

УДК 004.8:006.3

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3\(44\)-1485-1500](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-1485-1500)

Супрун Ольга Миколаївна кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, факультет комп'ютерних наук та технологій, Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, <https://orcid.org/0000-0002-1196-5655>

Стефінко Ярослав Яромирович аспірант, кафедра безпеки інформаційних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, <https://orcid.org/0000-0002-2910-1628>

Сікора Ярослава Богданівна кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, фізико-математичний факультет, Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, <https://orcid.org/0000-0003-2621-6638>

АДАПТИВНІ АЛГОРИТМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Анотація. Ускладнення сучасних середовищ прийняття рішень вимагає розроблення інтелектуальних систем, здатних адаптуватися до плінних умов, еволюції розподілу даних і невизначених сценаріїв. Традиційні моделі прийняття рішень, які базуються на статичних правилах і фіксованих параметрах, часто не можуть забезпечити точність і ефективність у додатках, що працюють у реальному часі й потребують безперервного навчання та адаптації. Ця проблема зумовила поширення адаптивних алгоритмів машинного навчання, які дозволяють інтелектуальним системам прийняття рішень оптимізувати продуктивність, навчаючись на нових даних, коригуючи параметри моделі та динамічно вдосконалюючи стратегії прийняття рішень. Ці алгоритми мають особливе значення в таких галузях, як фінанси, охорона здоров'я, кібербезпека та промислова автоматизація, де прийняття точних, своєчасних та ефективних рішень є надзвичайно важливим. Їх здатність автономно реагувати на зміни, мінімізувати помилки прогнозування та підвищувати операційну ефективність підкреслює їх щораз більшу важливість у штучному інтелекті та системах підтримки прийняття рішень на основі даних.

Метою дослідження є аналіз ролі адаптивних алгоритмів машинного навчання в інтелектуальних системах прийняття рішень, оцінювання їх ефективності та пошук шляхів для підвищення їх надійності.

Результати проведеного дослідження висвітлюють переваги методів адаптивного навчання в підвищенні точності рішень, скороченні часу реакції та оптимізації розподілу ресурсів у складних умовах. Алгоритми навчання з підкріпленням показують високу адаптивність у невизначених умовах, що робить їх дуже ефективними для автономного прийняття рішень. Методи онлайн-навчання надають моделям можливість безперервно оновлювати свої знання, покращуючи можливості прогнозування в реальному часі в сценаріях із потоковою передачею даних. Еволюційні стратегії виявляються ефективними для оптимізаційних задач, забезпечуючи гнучкість у розв'язанні багатоцільових проблем прийняття рішень. Водночас результати досліджень також указують на те, що високі обчислювальні витрати і потреба в об'ємному обробленні даних залишаються значними перешкодами на шляху їх широкомасштабного впровадження.

Отже, адаптивні алгоритми машинного навчання відіграють важливу роль у підвищенні ефективності та надійності інтелектуальних систем прийняття рішень, що дозволяє їм успішно працювати в умовах мінливого та непередбачуваного середовища. Дослідження акцентує увагу на необхідності подальших досліджень гібридних підходів до навчання, автоматизованого налаштування гіперпараметрів та енергоефективних обчислювальних технологій для подолання наявних обмежень. Подальші досягнення у сфері змішаного навчання, метанавчання та нейроморфних обчислень, як передбачається, стануть основою наступного покоління адаптивних моделей прийняття рішень, покращивши їх масштабованість, інтерпретованість і застосовність у реальному світі.

Ключові слова: предиктивний аналіз, адаптивне керування, самонавчальні системи, оптимізація параметрів, нейромережеве моделювання.

Suprun Olha Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Intelligent Cybernetic Systems, Faculty of Computer Science and Technology, State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, <https://orcid.org/0000-0002-1196-5655>

Stefinko Yaroslav Postgraduate, Department of Information Technology Security, Lviv Polytechnic National University, Lviv, <https://orcid.org/0000-0002-2910-1628>

Sikora Yaroslava Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Sciences and Information Technologies, Faculty of Physics and Mathematics, Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, <https://orcid.org/0000-0003-2621-6638>

ADAPTIVE MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR INTELLIGENT DECISION-MAKING SYSTEMS

Abstract. The increasing complexity of modern decision-making environments requires the development of intelligent systems that can adapt to fluid conditions, evolving data distributions, and uncertain scenarios. Traditional decision-making models based on static rules and fixed parameters often fail to deliver accuracy and efficiency in real-time applications that require continuous learning and adaptation. This problem has led to the proliferation of adaptive machine-learning algorithms that allow intelligent decision-making systems to optimise performance by learning from new data, adjusting model parameters, and improving decision-making strategies. These algorithms are particularly important in finance, healthcare, cybersecurity, and industrial automation, where making accurate, timely, and efficient decisions is critical. Their ability to autonomously respond to changes, minimise forecasting errors, and improve operational efficiency underscores their growing importance in artificial intelligence and data-driven decision support systems.

This study aims to analyse the role of adaptive machine learning algorithms in intelligent decision-making systems, assess their effectiveness, and find ways to improve their reliability.

