



АРЧАКОВА ОЛЕКСАНДРА ВІКТОРІВНА
кандидат технічних наук, доцент кафедри тактики,
Київський інститут Національної гвардії України
<https://orcid.org/0009-0000-2260-4751>

РОЗВИТОК ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ЕВОЛЮЦІЮ БЕЗПЛОТНОЇ АВІАЦІЇ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Здійснено комплексний системний аналіз взаємозв'язку між розвитком інформаційних технологій і трансформацією військової безпілотної авіації. Показано, що сучасні бойові дії, зокрема повномасштабна агресія проти України, засвідчили перехід безпілотних літальних апаратів від допоміжного засобу до провідного інструменту для розвідки, коригування вогню, проведення ударних операцій тощо.

Розкрито ключову роль інформаційних технологій у сучасній війні, визначено і проаналізовано критичні технології, які надають стратегічну й тактичну перевагу.

Дослідженням охоплено історичну еволюцію безпілотних літальних апаратів і деталізовано синергетичний вплив на їхній функціонал п'яти ключових ІТ-інновацій: штучний інтелект, сенсорна фузія, хмарні й периферійні обчислення, інтернет речей, мережеві архітектури роїв.

Використано (на теоретичному рівні) такі методи досліджень, як аналіз наукової літератури, системний та порівняльний аналіз.

Ключові слова: *безпілотної авіація; БПЛА; дрони; штучний інтелект; сенсорна фузія; хмарні й периферійні обчислення; інтернет речей; мережеві архітектури роїв.*

Постановка проблеми. Тактика ведення бойових дій у сучасних військових операціях, особливо під час повномасштабної агресії проти України, зазнала докорінних змін: безпілотної авіація стала відігравати провідну роль як незамінний інструмент для розвідки, коригування вогню, ударних операцій та здобуття інформаційної переваги [1]. Визнання критичної ролі безпілотної авіації на полі бою зумовило створення Сил безпілотних систем як окремого роду військ у структурі Збройних Сил України [2].

Слід зауважити, що розвиток безпілотної авіації військового призначення базується на поєднанні сучасних технологічних рішень і бойового досвіду. Проте наразі бракує комплексного розуміння щодо того, які новітні технології впливають на якість та ефективність застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і забезпечують їхню перевагу під час виконання бойових завдань.

Сформульована проблема потребує дослідження, яке має ідентифікувати, проаналізувати і структурувати механізми

впливу кожної технології, аби визначити, яким чином ці технологічні рішення забезпечують нові бойові можливості безпілотної авіації і трансформують роль людини-оператора у сучасному збройному конфлікті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роль БПЛА в сучасних військових конфліктах досліджується такими українськими науковцями, як Ю. Ф. Кучеренко, М. В. Науменко, М. Ю. Кузнецова, В. А. Лупандін, Г. В. Мегельбей, О. Й. Мацько, Т. Л. Куртсеїтов, П. О. Міроненко [4, 5]. Автори розглядають безпілотну літальну авіацію як елемент повітряної компоненти, аналізують роль БПЛА в сучасних військових конфліктах, наголошуючи на їх значенні для завоювання й утримання інформаційної переваги у мережецентричних операціях. У зазначених наукових дослідженнях окреслюється майбутній напрям розвитку безпілотної авіації, проте питання щодо технологічних передумов розвитку БПЛА, їх наслідків і викликів науковцями не розглядаються.

Деякі аспекти технічного розвитку та його результати висвітлено у працях В. П. Горбуліна і С. П. Мосова [6, 7, 8]. Автори акцентують на тому, що трансформація БПЛА є багатовимірним процесом, який охоплює не лише технічні аспекти, а й глибокі етичні, правові й доктринальні зміни, що так само потребують постійного дослідження. Однак питання комплексного й системного аналізу взаємозв'язку між сучасними інформаційними технологіями і їхнім синергетичним впливом на еволюцію військових БПЛА не розкрито.

Еволюцію та вплив безпілотних літальних апаратів у сучасних збройних конфліктах досліджує І. О. Тонконог [9]. Він простежує зростання застосування БПЛА із середини 2000-х років дотепер, зокрема актуальний досвід їх застосування у російсько-українській війні, де БПЛА продемонстрували здатність впливати на хід бойових дій. Однак автор не заглиблюється у конкретні ІТ-інновації, їхні архітектури, результати та інші аспекти інтеграції передових ІТ у військові БПЛА.

