

САВЧЕНКО ЯРОСЛАВ

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

<https://orcid.org/0009-0008-0381-0224>e-mail: [yaroslav.savchenko@e-u.edu.ua](mailto:yaroslav.savchenko@e-u.edu.ua)

ЯГОДЗІНСЬКИЙ СЕРГІЙ

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

<https://orcid.org/0000-0001-8755-2235>e-mail: [serhii.yahodzinskyi@e-u.edu.ua](mailto:serhii.yahodzinskyi@e-u.edu.ua)

ЛИТВІНЕНКО ЛЕОНІД

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

<https://orcid.org/0000-0002-0828-383X>e-mail: [leonid.lytvynenko@e-u.edu.ua](mailto:leonid.lytvynenko@e-u.edu.ua)

СУШІНСЬКИЙ ОРЕСТ

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

<https://orcid.org/0000-0002-2661-6458>e-mail: [orest.sushynskyi@e-u.edu.ua](mailto:orest.sushynskyi@e-u.edu.ua)

## АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, набули значного поширення у цивільному суспільстві завдяки своїй універсальності та широким можливостям. Раніше використовували переважно у військових цілях, сьогодні дрони знайшли застосування у багатьох галузях, включаючи сільське господарство, будівництво, екологічний моніторинг, логістику, охорону здоров'я, та розваги. Вони здатні виконувати різноманітні завдання, від аерофотозйомки та картографування до моніторингу стану сільськогосподарських угідь і доставки товарів. Завдяки здатності виконувати складні операції автономно або під керуванням оператора, БПЛА стали незамінними інструментами в багатьох професійних сферах.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, дрони, різновиди БПЛА, мультикоптери, застосування БПЛА, квадрокоптери, польотні контролери, автономний політ, відеозйомка, регулятори обертів двигуна.

SAVCHENKO YAROSLAV, YAHODZINSKYI SERHII, LYTVYNENKO LEONID, SUSHYNSKYI OREST

Private higher educational institution "European University"

## HARDWARE AND SOFTWARE AND APPLICATION OF UNMANNED AIRCRAFT

Unmanned aerial vehicles (UAVs), or drones, have gained significant popularity in civilian society due to their versatility and wide range of capabilities. Previously used primarily for military purposes, today drones have found applications in many industries, including agriculture, construction, environmental monitoring, logistics, healthcare, and entertainment. They are capable of a variety of tasks, from aerial photography and mapping to monitoring farmland and delivering goods. With the ability to perform complex operations autonomously or under the control of an operator, UAVs have become indispensable tools in many professional fields. Flight controllers such as the Navio 2 play a key role in stabilizing and controlling flight. Navio 2, being an expansion board for Raspberry Pi, provides full flight controller functionality. They integrate various sensors, including GPS, accelerometers and gyroscopes, which allows for accurate positioning and flight stability. These controllers allow the drone to perform autonomous missions, follow set trajectories and maintain a stable position in the air.

Engine speed governors control the speed of rotation of the engines, which ensures a smooth and stable flight. Prospects for further exploration also include the integration of UAVs with other technologies, such as artificial intelligence and the Internet of Things (IoT), which will allow the creation of even more autonomous and intelligent systems. For example, the use of artificial intelligence can improve drones' ability to make autonomous decisions in complex situations, and integration with the IoT will allow large networks of drones to be more efficiently managed for coordination tasks.

Keywords: unmanned aerial vehicles, drones, types of UAVs, multicopters, UAV applications, quadcopters, flight controllers, autonomous flight, video recording, engine speed controllers.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) потребує забезпечення високої ефективності, надійності та автономності. Основні проблеми, з якими стикаються розробники дронів, включають оптимізацію енергоспоживання, стабільність роботи в різних умовах та безпеку польотів. Високий рівень енергоспоживання обмежує тривалість польоту, що є критичним для виконання довготривалих місій. Стабільність роботи в різних погодних та експлуатаційних умовах є важливою для забезпечення надійності та точності виконання завдань. Безпека польотів включає в себе уникнення зіткнень, надійність систем управління та можливість безпечного повернення у разі відмови системи. Розв'язання цих проблем є важливим для подальшого розвитку та широкого впровадження БПЛА у різні сфери діяльності, такі як сільське господарство, будівництво, екологічний моніторинг та військова сфера.