The study's results highlight the benefits of adaptive learning methods in improving decision accuracy, reducing reaction time and optimising resource allocation in complex environments. Reinforcement learning algorithms are highly adaptable in uncertain conditions, making them very effective for autonomous decision-making. Online learning methods allow models to continuously update their knowledge, improving real-time forecasting capabilities in streaming scenarios. Evolutionary strategies effectively optimise tasks, providing flexibility in solving multi-objective decision-making problems. At the same time, research results also indicate that high computational costs and the need for large-scale data processing remain significant obstacles to their widespread implementation.

Thus, adaptive machine learning algorithms are important in improving the efficiency and reliability of intelligent decision-making systems, allowing them to operate successfully in a changing and unpredictable environment. The study highlights the need for further research into hybrid learning approaches, automated hyperparameter tuning, and energy-efficient computing technologies to overcome the existing limitations. Further advances in blended learning, meta-learning, and neuromorphic computing are expected to form the basis of the next generation of adaptive decision-making models, improving their scalability, interpretability, and applicability in the real world.

Keywords: predictive analysis, adaptive control, self-learning systems, parameter optimisation, neural network modelling.

Постановка проблеми. Розроблення інтелектуальних систем прийняття рішень стає все більш складним через зростання обсягів даних, активний характер реальних середовищ і необхідність роботи систем у невизначених умовах, що швидко розвиваються і змінюються. Традиційні моделі прийняття рішень, які базуються на статичних правилах і заздалегідь визначених алгоритмах, часто не дають точних і своєчасних результатів, коли стикаються з мінливими наборами даних і непередбачуваними ситуаціями. Це обмеження зумовило зростання інтересу до адаптивних алгоритмів машинного навчання, які можуть швидко налаштовувати свої параметри, оптимізувати стратегії прийняття рішень у режимі реального часу і покращувати продуктивність у міру надходження нової інформації. Ці алгоритми допомагають інтелектуальним системам безперервно навчатися на основі потоків даних, визначати нові закономірності та вдосконалювати процеси прийняття рішень, не потребуючи постійного людського втручання. Здатність автономно адаптуватися до змін робить їх надзвичайно важливими в таких галузях, як фінанси, охорона здоров'я, кібербезпека та промислова автоматизація, де прийняття рішень має бути одночасно точним і швидким [1].

Актуальність адаптивних алгоритмів машинного навчання в інтелектуальних системах прийняття рішень підтверджується зростанням попиту на автоматизацію та аналітику в режимі реального часу в найважливіших сферах застосування. У сфері охорони здоров'я адаптивні моделі використовуються для персоналізованих рекомендацій щодо лікування, раннього виявлення захворювань і моніторингу пацієнтів у режимі реального часу, допомагаючи медичним працівникам приймати обґрунтовані рішення. У фінансовій сфері адаптивні алгоритми керують алгоритмічною торгівлею, виявленням шахрайства, оцінюванням кредитних ризиків, постійно аналізуючи ринкові коливання та поведінку клієнтів. У промисловості адаптивні моделі оптимізують прогнозоване технічне обслуговування, управління ланцюгами поставок і планування виробництва, скорочуючи операційні витрати і мінімізуючи простой. У сфері кібербезпеки адаптивні методи навчання покращують виявлення загроз, визначаючи нові моделі атак і проактивно реагуючи на нові вразливі місця в системі безпеки. Здатність адаптивних алгоритмів навчатися в умовах, що постійно змінюються, не лише покращує точність рішень, але й підвищує надійність і стійкість інтелектуальних систем.

Незважаючи на свої переваги, інтеграція адаптивних алгоритмів машинного навчання в інтелектуальні системи прийняття рішень пов'язана з низкою проблем, зокрема з обчислювальною складністю, проблемами стабільності та етичними міркуваннями. Багато адаптивних методів вимагають значних обчислювальних ресурсів для оброблення великих обсягів поточкових даних і оновлення моделей у реальному часі. Для забезпечення надійності прийняття рішень необхідно уважно стежити за ризиком нестабільності та

надмірної пристосованості моделі. Етичні проблеми, пов'язані з упередженістю, прозорістю та конфіденційністю даних, також становлять значні виклики, тому що адаптивні моделі повинні бути розроблені таким чином, щоби працювати справедливо і підзвітно в додатках з високими ризиками. Розв'язання цих проблем вимагає розроблення ефективних систем навчання, надійних методів валідації та регуляторних принципів, які б забезпечували свідоме впровадження адаптивних технологій прийняття рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження в галузі адаптивних алгоритмів машинного навчання для інтелектуальних систем прийняття рішень охоплюють широкий спектр питань, зокрема оптимізаційне моделювання, цифрову трансформацію, управління бізнесом та промисловими процесами, а також застосування штучного інтелекту в аудиті та освіті.

Зокрема, С. Г. Антощук і Н. О. Комлева [2] досліджують оптимізаційне моделювання інтелектуальних систем діагностування, підкреслюючи роль алгоритмів машинного навчання у вдосконаленні процесу діагностування складних технічних систем. Науковці аналізують підходи до оброблення великих обсягів даних та підвищення точності прогнозування несправностей за допомогою адаптивних моделей.