Деякі сучасні інформаційні технології проаналізовано іноземними дослідниками [10, 11], проте не надано комплексного аналізу інших ключових інформаційних технологій. Крім того, головний фокус досліджень зосереджено на загальних принципах інформаційних технологій, а не на специфічних військових викликах і їх вирішенні.

Отже, на сьогодні питання спільного розвитку інформаційних технологій і безпілотної авіації військового призначення цілком не розкрито й потребує подальшого дослідження.

Наукова новизна здійсненого дослідження полягає у розробленні базової архітектури взаємозв'язку сучасних технологічних рішень і функціоналу безпілотних літальних апаратів військового призначення, яка поєднує сучасні інформаційні технології з огляду на специфіку безпілотної авіації військового призначення. Це дає змогу оптимізувати розподіл наявних обчислювальних, фінансових та людських ресурсів.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації ресурсів у розвитку перспективних безпілотних систем, а також для навчання військових фахівців (інженерів та операторів БПЛА).

Мета статті – надати комплексний огляд сучасного стану й перспектив розвитку безпілотної авіації військового призначення під

впливом інформаційних технологій, а також систематизувати і проаналізувати ключові інформаційні технології та їх трансформаційний вплив на функціонал військових безпілотних літальних апаратів.

Виклад основного матеріалу. Ідея використання безпілотних літальних апаратів у військових цілях виникла на початку ХХ ст. Перші прототипи, такі собі «літаючі торпеди» часів Першої світової війни (наприклад, Kettering Bug, розроблений у США), були спробою створити дистанційно керовані літальні апарати-снаряди [12]. Їхня надійність і точність були низькими, проте вони заклали підґрунтя для подальших розробок концепції «безпілотного літака», здатного досягати цілі без прямої участі пілота.

Під час Другої світової війни Німеччина активно застосовувала крилаті ракети V-1, які за своєю сутністю були ранніми БПЛА-снарядами, призначеними для ударів по цілях без пілота [13]. Союзники також експериментували з радіокерованими літаками-мішенями (наприклад, американський Target Drone OQ-2 Radioplane) для тренування протиповітряної оборони [14]. Це був важливий крок у становленні технологій дистанційного керування та автопілотування.

Значний поштовх до розвитку військових БПЛА дала В'єтнамська війна. США широко використовували розвідувальні БПЛА, зокрема Ryan AQM-34 Firebee, для збирання розвідувальної інформації над територією противника, насиченою системами ППО [15]. Ці апарати давали змогу отримувати критично важливі дані про позиції ворога, його пересування та інфраструктуру, водночас зменшуючи втрати серед льотного складу.

У Війні Судного дня (1973 р., Ізраїль) ізраїльські військові активно використовували розвідувальні БПЛА, такі як Firebee та Tadiran Mastiff, для моніторингу єгипетських і сирійських позицій. В операції «Артзав 19» (1982 р., Ліван) дрони також відігравали важливу роль у наданні розвідувальної інформації в умовах високої загрози від систем ППО, зменшуючи ризики для пілотованої авіації. Зокрема йдеться про застосування дронів для виявлення і придушення ворожих зенітно-ракетних комплексів, що довело стратегічну перевагу, яку давали безпілотні системи у розвідувальних операціях і для прориву протиповітряної оборони [16].

Доктрина «нуль смертей» (zero-attrition doctrine), яка формувалась у 1970-х роках, додатково стимулювала розроблення і впровадження безпілотних систем, оскільки вони уможлилювали виконання завдань без загрози для життя військовослужбовців, і це стало ключовим аргументом для їх подальшого розвитку. Зазначений період також характеризували технологічні прориви у сфері авіоники, систем керування та навігації. З'явилися більш досконалі системи автопілотування, що давали змогу БПЛА виконувати складніші маневри і місії з більшою точністю. Розроблення та інтеграція інерційних навігаційних систем і перших систем GPS (хоч і в обмеженому доступі) значно підвищили автономність і точність польотів [17].

Наприкінці ХХ – на початку ХХІ ст. відбувся бурхливий розвиток технологій, який посприяв і розвитку безпілотної авіації та їх інтеграції у широкий спектр військових операцій, якісно змінивши їхнє призначення.