### Аналіз досліджень та публікацій

Дослідження в галузі БПЛА зосереджуються на вдосконаленні апаратного та програмного забезпечення, підвищенні точності навігації, збільшенні тривалості польоту та покращенні стабілізації. Наприклад, впровадження нових алгоритмів управління та сенсорних технологій дозволяє покращити стабільність польоту та точність виконання завдань. Розвиток технологій у цій сфері сприяє розширенню

можливостей використання дронів, роблячи їх незамінними інструментами у багатьох галузях. Останні дослідження також зосереджуються на інтеграції БПЛА з іншими системами, такими як штучний інтелект та інтернет речей (IoT), що дозволяє створювати ще більш автономні та ефективні системи.

### Формулювання цілей статті

Мета цього дослідження полягає у вивченні різних типів БПЛА, аналізі їхніх можливостей та визначенні оптимальних сфер застосування. Основними завданнями є аналіз переваг і недоліків кожного типу дронів, а також надання рекомендацій щодо вибору оптимального типу БПЛА для конкретних завдань. Дослідження також має на меті виявити перспективні напрями розвитку технологій БПЛА та можливості їх впровадження у нові галузі.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Застосування безпілотних літальних апаратів значно розширилося в останні роки, охоплюючи нові сфери і відкриваючи нові можливості для різних галузей. БПЛА використовуються для аерофотозйомки, моніторингу інфраструктури, виконання пошуково-рятувальних операцій, медичних досліджень та навчання операторів. Вони дозволяють ефективно виконувати завдання завдяки своїй автономності, маневреності та точності. Наприклад, у сільському господарстві дрони використовуються для моніторингу стану врожаю, виявлення проблем із зрошенням або хворобами рослин, а також для внесення добрив та пестицидів з високою точністю. У будівництві дрони допомагають здійснювати інспекцію будівельних об'єктів, що знижує ризики для працівників та підвищує ефективність роботи.

### Різновиди БПЛА

Безпілотні літальні апарати поділяються на три основні категорії. Безпілотні літаки здатні долати значні відстані та проводити складну аерозйомку при різних погодних умовах. Вони можуть залишатися в повітрі від 30 хвилин до 8 годин, однак процеси зльоту та посадки є досить складними. Для зльоту необхідно використовувати спеціальний пристрій (катапульту), щоб надати апарату початкову швидкість. Посадка вимагає наявності посадкової смуги або здійснюється за допомогою парашута, що значно ускладнює точність посадки. Крім того, посадка з використанням парашутної системи може призвести до перевантажень, що негативно позначається на незахищених елементах корисного навантаження та фотообладнанні.

Безпілотні вертольоти мають здатність до вертикального зльоту і посадки без використання спеціальних пристроїв, але вони є більш вимогливими до погодних умов. Їхньою перевагою є можливість виконання авторотації для зниження ризику пошкоджень при відмові двигуна. Час польоту коливається від 30 хвилин до 3 годин. Конструкція таких безпілотних літальних апаратів є складнішою у порівнянні з літаками або мультіроторними апаратами, оскільки вимагає наявності складного автомата перекошу лопатей основного і хвостового гвинтів.

Мультимоторні безпілотні апарати, або мультикоптери, володіють кількома несучими гвинтами, що забезпечує стабільний політ і можливість вертикального зльоту. Вони прості у керуванні та не потребують складних конструкційних елементів, що робить їх дешевшими в обслуговуванні. Зазвичай конструкція таких дронів включає 3, 4, 6, 8 або 12 гвинтів. Найбільш поширеною стала конструкція з мультіроторним приводом, що містить чотири групи двигунів з вентилями, кожна з яких складається з двигуна і гвинта з постійним кроком. Такі дрони компактні, легкі в збірці та налаштуванні і мають порівняно низьку вартість та споживання енергії.

### Можливості БПЛА

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) виконують різноманітні завдання в багатьох сферах діяльності. Вони використовуються для аерофотозйомки, отримуючи високоякісні знімки та відео з повітря, що дозволяє моніторити стан інфраструктури, доріг та сільськогосподарських угідь. У сфері екологічного моніторингу дрони допомагають виявляти забруднення та оцінювати стан навколишнього середовища.