Т. Бондаренко [3] акцентує увагу на ролі інтелектуальних інформаційних технологій у цифровій трансформації освіти, розглядаючи їх як ключовий фактор адаптивних освітніх платформ. Використання алгоритмів машинного навчання в освітніх системах дозволяє створювати персоналізовані траєкторії навчання та підвищувати ефективність освітнього процесу.

Побудову інтелектуальної системи управління агрофірмою досліджують А. Тарасюк, В. Гамалій та С. Рзаєва [4], акцентуючи увагу на необхідності адаптивних алгоритмів для прийняття рішень в умовах плінного середовища. В їхній роботі розглянуто методи машинного навчання, що застосовуються для моніторингу стану ґрунтів, прогнозування врожайності та оптимізації логістичних процесів.

Г. Лявинець, О. Люлька та Ю. Ткачук [5] аналізують упровадження орієнтованих на знання технологій у сфері адаптивного менеджменту готельно-ресторанного бізнесу. Використання машинного навчання в таких системах дозволяє автоматизувати аналіз поведінки клієнтів, прогнозувати попит і формувати індивідуальні пропозиції.

Принципи впровадження моделей машинного навчання у сфері інтелектуального обслуговування промислового обладнання досліджує Є. Б. Козак [6], розглядаючи можливості використання адаптивних алгоритмів для прогнозування відмов обладнання та мінімізації часу простою за допомогою превентивного обслуговування.

А. В. Кошель [7] у своїй роботі висвітлює роль модульних електронних систем у впровадженні інноваційного машинного навчання. Дослідження

підкреслює важливість адаптивних алгоритмів для підвищення продуктивності електронних систем у різних галузях, включаючи автоматизацію виробничих процесів та кібербезпеку.

Модель інтелектуальної системи підтримки внутрішнього аудиту суб'єкта господарювання, яка базується на адаптивних алгоритмах машинного навчання, пропонує Д. Д. Гнатченко [8], наголошуючи на важливості автоматизації аналізу фінансових даних та підвищення ефективності контролю ризиків.

Ю. Костюк [9] досліджує розроблення інтелектуальних компонентів інформаційних систем, акцентуючи увагу на їх адаптивності та можливості інтеграції з іншими цифровими технологіями. Використання машинного навчання дозволяє підвищити ефективність інформаційних систем, забезпечуючи швидке оброблення та аналіз великих масивів даних.

Мета статті – аналіз ролі адаптивних алгоритмів машинного навчання в інтелектуальних системах прийняття рішень, оцінювання їх ефективності та пошук шляхів для підвищення їх надійності.

Виклад основного матеріалу. Адаптивні алгоритми машинного навчання – це клас обчислювальних моделей, призначених для модифікації своєї поведінки у відповідь на зміни в середовищі, еволюцію розподілу даних та зміну структури проблеми. На відміну від статичних моделей навчання, які спираються на фіксований навчальний набір і залишаються незмінними після запуску, адаптивні алгоритми постійно вдосконалюють свої параметри і стратегії прийняття рішень на основі нової інформації. Ці алгоритми мають особливу користь у сценаріях із нестабільними моделями даних, як-от прогнозування фінансових ринків, медична діагностика та автономні системи.

Поняття адаптивності в машинному навчанні охоплює кілька ключових аспектів, зокрема самоналаштування, навчання в реальному часі та стійкість до невизначеностей. Адаптивні алгоритми можна умовно поділити на методи онлайн-навчання, моделі навчання з підкріпленням та еволюційні стратегії. Методи онлайн-навчання, зокрема стохастичний градієнтний спуск (SGD) та методи інкрементної кластеризації, дають змогу моделям оновлювати свої параметри циклічно в міру надходження нових точок даних. Навчання з підкріпленням (RL) використовує механізм, що ґрунтується на принципі підкріплення, коли агенти коригують свою політику на основі зворотного зв'язку з оточенням, оптимізуючи довгострокову продуктивність. Еволюційні стратегії, створені на основі біологічної еволюції, використовують генетичні алгоритми та інтелект мереж для циклічного вдосконалення рішень за допомогою таких механізмів, як селекція, мутація та кросингвер [10, с. 518].

Основні принципи адаптації в машинному навчанні полягають у використанні методів динамічного оновлення моделі, оптимізації на основі зворотного зв'язку та безперервного навчання [10, с. 518]. Функція активного

оновлення моделі гарантує, що алгоритм може адаптуватися до змін у розподілі даних, не вимагаючи перенавчання з нуля. Оптимізація зі зворотним зв'язком передбачає механізми, які дають змогу моделі вчитися на помилках і вдосконалювати свої прогнози з часом. Безперервне навчання, якому часто допомагають методи трансферного навчання та метанавчання, дозволяють моделям накопичувати знання та узагальнювати їх для різних завдань.