Під час операції «Буря в пустелі» (війна у Перській затоці, 1990–1991 рр.) БПЛА Військово-морських сил США RQ-2 Pioneer активно використовувалися для розвідки, спостереження та цілевказання, зокрема для виявлення іракських артилерійських позицій і коригування вогню. Вони передавали зображення та відео у реальному часі, забезпечуючи командуванню високу ситуаційну обізнаність на полі бою [18].

У ході операції «Свобода Іраку» (2003 р.) розвідувальний БПЛА Predator і його модернізовані ударні версії було широко задіяно для розвідки, спостереження за пересуванням іракських військ, цілевказання для пілотованої авіації і навіть для прямих ударів по об'єктах противника. Здатність цих БПЛА працювати в умовах постійного моніторингу значно підвищувала ефективність наземних операцій і давала змогу швидше досягати поставлених цілей [19].

Найбільш революційним кроком стало розроблення й масове застосування ударних БПЛА. Після терактів 11 вересня 2001 р. США почали активно використовувати MQ-1 Predator, модернізувавши його для несення озброєння, а пізніше – MQ-9 Reaper для боротьби з тероризмом.

Ударні БПЛА, оснащені ракетами «повітря-земля» (наприклад AGM-114 Hellfire), стали головним інструментом для завдання високоточних, «хірургічних» ударів по лідерах і

бойовиках терористичних угруповань в Афганістані, Пакистані, Ємені та Сомалі. Такі операції уможливили завдання ударів по цілях, мінімізуючи ризики для власного персоналу і зменшуючи побічні втрати серед цивільного населення [20], що змінило саму концепцію «дальньої» війни та антитерористичних операцій.

Військова агресія росії проти України відкрила нову сторінку в історії війн, де безпілотники завдяки масовому застосуванню відіграють вирішальну роль. Від вузькоспеціалізованих ударів вони перейшли до виконання численних тактичних і стратегічних завдань. Так, використання українськими силами безпеки й оборони сучасних БПЛА суттєво змінило хід російсько-української війни [21].

Стрімкий розвиток інформаційних технологій став рушійною силою еволюції військових БПЛА, які інтегрувались у тактику ведення війни та безпекові заходи, забезпечуючи обмін розвідувальними даними у реальному часі. Тож сучасний етап розвитку безпілотників відзначається швидкою інтеграцією передових цифрових рішень і розширенням їхніх бойових можливостей, що дає змогу говорити про справжню «безпілотну революцію» у військовій сфері. Етапи розвитку безпілотної авіації військового призначення наведено у табл. 1.

Розглянемо деякі сучасні технології, що вплинули на трансформацію безпілотної авіації військового призначення: штучний інтелект (ШІ), хмарні й периферійні обчислення, інтернет речей (IoT), сенсорна фузія, мережеві архітектури роїв дронів.

Штучний інтелект. Визначальним елементом у трансформації військових БПЛА є штучний інтелект, що надає їм безпрецедентні можливості автономності та ефективності [22]. Завдяки ШІ дрони набувають здатності виконувати складні місії без прямого людського нагляду, значно змінюючи динаміку бойових дій.

У розвідці й цілевказанні штучний інтелект застосовується для аналізу зображень, маркування цілей і оброблення відеопотоків у режимі реального часу. Інтегрований машинний зір у безпілотниках дає змогу ідентифікувати об'єкти і класифікувати їх як ворожі, істотно підвищуючи ситуаційну обізнаність. Сучасні БПЛА, зокрема український Shark, обладнано функціями автоматичного супроводу вибраних цілей і самостійного визначення їхніх координат із забезпеченням високої точності для артилерійського цілевказання.

Таблиця 1 – Етапи розвитку безпілотної авіації військового призначення

Етап еволюції	Період часу	Ключові особливості	Основні функції БПЛА	Приклади застосування БПЛА
Ранні концепції	Початок ХХ ст. – 1960-ті роки	Низька надійність, обмежена точність, експериментальний характер	Цілі-мішені, прототипи дистанційно керованих снарядів	Kettering Bug, V-1, Target Drone OQ-2 Radioplane
Епоха Холодної війни та В'єтнамської війни	1960–1980-ті роки	Зростання значення розвідки без ризику для пілота; вдосконалення керування	Розвідка, спостереження	Ryan AQM-34 Firebee, Tadiran Mastiff (Війна Судного дня, 1973)
Поява ударних БПЛА	1990-ті – 2000-ні роки	Інтеграція БПЛА у широкий спектр операцій; поява ударних можливостей	Розвідка, спостереження, цілевказання, прямі удари	RQ-2 Pioneer («Буря в пустелі», 1990–1991), MQ-1 Predator, MQ-9 Reaper (Афганістан, Ірак)
Сучасні інформаційні технології	2010-ті роки – наш час	Високий ступінь автономії, масовість, промислова інтеграція ІТ	Розвідка, ударні операції, логістика, РЕБ-протидія, ройові атаки	Bayraktar TB2, Акінци (Сирія, Лівія, Карабах), Leleka-100, Punisher, R18, Баба Яга, PD-2 та Raybird-3 (Україна, 2022–2025)