У пошуково-рятувальних операціях БПЛА є незамінними інструментами для пошуку людей і тварин у важкодоступних районах, забезпечуючи швидкий огляд великої території та надаючи рятувальникам цінну інформацію про місцезнаходження потерпілих. Медичні дослідження також виграють від використання дронів: вони збирають дані про розповсюдження захворювань і допомагають в моніторингу популяцій комарів, що є переносниками небезпечних інфекцій.

Навчання операторів та пілотів БПЛА стає все більш популярним завдяки можливості використання дронів для моделювання різних ситуацій та відпрацювання навичок без ризику для життя та здоров'я. Також дрони активно застосовуються у будівництві для інспекції будівельних об'єктів та у гірничодобувній промисловості для картографування та моніторингу видобутку корисних копалин.

У комерційних цілях БПЛА використовуються для зйомки фільмів та рекламних роликів, надаючи можливість отримувати унікальні кадри з повітря. Крім того, дрони знаходять своє застосування в аграрному секторі для моніторингу стану врожаю, виявлення проблем із зрошенням або хворобами рослин, а також для внесення добрив та пестицидів з високою точністю.

Військове використання БПЛА залишається однією з найважливіших сфер їхнього застосування. Дрони використовуються для розвідувальних операцій, забезпечуючи військових цінною інформацією про місцезнаходження ворожих сил, їхні переміщення та інфраструктуру. Вони можуть виконувати завдання з наведення артилерійських ударів, точно вказуючи цілі та знижуючи ризик для наземних сил. Крім того, БПЛА застосовуються для моніторингу бойових дій, оцінки збитків та пошуку поранених солдатів на полі

бою. Використання дронів значно підвищує ефективність військових операцій, зменшуючи ризики для людських життів та надаючи можливість оперативного реагування на зміни в бойовій обстановці.

### Контролери польоту

Контролери польоту є важливим компонентом безпілотних літальних апаратів, оскільки вони забезпечують стабільність та точність польоту. Основні польотні контролери, що використовуються у БПЛА, включають Pixhawk, APM (ArduPilot Mega), Naze32, DJI Naza та SP Racing F3.

Pixhawk є одним із найбільш популярних контролерів польоту. Він має потужний 32-бітний процесор та великий набір сенсорів, включаючи акселерометри, гіроскопи та магнітометри. Pixhawk підтримує різноманітні програмні платформи, такі як PX4 та ArduPilot, що дозволяє використовувати його для різних типів безпілотних апаратів, від мультикоптерів до літаючих крил. Цей контролер відомий своєю надійністю та широкими можливостями налаштування.

APM (ArduPilot Mega) є одним із перших відкритих контролерів польоту. Він базується на 8-бітному процесорі та підтримує платформу ArduPilot. APM широко використовується для створення саморобних дронів завдяки своїй простоті та доступності. Хоча він має менше сенсорів і обчислювальної потужності порівняно з Pixhawk, APM все ще є популярним вибором для аматорських проєктів.

Naze32 є компактним і високопродуктивним контролером польоту, розробленим спеціально для гоночних дронів. Він базується на 32-бітному процесорі STM32 і має вбудовані сенсори для стабілізації польоту. Naze32 підтримує програмну платформу Cleanflight, що забезпечує високу швидкість обробки даних і низьку затримку, що є критично важливим для гоночних дронів.

DJI Naza є одним із найпопулярніших комерційних контролерів польоту, розроблених компанією DJI. Цей контролер відомий своєю надійністю та простотою використання. DJI Naza має вбудовані GPS і барометр, що дозволяє забезпечити точне позиціонування та стабілізацію польоту. Він часто використовується в комерційних дронах для аерофотозйомки та відеозйомки.

SP Racing F3 є ще одним популярним контролером польоту для гоночних дронів. Він базується на 32-бітному процесорі STM32 і має вбудовані сенсори для стабілізації польоту. SP Racing F3 підтримує програмну платформу Cleanflight і має високу швидкість обробки даних, що робить його ідеальним для використання у швидкісних та маневрових дронах.

### Апаратно-програмна частина

Ефективність роботи безпілотних літальних апаратів забезпечується завдяки використанню різних апаратних та програмних компонентів. Одноплатні комп'ютери, такі як Raspberry Pi, використовуються для обробки даних та керування різними системами дронів. Вони забезпечують потужну обчислювальну базу для виконання складних алгоритмів та обробки даних у реальному часі. Raspberry Pi дозволяє інтегрувати різноманітні датчики та інші периферійні пристрої, що значно розширює можливості дронів.