Переваги адаптивного машинного навчання проявляються, зокрема, в його здатності працювати в нестаціонарних умовах, покращувати прийняття рішень у реальному часі та підвищувати ефективність використання даних [11, с. 59–60]. Пристосовуючись до змін у розподілі інформації, ці моделі підтримують високу точність прогнозування навіть у динамічних контекстах. Здатність до навчання в режимі реального часу робить їх ідеальними для таких застосувань, як виявлення шахрайства, автоматичне водіння та оптимізація промислових процесів. Адаптивні алгоритми можуть працювати з обмеженим обсягом маркованих даних, використовуючи методи самонавчання та напівнавчання для підвищення продуктивності без великих людських зусиль для пояснення.

Адаптивні алгоритми машинного навчання, хоча і мають свої переваги, водночас стикаються з низкою проблем, серед яких обчислювальна складність, проблеми зі стабільністю та потенційна надмірна адаптація. Безперервне оновлення моделі вимагає значних обчислювальних ресурсів, особливо в роботі з потоками даних високої розмірності. Проблеми стабільності виникають через ризик виникнення ефекту забування, коли моделі втрачають раніше вивчену інформацію під час адаптації до нових даних. Тенденція до надмірного пристосування до короточасних коливань даних може перешкоджати узагальненню адаптивних моделей, що вимагає використання методів регуляризації та надійних механізмів валідації.

Адаптивні алгоритми відіграють ключову роль у сучасних системах прийняття рішень, даючи їм змогу динамічно реагувати на мінливі умови, невизначеність середовища та еволюцію наборів даних [12]. Інтелектуальні системи прийняття рішень – це комплексні обчислювальні структури, які інтегрують оброблення даних, аналітичні моделі та методи оптимізації для підтримки автоматизованих процесів прийняття рішень, що здійснюються людиною або за її участі. Ці системи мають відповідати кільком ключовим вимогам, серед яких висока обчислювальна ефективність, здатність обробляти великі та різноманітні набори даних, стійкість до невизначеностей та адаптивність до нової інформації. Структура інтелектуальної системи прийняття рішень зазвичай включає кілька основних елементів: збір і попереднє оброблення даних, виділення ознак, прогнозне моделювання, оптимізація рішень і механізми зворотного зв'язку. Збір даних передбачає збір інформації з різних джерел, зокрема датчиків, баз даних або вхідних даних користувачів.

Попереднє оброблення забезпечує узгодженість і якість даних, видаляючи пропущені значення, шум і надлишкову інформацію. Виділення ознак фокусується на виборі найбільш релевантних атрибутів для прийняття рішень. Прогностичне моделювання застосовує методи машинного навчання для прогнозування результатів або класифікації даних, тоді як оптимізація рішень визначає найбільш підходящі дії на основі попередньо визначених цілей і обмежень. Механізми зворотного зв'язку дозволяють системі вчитися на минулих рішеннях, покращуючи свою ефективність із часом.

Впровадження адаптивних алгоритмів суттєво підвищує ефективність систем прийняття рішень, дозволяє їм пристосовуватися до нових умов, підвищувати точність та оптимізувати використання ресурсів. Адаптивні моделі мають особливе значення в умовах невизначеності, де статичні підходи, що базуються на правилах, часто не спрацьовують. Ці алгоритми допомагають системам вчитися на основі даних у реальному часі, вдосконалювати стратегії прийняття рішень і зменшувати ризики, пов'язані з динамічними змінами в операційному оточенні. Однією з головних переваг адаптивних алгоритмів є їх здатність виявляти та реагувати на зміни в розподілі даних, забезпечуючи, щоб рішення залишалися актуальними та ефективними, навіть якщо обставини змінюються. Адаптивні підходи сприяють персоналізованому прийняттю рішень, адаптуючи рекомендації до окремих користувачів або конкретних сценаріїв шляхом постійного оновлення моделей на основі взаємодії користувачів і факторів, що залежать від обставин. Іншим важливим аспектом є їх вплив на підвищення ефективності обчислень шляхом оперативного налаштування складності моделі та розподілу ресурсів, що зменшує кількість непотрібних обчислень, зберігаючи при цьому високу продуктивність.

Адаптивні алгоритми прийняття рішень активно застосовуються в різних галузях, серед яких медицина, фінанси та промисловість [13, с. 89–90]. У медицині адаптивні моделі підвищують точність діагностики, планування лікування та моніторингу пацієнтів шляхом постійної інтеграції нових клінічних даних. Наприклад, системи підтримки прийняття рішень на основі машинного навчання дозволяють лікарям виявляти закономірності перебігу хвороби, коригувати дозування ліків і прогнозувати результати лікування на основі змін в історії хвороби. У фінансовій сфері адаптивні алгоритми оптимізують торгові стратегії, виявляють шахрайство та оцінюють кредитні ризики, проводячи аналіз ринкових коливань і поведінки клієнтів у реальному часі. Фінансові установи використовують моделі навчання з підкріпленням для автоматизації управління портфелем, що дозволяє швидко коригувати інвестиційні стратегії для максимізації прибутковості та мінімізації ризиків. Промисловий сектор отримує вигоду від адаптивного прийняття рішень у таких сферах, як прогнозоване технічне обслуговування, оптимізація ланцюгів

постачання та автоматизація процесів. Адаптивні алгоритми, аналізуючи дані з датчиків виробничого обладнання, виявляють ранні ознаки механічних несправностей, що дозволяє проводити проактивне технічне обслуговування та мінімізувати час простою. Подібним чином адаптивні моделі ланцюгів поставок оптимізують рівень запасів і логістичні маршрути на основі мінливого попиту, підвищуючи операційну ефективність і знижуючи витрати.