Однією з ключових можливостей, що забезпечує штучний інтелект, є автономне виконання польоту. Завдяки алгоритмам ШІ безпілотики здатні діяти самостійно, зменшуючи потребу у постійному контролі з боку оператора. Такі апарати, використовуючи дані з бортових сенсорів, у реальному часі аналізують обстановку, пристосовуються до змін середовища й ефективно обходять перешкоди, підвищуючи безпечність і результативність польотних завдань.

Вирішальне значення має штучний інтелект і в ройових місіях, адже саме він забезпечує здатність дронів функціонувати як узгоджена система, координуючи дії для реалізації складних операцій. У мережі поширено відео, що демонструє, як Третя штурмова бригада на Харківщині провела безпрецедентну операцію із захоплення ворожих укріплень виключно силами дронів і наземних роботизованих платформ, без участі піхоти і без втрат [23]. Цей приклад яскраво доводить, що рішення на основі ШІ докорінно трансформують тактику сучасної війни і зміцнюють оборону.

Характерним прикладом застосування ШІ у військових БПЛА є дрон STM Kargu-2 (Туреччина). Цей квадрокоптерний дрон продемонстрував розширену автономію,

здатність працювати у роях, без GPS і використовувати розпізнавання обличчя й алгоритми машинного навчання для ідентифікації та ураження цілей. Його було використано у Лівії в 2020 р., що стало одним із перших випадків автономного наведення у бою [24].

Варто також згадати БПЛА MQ-9 Reaper (США), оснащений модулем Agile Condor і здатний самостійно навігувати, виявляти наземні відхилення й коригувати траєкторію польоту відповідно до поточного розуміння ситуації. Проте згідно з Директивою Міністерства оборони США (DoD Directive 3000.09) про автономію в системах озброєнь ухвалення рішень щодо застосування летальної сили потребує людського нагляду.

Ізраїльськими науковцями створено розробку з використанням ШІ – баражуючі боеприпаси Nagru і Nagor, здатні цілком автономно виявляти й уражати радіолокаційні системи, діючи за принципом дронів-камікадзе. Їх застосовували, зокрема, під час загострення бойових дій у Нагірному Карабаху в 2020 р.

Такий динамічний розвиток штучного інтелекту у безпілотної авіації військового призначення зумовлює значну трансформацію ролі людини-оператора. Сьогодні ШІ дає змогу дронам працювати автономно, зменшуючи

потребу у постійному людському втручанні. Роль оператора еволюціонує від безпосереднього пілотування та управління у реальному часі до нагляду, стратегічного планування місій та управління у виняткових ситуаціях.

Хмарні й периферійні обчислення. Сутність інформаційної технології «хмарні й периферійні обчислення» полягає у локальному обробленні даних – якомога ближче до точки їхнього виникнення, а не у центральній хмарі. Цей підхід уможливує автономний аналіз інформації безпосередньо на пристроях (як-от інтелектуальні камери чи дрони), уникаючи потреби надсилати весь потік даних на віддалене оброблення. Завдяки цьому система працює швидше, стабільніше й ефективніше, оскільки зменшується залежність від інтернет-з'єднання.

Застосування технології хмарних і периферійних обчислень розширює обчислювальні можливості безпілотних літальних апаратів військового призначення, долаючи їхні фізичні обмеження й забезпечуючи швидке оброблення даних, що критично важливо для ефективності тактичних операцій.

Хмарні обчислення передбачають швидкий доступ до віддалених обчислювальних ресурсів через Інтернет. Їх використання у безпілотній авіації дає змогу розширити можливості безпілотних літальних апаратів, компенсуючи їхню обмежену вбудовану потужність і розміри. Упровадження тактичних хмарних рішень сприяє зростанню оперативної ефективності та поліпшує ситуаційну обізнаність командира.