Польотні контролери, такі як Navio 2, відіграють ключову роль у стабілізації та управлінні польотом. Navio 2, будучи розширювальною платою для Raspberry Pi, забезпечує повну функціональність польотного контролера. Вони інтегрують у себе різні сенсори, включаючи GPS, акселерометри та гіроскопи, що дозволяє забезпечити точне позиціонування та стабільність польоту. Ці контролери дозволяють дрону виконувати автономні місії, слідувати заданим траєкторіям та стабільно утримувати позицію в повітрі.

Регулятори обертів двигуна контролюють швидкість обертання двигунів, що забезпечує плавний і стабільний політ. Ці регулятори дозволяють швидко реагувати на команди польотного контролера, забезпечуючи необхідну потужність і швидкість обертання для підтримання стабільності та маневровості дрона. Регулятори обертів, такі як Skywalker, забезпечують надійну роботу двигунів та підтримку різних типів акумуляторів, що дозволяє використовувати дрони у різних умовах.

Безщіткові двигуни забезпечують високу ефективність та надійність, оскільки вони мають менше зношуваних частин порівняно з щітковими двигунами. Вони забезпечують високу потужність та тривалий термін служби, що є критично важливим для безпілотних літальних апаратів, які працюють у складних умовах та під високими навантаженнями. Двигуни серії EMAX GT, наприклад, відзначаються кращою сумісністю з різними регуляторами швидкості та гвинтами, що робить їх оптимальним вибором для багатьох застосувань.

### Програмне забезпечення

Програмне забезпечення відіграє ключову роль у функціонуванні безпілотних літальних апаратів (БПЛА), забезпечуючи їхню автономність, стабільність та ефективність виконання завдань. Основні програмні платформи, що використовуються для управління БПЛА, включають ArduPilot, PX4, та Cleanflight.

ArduPilot є однією з найбільш популярних відкритих платформ для управління безпілотниками. Вона підтримує різні типи БПЛА, включаючи мультикоптери, літаки та роверів. ArduPilot забезпечує широкий спектр можливостей, таких як автономне планування маршрутів, точне утримання позиції, стабілізація польоту та автоматичне повернення додому при втраті зв'язку або розрядженні батареї. Програмне забезпечення постійно оновлюється та вдосконалюється завдяки активній спільноті розробників та користувачів.

PX4 - це ще одна популярна платформа з відкритим вихідним кодом, яка підтримує широкий спектр безпілотних літальних апаратів. Вона забезпечує високий рівень гнучкості та адаптивності завдяки модульній архітектурі, що дозволяє розробникам легко додавати нові функціональні можливості. PX4 також

підтримує різноманітні сенсори та периферійні пристрої, що робить її універсальною платформою для розробки складних автономних систем.

Cleanflight - це програмне забезпечення, яке спеціалізується на управлінні гоночними дронами. Воно відома своєю високою швидкістю обробки даних та низькою затримкою, що є критично важливим для змагань та виконання швидкісних маневрів. Cleanflight підтримує широкий спектр контролерів польоту, таких як Naze32 та SP Racing F3, і забезпечує стабільність польоту та точне управління.

Для програмування та налаштування БПЛА використовуються різні інструменти та середовища розробки. Одним із найпоширеніших є Mission Planner - програмне забезпечення для планування місії, налаштування параметрів польоту та моніторингу роботи дрона в реальному часі. Mission Planner надає зручний інтерфейс для управління дроном, дозволяючи користувачам легко створювати маршрути, задавати точки на карті та налаштовувати автоматичні дії.

Іншим важливим інструментом є QGroundControl, який підтримує платформу PX4 і забезпечує багатофункціональний інтерфейс для управління БПЛА. QGroundControl дозволяє налаштовувати параметри польоту, моніторити телеметрію, аналізувати дані польоту та планувати складні місії з високою точністю.

Крім основного програмного забезпечення для управління польотом, існують також спеціалізовані додатки для обробки зібраних даних. Наприклад, DroneDeploy та Pix4D використовуються для створення карт та 3D моделей на основі аерофотозйомки, що дозволяє отримувати точну геопросторову інформацію для різних галузей, включаючи будівництво, сільське господарство та екологічний моніторинг.