У таблиці 1 представлено характеристику застосувань адаптивних алгоритмів у різних галузях із зазначенням їхніх цілей, переваг та викликів.

Таблиця 1

Використання адаптивних алгоритмів у різних галузях [12–14]

Сфера застосування	Область застосування	Головні цілі	Переваги	Проблеми використання
Медицина	Діагностичні системи. Персоналізація лікування	Підвищення точності виявлення захворювань. Підбір терапії на основі реакцій пацієнтів	Покращена рання діагностика та плани лікування. Підвищення ефективності лікування, зменшення побічних ефектів	Конфіденційність даних, відповідність нормативним вимогам. Інтеграція з наявними системами охорони здоров'я
Фінанси	Алгоритмічна торгівля. Виявлення шахрайства	Оптимізація інвестиційних стратегій. Виявлення аномалій у транзакціях	Прийняття рішень у режимі реального часу, зниження ризиків. Підвищення безпеки, зменшення фінансових втрат	Волатильність ринку, високі обчислювальні вимоги. Еволюція шахрайських схем, дисбаланс даних
Промисловість	Прогнозоване технічне обслуговування. Оптимізація ланцюжка постачання	Попередження поломок обладнання. Регулювання логістики та запасів у режимі реального часу	Мінімізація витрат на простої, економія коштів. Підвищення ефективності, зменшення відходів	Мінливість даних датчиків, витрати на впровадження. Невизначеність прогнозування попиту

З розвитком адаптивних алгоритмів їх роль у системах прийняття рішень, як прогнозують, ще більше зростатиме, інтегруючи такі сучасні технології, як глибоке навчання, об'єднане навчання і нейроморфні комп'ютерні обчислення. Ці досягнення посилять автономність систем, підвищать точність рішень і сприятимуть розширенню їх застосування в нових сферах, як-от розумні міста, автономні транспортні засоби і персоналізована освіта. Здатність адаптуватися до нових даних та мінливих умов забезпечує надійність і ефективність систем прийняття рішень у світі, що стає дедалі складнішим і мінливішим [15, с. 36].

Порівняльний аналіз адаптивних алгоритмів має важливе значення для визначення їхніх сильних і слабких сторін, а також потенційних застосувань у різних галузях. Адаптивні алгоритми швидко змінюють свої параметри та стратегії прийняття рішень залежно від змін у зовнішньому середовищі, що робить їх важливими для таких застосувань, як предиктивна аналітика, автоматизовані системи прийняття рішень та управління в реальному часі. Оцінювання ефективності адаптивних алгоритмів вимагає чітко визначених метрик, які відображають їх роботу в різних умовах. До загальних показників оцінки належать точність, швидкість узгодження, обчислювальна складність, надійність, адаптивність і здатність до узагальнення. Точність вимірює, наскільки добре алгоритм прогнозує або класифікує дані, тоді як швидкість узгодження оцінює, як швидко алгоритм досягає оптимального рішення. Обчислювальна складність відноситься до ресурсів, необхідних для виконання, наприклад, пам'яті та обчислювальної потужності. Надійність оцінює здатність алгоритму справлятися з шумом і викидами, тоді як адаптивність відображає його здатність реагувати на мінливі розподіли даних. Здатність до узагальнення визначає, наскільки добре алгоритм працює з невидимими даними, запобігаючи надмірному пристосуванню до навчальних прикладів.

Порівняння найпопулярніших адаптивних алгоритмів передбачає аналіз їх продуктивності в різних сценаріях, серед яких навчання під контролем, неконтрольоване навчання та навчання з підкріпленням. Серед широко використовуваних адаптивних алгоритмів – стохастичний градієнтний спуск (SGD), методи навчання з підкріпленням, зокрема Q-навчання та глибинні Q-мережі (DQN), а також еволюційні стратегії, як-от генетичні алгоритми (ГА) та оптимізація за допомогою частинок рою (PSO). SGD – це базовий метод оптимізації, що використовується в глибинному навчанні, який регулює вагу моделі циклічно, на основі вхідних даних. Він є обчислювально ефективним і широко застосовується, але може боротися із зашумленими градієнтами і вимагає уважного налаштування гіперпараметрів. Q-навчання та DQN – це методи навчання з підкріпленням, які вивчають оптимальні політики на основі досвіду, що робить їх придатними для прийняття рішень у складних динаміч-

них середовищах; однак вони часто вимагають великих обсягів навчальних даних та обчислювальних ресурсів. Еволюційні алгоритми, як-от GA і PSO, оптимізують рішення за допомогою механізмів циклічного відбору, мутації та кросингверу. Ці методи корисні для оптимізаційних задач зі складними просторами пошуку, але можуть зазнавати повільної збіжності та локальних втрат оптимуму.