Сутність периферійних обчислень полягає у децентралізації традиційної хмари: дані обробляються і зберігаються локально, а не на віддалених серверах. Це досягається шляхом розміщення обчислювальних потужностей максимально близько до кінцевих користувачів і пристроїв. У військових операціях таке оброблення даних у реальному часі становить критичну можливість, яка забезпечує командирам необхідну перевагу для швидкого й ефективного прийняття рішень.

Сучасні військові БПЛА можуть генерувати доволі великий обсяг даних (терабайти даних за один політ). ШІ-рішення у поєднанні з хмарними й периферійними обчисленнями дають змогу аналізувати великі масиви даних у реальному часі, сприяючи поліпшенню ситуаційної обізнаності, плануванню місій,

генерації сценаріїв розвитку бойових операцій, а також прогнозуванню дій противника.

Новітні безпілотні апарати, до яких належить MQ-9B SkyGuardian, використовують убудовані можливості штучного інтелекту для оброблення даних безпосередньо на борту. Як наслідок вони можуть функціонувати цілком автономно – від розпізнавання цілей і навігації у складних умовах до оперативної зміни завдань місії без команд із землі [25].

Незважаючи на значні переваги, інтеграція хмарних і периферійних обчислень у безпілотній авіації постає перед низкою викликів: обмеження щодо пропускну здатності у бойових умовах, забезпечення фізичної безпеки мережевої інфраструктури. Їх подолання потребує оптимального балансу між централізацією (хмара) і децентралізацією (периферія) для забезпечення максимальної ефективності і стійкості.

Інтернет речей. Така концепція мережі об'єднує фізичні об'єкти («речі»), які мають убудовані датчики, програмне забезпечення, і засоби зв'язку. Просто кажучи, це мережа, де безпілотні літальні апарати – від невеликих розвідувальних дронів до великих стратегічних платформ – підключено до Інтернету або єдиної мережі, що дає їм змогу збирати й обмінюватися даними, а також взаємодіяти між собою чи з операторами.

Інтернет речей розширює коло можливостей військових БПЛА, перетворюючи їх на взаємопов'язані «літаючі вузли» збирання даних і їх обміну, що критично важливо в умовах сучасної війни.

Можливості IoT щодо взаємодії і мережевого обміну даними для розвитку безпілотних авіаційних систем є визначальними. У контексті БПЛА ця технологія забезпечує збирання даних із датчиків і їх моніторинг у реальному часі, кардинально поліпшуючи ситуаційну обізнаність. Охоплення моніторингом усіх сфер (повітря, земля, вода) безпосередньо сприяє зростанню точності військових операцій і зменшенню загроз для особового складу.

Для забезпечення розширеної ситуаційної обізнаності і створення спільної оперативної картини IoT-дрони для ефективного оброблення інформації здатні взаємодіяти з іншими компонентами IoT, включно зі хмарними платформами, аналітичними системами та рішеннями на основі штучного

інтелекту. Завдяки технологіям IoT системи набувають здатності до цілком автоматизованої та своєчасної нейтралізації загроз, забезпечуючи водночас високий ступінь точності під час ураження об'єктів.

Головними викликами для інтернету речей у військових БПЛА є безпека, надійність, сумісність, енергоспоживання та обмеження мережі. Збільшення кількості пристроїв, відкритих для загальнодоступної мережі, підвищує ризики ідентифікації та кібербезпеки. Крім того, централізовані хмарні підходи, де необроблені дані передаються у хмару для аналізу, у тактичних умовах через часові й ресурсні обмеження є нежиттєздатними.

Інтеграція інтернету речей перетворює військові БПЛА з індивідуальних, дистанційно керованих засобів на інтегральні, взаємопов'язані вузли у величезній системі «Інтернет військових речей». Вони стають збирачами й передавачами даних у реальному часі, відтворюючи єдину картину поля бою. Це відповідає парадигмі мережево-центричної війни, де безперешкодний обмін інформацією між усіма елементами військової операції підвищує загальну бойову потужність, коли повітряні, наземні й морські засоби (інші пристрої IoT включно) безперешкодно обмінюються даними.