### **Рій дронів**

Рій дронів - це група безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які працюють разом для виконання спільних завдань. Використання рою дронів забезпечує розподілену роботу, збільшує область покриття та знижує ризики. Кожен дрон у рої може виконувати певну функцію, наприклад, зйомку відео, дистанційне зондування або доставку.

Застосування рою дронів дозволяє значно підвищити ефективність виконання завдань завдяки їхній здатності до координації та взаємодії. Коли дрони працюють у рої, вони можуть покривати більшу територію, виконуючи більше завдань за короткий час. Це особливо корисно для моніторингу великих площ, наприклад, у сільському господарстві або при пошуково-рятувальних операціях. У разі відмови одного з дронів, решта продовжують виконувати місію, забезпечуючи безперервність роботи.

Розподілена робота дозволяє кожному дрону в рої виконувати специфічні завдання. Дрони можуть бути налаштовані для знімання відео, дистанційного зондування, доставки вантажів або інших операцій. Завдяки алгоритмам штучного інтелекту, дрони у рої можуть взаємодіяти один з одним, координувати свої дії та адаптуватися до змінних умов.

Синхронізований політ рою дронів дозволяє їм виконувати складні маневри та літати в формаціях, що додає естетичної цінності та спеціальних ефектів для різних шоу та виставок. Наприклад, дрони можуть літати в формі геометричних фігур або слідувати певним траєкторіям, створюючи вражаючі візуальні ефекти.

Розподілена обробка даних є ще однією перевагою використання рою дронів. Дані, зібрані кожним дроном, можуть оброблятися як на борту самого дрона, так і централізовано на наземній станції. Це дозволяє ефективно використовувати обмежені ресурси та швидко реагувати на зміни в навколишньому середовищі.

### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) демонструють широкий спектр можливостей і знаходять застосування в різних галузях, включаючи сільське господарство, будівництво, екологічний моніторинг, пошуково-рятувальні операції, медичні дослідження та військову сферу. Їхня здатність виконувати завдання з високою автономністю, маневреністю та точністю робить їх незамінними інструментами для багатьох професій.

Ефективне виконання завдань БПЛА забезпечується завдяки інтеграції передових апаратних і програмних компонентів, таких як потужні польотні контролери, високоефективні безщіткові двигуни та гнучкі програмні платформи. Важливою складовою успіху БПЛА є також їхня здатність до автономної роботи та координації в рамках рою дронів, що дозволяє виконувати складні місії та розподіляти завдання між кількома апаратами.

Подальші дослідження у галузі БПЛА зосереджуються на вдосконаленні існуючих технологій та розширенні функціональних можливостей дронів. Це включає розробку нових сенсорів і алгоритмів для покращення навігації та стабілізації польоту, збільшення тривалості польоту за рахунок оптимізації енергоспоживання, а також підвищення безпеки польотів через удосконалення систем виявлення та уникнення перешкод.

Перспективи подальших розвідок також включають інтеграцію БПЛА з іншими технологіями, такими як штучний інтелект та інтернет речей (IoT), що дозволить створювати ще більш автономні та розумні системи. Наприклад, використання штучного інтелекту може покращити здатність дронів до самостійного прийняття рішень у складних ситуаціях, а інтеграція з IoT дозволить ефективніше керувати великими мережами дронів для виконання координаційних завдань.

Таким чином, безпілотні літальні апарати мають великий потенціал для подальшого розвитку і впровадження у нові сфери діяльності. Постійне вдосконалення технологій та розширення можливостей

БПЛА сприятимуть їхньому широкому використанню та відкриватимуть нові горизонти для застосування у різних галузях економіки та суспільства.