Комплексне порівняння цих адаптивних алгоритмів на основі ключових показників ефективності представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння адаптивних алгоритмів за показниками ефективності [16]

Алгоритм	Його переваги	Обмеження	Обчислювальна складність	Можливі покращення
SGD	Висока точність, швидка збіжність, низькі обчислювальні витрати	Чутливість до гіперпараметрів, проблеми із зашумленими градієнтами	Низька	Адаптивна швидкість навчання, методи зменшення дисперсії
Q-learning	Висока адаптивність, придатність для складних середовищ	Високі вимоги до пам'яті, повільна збіжність у великих просторах	Висока	Функціональна апроксимація, буфер досвіду
DQN	Висока точність, ефективність у складних середовищах	Високі обчислювальні витрати, необхідність налаштування нейромережі	Дуже висока	Оптимізація пам'яті, пріоритетне відтворення досвіду
Генетичні алгоритми (GA)	Висока стійкість, ефективність у пошуку глобального оптимуму	Повільна збіжність, ризик застрягання в локальних мінімумах	Висока	Гібридизація з локальним пошуком
Метод рою частинок (PSO)	Висока адаптивність, швидша збіжність у порівнянні з GA	Чутливість до параметрів, ризик передчасної збіжності	Середня	Адаптивне коригування інерційної ваги

Усупереч перевагам цих адаптивних алгоритмів, існує кілька недоліків, які перешкоджають їх поширенню та підвищенню ефективності. Багато адаптивних методів вимагають значних обчислювальних ресурсів, особливо

підходи до навчання з підкріпленням, які передбачають тривале навчання протягом декількох циклів. Крім того, на продуктивність можуть впливати такі проблеми, як гіперчутливість до параметрів, надмірне підлаштування та нестабільність у динамічних умовах. Щоб подолати ці проблеми, науковці досліджують різні стратегії вдосконалення, зокрема гібридні моделі, які поєднують кілька алгоритмів для покращення адаптивності, автоматизовані методи налаштування гіперпараметрів та нейроморфні обчислювальні підходи, які імітують адаптивність, подібну до мозку. До того ж трансферне навчання та метанавчання привертають увагу як механізми, що дозволяють адаптивним алгоритмам узагальнювати знання з попередніх завдань для нових умов з мінімальним перенавчанням.

Варто звернути увагу на проблеми кібербезпеки, а саме на інтелектуальні системи прийняття рішень в автоматизованих засобах проведення тестування на проникнення. Адже використання машинного навчання стало важливою науковою проблемою і фактором для підвищення ефективності таких систем. Для підвищення захищеності комп'ютерних систем і мереж та підвищення швидкодії роботи аналізаторів вразливостей існує необхідність розробки нових і вдосконалення існуючих рішень на основі алгоритмів машинного навчання з залученням можливостей систем штучного інтелекту та великих мовних моделей.

Альтернативним підходом до автоматизації активного аналізу захищеності інформаційних систем і мереж є використання методів навчання з підкріпленням (RL) у рамках Марківських процесів вирішення (MDP), особливо в умовах невідомої моделі переходів. Можливості застосування RL та експертних систем у цій сфері активно досліджуються в сучасних наукових працях, зокрема [17]. Існує потенціал застосування також великих мовних моделей (LLM) у ролі так званих експертних систем прийняття рішення задля зменшення людського залучення до прийняття рішень.

Метод навчання з підкріпленням передбачає представлення простору станів, визначення набору можливих дій агента RL, а також формування функції винагороди, що визначає його ціль (тобто, бажаний результат навчання). У процесі взаємодії із середовищем агент RL поступово формує оптимальну політику дій, що спрямована на підвищення ефективності системи аналізу захищеності мереж на основі тестування на проникнення. Цей підхід свідчить про тенденцію до інтелектуалізації процесу валідації вразливостей шляхом переходу від традиційних методів підтвердження експлуатаційної можливості вразливостей до більш гнучких і адаптивних механізмів, заснованих на методах машинного навчання [18].

Висновки. Адаптивні алгоритми машинного навчання є важливим компонентом інтелектуальних систем прийняття рішень, забезпечуючи їх ефективність у складних, динамічних середовищах. Аналіз проведеного дослід-

ження показує, що методи онлайн-навчання, навчання з підкріпленням та еволюційні стратегії значно покращують точність рішень, скорочують час реакції та оптимізують розподіл ресурсів. Водночас виклики, пов'язані з високими обчислювальними витратами, стабільністю моделей та етичними аспектами, потребують подолання для масштабного впровадження таких алгоритмів.

Результати дослідження підкреслюють важливість подальшого розвитку адаптивних моделей, орієнтованих на ефективне використання обчислювальних ресурсів, підвищення інтерпретованості алгоритмів та забезпечення їх прозорості. Особливу увагу варто приділити гібридним підходам, автоматизованому налаштуванню гіперпараметрів та нейроморфним обчисленням. Перспективи подальших досліджень охоплюють розроблення енергоефективних рішень, інтеграцію змішаного навчання та застосування адаптивних алгоритмів у нових сферах, як-от розумні міста, автономні транспортні системи та персоналізована медицина.

