналітично, виходячи з конфігурації простору перспективних розв'язків. Через те, що координати екстремальних точок на множині перспективних розв'язків змінюються для кожної ітерації оптимізаційного процесу, будуть оновлюватись і значення вагових коефіцієнтів. Таким чином еволюційний пошук наблизатиметься до оптимального рішення задачі.

Результати експериментального порівняння запропонованого еволюційного алгоритму з класичним генетичним алгоритмом, методом мурашиної колонії, методом рою часток та методом розсіювання виявили його перевагу у швидкості збіжності при незмінній надійності для всіх алгоритмів. Такі висновки щодо необхідних обчислювальних витрат при визначенні оптимальних параметрів шліфування цілком узгоджуються з попередніми дослідженнями цієї проблеми.

#### Список використаних джерел

1. Wen X. M. Micro-computer-based optimization of the surface grinding process / X. M. Wen, A. A. O. Tay, A. Y. C. Nee // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1992. – Vol. 29(1–3). – Pp. 75-90.
2. Slowik A. Multi-objective optimization of surface grinding process with the use of evolutionary algorithm with remembered Pareto set / A. Slowik, J. Slowik // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2008. – Vol. 37, Issue 7. – Pp. 657-669.
3. Saravanan R. A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations / R. Saravanan, P. Asokan, M. Sachidanandam M. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – Vol. 42, Issue 12. – Pp. 1327-1334.
4. Baskar N. Ants colony algorithm approach for multi-objective optimisation of surface grinding operations / N. Baskar, R. Saravanan, P. Asokan, G. Prabhakaran // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2004. – Vol. 23, Issue 5. – Pp. 311-317.
5. Aravind M. Optimization of Surface Grinding Process Parameters by Taguchi method and Response Surface Methodology / M. Aravind, S. Periyasamy // *International Journal of Engineering Research and Technology*. – 2014. – Vol. 3, Issue 5. – Pp. 1721-1727.
6. Güven O. Application of the Taguchi method for parameter optimization of the surface grinding process / O. Güven, O. // *Materialpruefung/Materials Testing*. – 2015. – Vol. 57. – Pp. 43-48.
7. Patil P. J. Analysis of process parameters in surface grinding using single objective Taguchi and multi-objective grey relational grade. / P. J. Patil, C. R. Patil // *Perspectives in Science*. – 2016. – Vol. 8. – Pp. 367-369.
8. Krishna A. G. Retracted: optimization of surface grinding operations using a differential evolution approach / A. G. Krishna // *Journal of materials processing technology*. – 2007. – Vol. 183, Is. 2-3. – Pp. 202-209.
9. Lee K. M. Improved differential evolution approach for optimization of surface grinding process / K. M. Lee, M. R. Hsu, J. H. Chou, C. Y. Guo // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – Vol. 38, Issue 5. – Pp. 5680-5686.
10. Krishna A. G. Multi-objective optimisation of surface grinding operations using scatter search approach / A. G. Krishna, K. M. Rao // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. – Vol. 29, Issue 5. – Pp. 475-480.

11. Pawar P. J. Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm / P. J. Pawar, R.V. Rao, J. P. Davim // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2010. – Vol. 25, Issue 6. – Pp. 424-431.
12. Lin X. Enhanced Pareto particle swarm approach for multi-objective optimization of surface grinding process / X. Lin, H. Li // *Proceedings of the Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*. – 2008. – Vol. 2. – Pp. 618-623.
13. Zhang G. Multi-objective optimization for surface grinding process using a hybrid particle swarm optimization algorithm / G. Zhang, M. Liu, J. Li, W.Y. Ming, X.Y. Shao, Y. Huang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 71, Issues 9-12. – Pp. 1861-1872.
14. Пантелеев А. В. Модифицированный генетический алгоритм условной оптимизации с бинарным кодированием / А. В. Пантелеев, Н. П. Апостол // *Научный вестник МГТУ ГА. Серия : Прикладная математика. Информатика*. – 2007. – № 120. – С. 24-31.
15. Попов В. А. Оптимизационные задачи на основе генетического поиска / В. А. Попов, А. В. Бердочник // *Системы обработки информации*. – 2010. – Вып. 9(90). – С. 217-220.
16. Пантелеев А. В. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы / А. В. Пантелеев, Д. В. Метлицкая, Е. А. Алешина. – М. : Вузовская книга, 2013. – 244 с.
17. Тонконогий В. М. Вибір параметрів шліфування плазмових покриттів при багатокритеріальній оптимізації технологічного процесу / В. М. Тонконогий, О. В. Рибак // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2018. – Вып. 13. – С. 60-68.
18. Рибак О. В. Математичне моделювання, аналіз та оптимізація в САПР технологічного процесу шліфування плазмових покриттів : дис. ... канд. техн. наук / О. В. Рибак. – Одеса : ОНПУ, 2019. – 162 с.