### Література

1. Тимошенко О. І., Литвиненко Л. О., Колодінська Я. О. Загрози та безпека кіберпростору в умовах сучасних викликів: проблеми, інструменти, рішення. Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації: колективна монографія / за заг. наук. ред. А.М. Давиденко, Київ: Європейський університет, 2023. – С. 10-18.
2. Пашорін В. І., Скларенко О. В., Милашенко В. М. Аналіз протоколу для побудови захищеної комп'ютерної мережі на прикладі IPsec. Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації: колективна монографія / за заг. наук. ред. А.М. Давиденко, Київ: Європейський університет, 2023. – С. 108-114.
3. Paul G. Fahlstrom, Thomas J. Gleason, Mohammad H. Sadraey, Peter Belobaba, Jonathan Cooper, Allan Seabridge. Introduction to UAV Systems. Wiley, 2022. 464 с.
4. Bernardo Malfitano. Simplified UAV Design for Students. Independently published, 2023. 169 с.
5. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, 2017. 410 с.
6. Fei Hu, DongXiu Ou, Xin-lin Huang. UAV Swarm Networks: Models, Protocols, and Systems: Models, Protocols, and Systems. CRC Press, 2022. 304 с.
7. Ginés García-Mateos, José Miguel Molina-Martínez. Applications of Remote Image Capture System in Agriculture. Mdpi AG, 2020. 301 с.
8. Don Shift. SHTF Tactical Drone Manual: A prepared citizen's guide to using drones for defensive purposes. Independently published, 2024. 156 с.
9. Ian Cinnamon, Romi Kadri, Fitz Tepper. DIY Drones for the Evil Genius: Design, Build, and Customize Your Own Drones. McGraw Hill TAB, 2016. 176 с.
10. Arnold Adams. AI-Powered Drones: Applications and Challenges. Independently published, 2023. 42 с.
11. Sumit Sharma. Drone Development from Concept to Flight: Design, assemble, and discover the applications of unmanned aerial vehicles. Packt Publishing, 2024. 316 с.

### References

1. Lakhno, V.A., Kasatkin, D.Y., Skliarenko, O.V., Kolodinska, Y.O. Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment // Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 269. Springer, Singapore. – 2022 – p. 9-22.
2. Nikolaievskiy O.Iu., Skliarenko O.V., Sydorhuk A. Analysis and comparison of face detection Apis // Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii. - 2019.- № 4 (65) –S.121-133
3. Skliarenko O.V., Nikolaievskiy O.Iu., Biometrychni systemy bezpeky: rozpoznavannia oblych // Aktualni pytannia zabezpechennia kiberbezpeky ta zakhystu informatsii. Materialy VII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii 24–27 liutoho 2021 r.- Kyiv-2021.- Vydavnytstvo Yevropeiskoho universytetu. – S. 85-87.
4. Pashorin V. I., Skliarenko O.V., Mylashenko V.M. Analiz tekhnolohii zakhystu kompiuternykh merezh na bazi system vyivlennia vtornhen. Aktualni pytannia zabezpechennia kiberbezpeky ta zakhystu informatsii: kolektyvna monohrafiia / za zah. nauk. red. A.M. Davydenko, Kyiv: Yevropeyskyi universytet, 2023. – S. 93-108.
5. Zhang, W., Shen, J., Zhang, L., Liu, L., & Li, X. (2020). Hlyboke navchannia v optychnomu zobrazheni: pryntsyipy ta zastosuvannia. Advanced Photonics, 2(2), 026002.
6. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Hlyboke navchannia. Vydavnytstvo MIT.
7. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Hlyboke navchannia. Nature, 521(7553), 436-444.
8. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Konvoliutsiini merezhi dlia sehmentatsii biomedychnykh zobrazhen. Mizhnarodna konferentsiia z obrobky medychnykh zobrazhen ta kompiuterno-pidtrymanoï interventsii (stor. 234-241). Springer, Cham.
9. Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., ... & Sánchez, C. I. (2017). Ohliad hlybokoho navchannia v medychnomu analizi zobrazhen. Analiz medychnykh zobrazhen, 42, 60-88.
10. Zhou, Z., Siddiquee, M. M. R., Tajbakhsh, N., & Liang, J. (2018). UNet++: Vkladna arkhitektura U-Net dlia sehmentatsii medychnykh zobrazhen. Hlyboke navchannia v medychnomu analizi zobrazhen ta bahatomodalnomu navchanni dlia klinichnoho pryiniattia rishen (stor. 3-11). Springer, Cham.
11. Wang, S., Zhou, M., Liu, Z., Gu, D., Zang, Y., ... & Feng, R. (2019). Tsentralni fokusovani zvorotni zviazky konvoliutsiinykh neironnykh merezh: rozrobka modeli, zasnovanoi na danykh, dlia sehmentatsii pukhlyn lehen. Analiz medychnykh zobrazhen, 55, 88-101.