Література:

1. Жабер А. Х. Метод побудови інтелектуальної системи рекомендацій для професійної орієнтації. *Оптика-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2023. № 46 (2). С. 22-36. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-46-2-22-36>
2. Антошук С. Г., Комлева Н. О. Оптимізаційне моделювання інтелектуальних систем діагностування. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2 (89). С. 99-108. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.14>
3. Бондаренко Т. Інтелектуальні інформаційні технології як складник цифрової трансформації освіти (аналітичний огляд). *Аналітичний вісник у сфері освіти й науки*. 2024. № 19. С. 3-23. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/741212/> (дата звернення: 20.02.2024)
4. Тарасюк А., Гамалій В., Рзаєва С. Шляхи побудови інтелектуальної системи управління агрофірмою. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2023. № 3 (19). С. 197-208. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.19.197208>
5. Лявинець Г., Люлька О., Ткачук Ю. Інтелектуальні, орієнтовані на знання технології у адаптивному менеджменті готельно-ресторанного бізнесу. *Економіка та суспільство*. 2024. № 67. С. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-91>
6. Козак Є. Б. Принципи впровадження моделей машинного навчання у сфері інтелектуального обслуговування промислового обладнання. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2021. № 3. С. 19-28. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.3.3>
7. Кошель А. В. Модульні електронні системи в умовах упровадження інноваційного машинного навчання. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. № 32 (71). С. 96 – 102. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/15>
8. Гнатченко, Д. Д. Моделювання інтелектуальної системи підтримки внутрішнього аудиту суб'єкта господарювання. *Управління розвитком складних систем*. 2023. № 54. С. 114-121. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.114-121>
9. Костюк Ю. Розробка інтелектуальних компонентів інформаційних систем. *Challenges and Issues of Modern Science*. 2023. № 1. С. 337-342. DOI: 10.6084/m9.figshare. 22886720
10. Беседовський О. Дослідження ґрунтовних відмінностей штучного інтелекту та машинного навчання. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. № 341(5). С. 515-520. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-74>

11. Радкевич О. П. Адаптивне тестування в контексті використання електронних засобів навчання: суть, розроблення та оцінювання. *Професійна педагогіка*. 2023. № 1 (26). С. 58-73. DOI: <https://doi.org/10.32835/2707-3092.2023.26>.
12. Титарчук Є. О., Супрун О. М., Товт Б. М. Ефективність та надійність адаптивних систем штучного інтелекту в умовах динамічних змін. *Ukrainian Journal of Computing Innovations*. 2024. № 1. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14066341>
13. Райко Д., Дрепін І. Стратегування розвитку підприємств у цифрову епоху: синергія маркетингу та економіки вражень. *Сталий розвиток економіки*. 2025. № 1 (52). С. 86-92. DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-52-12>
14. Кирилов С. О., Сікора Я. Б., Рябчун Ю. В. Розробка адаптивних алгоритмів роевого інтелекту у проектуванні та управлінні інженерними системами. *Механіка та математичні методи*. 2024. № 4 (2). С. 136-146. DOI: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-136-146>
15. Бойко А., Марусенко О., Метельов В., Овсяніков В. Дослідження та прогнозування часових рядів із застосуванням технологій паралельних обчислень. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2024. № 4 (22). С. 29-37. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.04.04>
16. Бердик М., Стародубський І. Використання методів машинного навчання для адаптації програмного забезпечення до різних обчислювальних платформ. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2024. № 4. С. 16-28. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-3>
17. Stefinko Y., Piskozub A. Theory of Modern Penetration Testing Expert System. *Information Processing Systems*. 2017. Issue 2 (148). P. 129–134.
18. Kyrychok R., Shuklin G. The method of building a knowledge base for decision-making when validating corporate networks vulnerabilities. *Scientific Discussion*. 2020. Vol. 1, No. 47. P. 7–11.

References:

1. Zhaber, A. Kh. (2023). Metod pobudovy intelektualnoi systemy rekomendatsii dlya profesiinoi orientatsii [Method for building an intelligent recommendation system for career guidance]. *Optyko-elektronni informatsiino-energetychni tekhnologhii – Optoelectronic Information-Energy Technologies*, 46 (2), 22-36. DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-46-2-22-36> [in Ukrainian].
2. Antoshchuk, S. H., & Komleva, N. O. (2024). Optyimizatsiine modeliuвання intelektualnykh system diahnostuvannya [Optimization modeling of intelligent diagnostic systems]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, 2 (89), 99-108. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.14> [in Ukrainian].
3. Bondarenko, T. (2024). Intelektualni informatsiini tekhnologhii yak skladnyk tsyfrovoy transformatsii osvity (analitichnyi ohliad) [Intelligent information technologies as a component of digital transformation in education (analytical review)]. *Analitichnyi visnyk u sferi osvity y nauky – Analytical Bulletin in the Field of Education and Science*, 19, 3-23. Retrieved from: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/741212/> (accessed: 20.02.2024) [in Ukrainian].
4. Tarasiuk, A., Hamalii, V., & Rzaieva, S. (2023). Shliakhy pobudovy intelektualnoi systemy upravlinnia ahrofirmoiu [Ways to build an intelligent management system for an agricultural firm]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika – Cybersecurity: Education, Science, Technology*, 3 (19), 197-208. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.19.197208> [in Ukrainian].