### References

1. Wen, X.M., Tay, A.A.O., & Nee, A.Y.C. (1992). Micro-computer-based optimization of the surface grinding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 29(1-3), 75-90.
2. Slowik, A., Slowik, J. (2008). Multi-objective optimization of surface grinding process with the use of evolutionary algorithm with remembered Pareto set. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(7), 657-669.
3. Saravanan, R., Asokan, P., & Sachidanandam, M. (2002). A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimization of surface grinding operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(12), 1327-1334.
4. Baskar, N., Saravanan, R., Asokan, P., & Prabhakaran G. (2004). Ants colony algorithm approach for multi-objective optimisation of surface grinding operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23(5), 311-317.
5. Aravind, M., & Periyasamy, S. (2014). Optimization of Surface Grinding Process Parameters by Taguchi method and Response Surface Methodology. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 3(5), 1721-1727.
6. Güven, O. (2015). Application of the Taguchi method for parameter optimization of the surface grinding process. *Materialpruefung/Materials Testing*, 57, 43-48.
7. Patil, P.J., Patil, C.R. (2016). Analysis of process parameters in surface grinding using single objective Taguchi and multi-objective grey relational grade. *Perspectives in Science*, 8, 367-369.
8. Krishna, A.G. (2007). Retracted: optimization of surface grinding operations using a differential evolution approach. *Journal of materials processing technology*, 183(2-3), 202-209.
9. Lee, K.M., Hsu, M.R., Chou, J.H., & Guo, C.Y. (2011). Improved differential evolution approach for optimization of surface grinding process. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5680-5686.
10. Krishna, A.G., & Rao, K.M. (2006). Multi-objective optimisation of surface grinding operations using scatter search approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(5), 475-480.
11. Pawar, P.J., Rao, R.V., & Davim, J.P. (2010). Multiobjective optimization of grinding process parameters using particle swarm optimization algorithm. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(6), 424-431.
12. Lin, X., & Li, H. (2008). Enhanced Pareto particle swarm approach for multi-objective optimization of surface grinding process. *Proceedings of the Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, 2, 618-623.

13. Zhang, G., Liu, M., Li, J., Ming, W.Y., Shao, X.Y., & Huang, Y. (2014). Multi-objective optimization for surface grinding process using a hybrid particle swarm optimization algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9-12), 1861-1872.
14. Panteleev, A.V., & Apostol, N.P. (2007). Modifitsirovannyi geneticheskii algoritm uslovnoi optimizatsii s binarnym kodirovaniem [Modified genetic algorithm for conditional optimization with binary coding]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Seriya Prikladnaia matematika. Informatika – Scientific Bulletin of MSTU GA. Series: Applied Mathematics. Informatics*, (120), 24-31.
15. Popov, V.A., & Berdochnik, A.V. (2010). Optimizatsionnye zadachi na osnove geneticheskogo poiska [Optimization problems on the basis of genetic search]. *Systemy obrobky informatsii – Information processing systems*, 9(90), 217-220.
16. Panteleev, A.V., Metlitckaia, D.V., & Aleshina, E.A. (2013). *Metody globalnoi optimizatsii. Metaevristicheskie strategii i algoritmy [Methods of the global optimization. Metaheuristic strategies and algorithms]*. Vuzovskaia kniga.
17. Tonkonohyi, V.M., & Rybak, O.V. (2018). Vybir parametriv shlifuvannia plazmovykh pokryttiv pry bahatokryterialnii optymizatsii tekhnolohichnoho protsesu [Selection of the grinding parameters for plasma coatings during multi-objective optimization of technological process]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni – Modern technologies in mechanical engineering*, (13), 60-68.
18. Rybak, O.V. (2019). *Matematychni modeliuvannia, analiz ta optymizatsiia v SAPR tekhnolohichnoho protsesu shlifuvannia plazmovykh pokryttiv [Mathematical modelling, analysis and optimization in CAD of technological process of grinding plasma coatings]* [PhD dissertation, ONPU].

Отримано 28.11.2021

UDC 621.92

**Olga Rybak**

PhD in Technical Science

Associate Professor of the Department of Information Technologies and Design  
Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

E-mail: [olga.vol.rybak@gmail.com](mailto:olga.vol.rybak@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0250-3037>

SCOPUS Author ID: [57208656221](https://orcid.org/57208656221)

## APPLYING EVOLUTIONARY METHODS OF OPTIMIZATION FOR GRINDING REGIMES SELECTION

*Defining optimal grinding regimes with the use of traditional methods of mathematical programming and numerical analysis usually turns out to be not effective enough, therefore, solving this problem on the basis of evolutionary methods of optimization is presented in this paper. Depending on the features of technological process, there may be several optimality criteria, so the problem transforms into multi-objective optimization.*

*Premature convergence of the algorithm, as well as general low level of fitness among the obtained results and significant fluctuations of the average values of fitness for the sequence of generations can obstruct proper definition of the processing parameters. Analysis of studies and publications related to grinding process optimization revealed the problem of configuration of the fundamental evolutionary operators, which remains relevant for the conditions of the applied problem.*

*In order to prevent premature convergence of the algorithm, it is important to provide gradual concentration of the problem solutions set in the direction of the global extremum area. In that case, genetic algorithm parameters should be customized to provide improvement of the average fitness of population based on the obtained results and simultaneous search of new solutions in the feasible region. Values of the weighting factors of the complex optimality criterion are defined on the basis of configuration of the area of perspective solutions. Results of the technological process of grinding optimization using presented evolutionary algorithm, classical genetic algorithm, and also such evolutionary methods as ant colony optimization method, particle swarm optimization method and scatter search method reveal an advantage of the suggested approach in convergence rate with stable reliability for all the considered algorithms.*

*Thus, taking into account features of the optimal grinding parameters search using evolutionary methods, in this paper recommendations are presented concerning an algorithm for the stated problem resolving and preventing from complications typical for this way of solving.*

**Keywords:** evolutionary methods; optimization; grinding parameters; genetic algorithm; convergence rate.

Fig.: 6. References: 18.