5. Liavynets, H., Liulka, O., & Tkachuk, Yu. (2024). Intelktualni, orientovani na znannia tekhnologhii u adaptivnomu menedzhmenti hotelno-restorannoho biznesu [Intelligent, knowledge-oriented technologies in adaptive management of the hotel and restaurant business]. *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society*, 67. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-91> [in Ukrainian].

6. Kozak, Ye. B. (2021). Printsypy vprovadzhennia modelei mashynnoho navchannia u sferi intelektualnogo obsluhovuvannia promyslovoho obladnannia [Principles of implementing machine learning models in the field of intelligent servicing of industrial equipment]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky – Tavriiskyi Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, 3, 19-28. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.3.3> [in Ukrainian].

7. Koshel, A. V. (2021). Modulni elektronni systemy v umovakh uprovadzhennia innovatsiinoho mashynnoho navchannia [Modular electronic systems in the context of innovative machine learning implementation]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of TNU Named after V.I. Vernadsky. Series: Technical Sciences*, 32 (71), 96-102. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/15> [in Ukrainian].

8. Hnatchenko, D. D. (2023). Modeliuvannia intelektualnoi systemy pidtrymky vnutrishnoho audytu sub'ekta hospodarivannia [Modeling an intelligent support system for internal auditing of an economic entity]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system – Management of Complex Systems Development*, 54, 114-121. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.54.114-121> [in Ukrainian].

9. Kostiuk, Yu. (2023). Rozrobka intelektualnykh komponentiv informatsiinykh system [Development of intelligent components of information systems]. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 337-342. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22886720> [in Ukrainian].

10. Besedovskyi, O. (2024). Doslidzhennia hruntovnykh vidminnostei shtuchnoho intelektu ta mashynnoho navchannia [Study of fundamental differences between artificial intelligence and machine learning]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 341 (5), 515-520. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-74> [in Ukrainian].

11. Radkevych, O. P. (2023). Adaptivne testuvannia v konteksti vykorystannia elektronnykh zasobiv navchannia: sut, rozroblennia ta otsiniuvannia [Adaptive testing in the context of using electronic learning tools: essence, development, and evaluation]. *Profesiina pedahohika – Professional Pedagogy*, 1 (26), 58-73. DOI: <https://doi.org/10.32835/2707-3092.2023.26> [in Ukrainian].

12. Tytarchuk, Ye. O., Suprun, O. M., & Tovt, B. M. (2024). Efektyvnist ta nadiinist adaptivnykh system shtuchnoho intelektu v umovakh dynamichnykh zmin [Effectiveness and reliability of adaptive artificial intelligence systems in dynamic change conditions]. *Ukrainian Journal of Computing Innovations*, 1. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14066341> [in Ukrainian].

13. Raiko, D., & Drepin, I. (2025). Stratehuvannia rozvytku pidpriemstv u tsyfrovu epokhu: synerhiia marketynhu ta ekonomiky vrazhen [Enterprise development strategy in the digital era: synergy of marketing and experience economy]. *Stalyi rozvytok ekonomiky – Sustainable Economic Development*, 1 (52), 86-92. DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-52-12> [in Ukrainian].

14. Kyrylov, S. O., Sikora, Ya. B., & Ryabchun, Yu. V. (2024). Rozrobka adaptivnykh alhorytmiv roevoho intelektu u proektuvanni ta upravlinni inzhenernymy systemamy [Development of adaptive swarm intelligence algorithms in the design and management of engineering systems]. *Mekhanika ta matematychni metody – Mechanics and Mathematical Methods*, 4 (2), 136-146. DOI: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-136-146> [in Ukrainian].

15. Boiko, A., Marusenko, O., Meteliov, V., & Ovsianikov, V. (2024). Doslidzhennia ta prohnouzuvannia chasovykh riadiv iz zastosuvanniam tekhnologii paralelnykh obchyslen [Research and forecasting of time series using parallel computing technologies]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Novi rishennia u suchasnykh tekhnologiiakh – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technologies*, 4 (22), 29-37. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.04.04> [in Ukrainian].

16. Berdyk, M., & Starodubskiy, I. (2024). Vykorystannia metodiv mashynnoho navchannia dlia adaptatsii prohramnoho zabezpechennia do riznykh obchyslenuvalnykh platform [Application of machine learning methods for software adaptation to different computing platforms]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 4, 16-28. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-3> [in Ukrainian]

17. Stefinko, Y., & Piskozub, A. (2017). Theory of modern penetration testing expert system. *Information Processing Systems*, (2)(148), 129–134. [in English].

18. Kyrychok, R., & Shuklin, G. (2020). The method of building a knowledge base for decision-making when validating corporate networks vulnerabilities. *Scientific Discussion*, 1(47), 7–11. [in English].