Сенсорна фузія. Це процес об'єднання (інтеграції) даних, отриманих від кількох різних сенсорів чи джерел, для створення єдиної, більш повної, точної та надійної картини навколишнього середовища або стану системи, ніж та, яку можливо отримати від кожного окремого сенсора. Головна мета сенсорної фузії – використати сильні сторони кожного сенсора і компенсувати його слабкості.

Так, в автономному БПЛА можуть використовуватися:

- камера, яка надає деталізовану інформацію про колір, текстури, дорожні знаки, але погано працює в умовах туману або темряви;
- лазерний далекомір, який створює точну 3D-карту об'єктів і відстаней, але чутливий до снігу й дощу;

– радар, який надає дані про швидкість і відстань, добре працює у погану погоду, але має низьку роздільну здатність;

– інерціальний вимірювальний блок, що вимірює куту швидкість, прискорення та орієнтацію, але його точність із часом накопичує похибки (дрейф).

Поєднання даних від таких різних пристроїв створює такі можливості:

– підвищення точності отриманої інформації: отримання достовірнішої оцінки параметрів (наприклад, точне положення об'єкта);

– забезпечення стійкості (резервування) отримання даних: якщо один сенсор вийде з ладу (наприклад, камера засліплена сонцем), то система продовжуватиме працювати на основі даних від інших сенсорів (радара й лазерного далекоміра);

– розширення охоплення джерел інформації: отримання інформації, якої не може надати жодний окремий сенсор (наприклад, поєднати 3D-точки лазерного далекоміра з кольоровими даними камери).

Сенсорна фузія являє собою визначальний елемент для підвищення ситуаційної обізнаності, яку забезпечують БПЛА військового призначення, інтегруючи дані з різнорідних джерел (сенсорів) для створення цілісної картини поля бою. Завдяки такій інтеграції безпілотні апарати здатні не лише виявляти і розпізнавати об'єкти, але й оцінювати їхню динаміку, визначати ступінь загрози та формувати оптимальні варіанти реагування.

Так, БПЛА може використовувати свій радар для виявлення руху транспортних засобів в умовах хмарності, EO/IR-сенсор – для візуальної перевірки об'єкта, а систему радіоелектронної розвідки – для визначення, чи випромінює об'єкт ворожі сигнали. Об'єднання й оброблення всіх даних гарантує вищу достовірність і глибше розуміння оперативної ситуації.

Технологічні вдосконалення у сфері мікроелектромеханічних систем і малопотужної електроніки забезпечили мініатюризацію сенсорів. Це уможливило розроблення високоточних датчиків, які споживають менше

ресурсів, що так само дало змогу використовувати їх на невеликих тактичних дронах [26]. Компактність підтримує розподілене зондування та оперативне збирання даних для військових підрозділів.

Багатосенсорна фузія набуває критичного значення у бойових умовах, коли ворог застосовує витончене маскування або діє у змішаному цивільному середовищі. Поєднання даних допомагає знизити рівень невизначеності і, відповідно, мінімізувати ризик втрат. Акумулятивна сенсорна інформація уможливує прогнозування маневрів противника або виявлення стійких поведінкових патернів, прискорюючи оперативний цикл прийняття рішень і знижуючи навантаження на командирів у бойових умовах.

Мережеві архітектури роїв дронів. Під роєм дронів зазвичай розуміють групу безпілотних літальних апаратів, які працюють разом як єдина, скоординована й автономна система і виконують спільну місію. Порівняно з одиночними рої дронів, що працюють у координації, надають значні переваги щодо покриття, резервування та ефективності.

Мережеві архітектури є фундаментальними для ефективної координації та функціонування роїв БПЛА, створюючи можливість діяти як єдине ціле.

У військовому контексті рої дронів мають значний потенціал:

1) переважувати системи ППО: велика кількість дронів, що атакують одночасно (ефект насичення), може вивести з ладу або перевищити можливості протиповітряної оборони противника;

2) проводити розвідку та ударні операції: безпілотні літальні апарати забезпечують швидкий і комплексний огляд території, ідентифікацію цілей та скоординований удар;

3) працювати в умовах РЕБ: завдяки автономності та локальній взаємодії рої здатен продовжувати місію навіть у разі втрати зв'язку з оператором.

Водночас зазначені переваги ускладнюють безпечний і надійний зв'язок між дронами.

Скоординований напад або порушення мережі можуть скомпрометувати весь рої, тому безпека – головний пріоритет для цих систем [27]. Запровадження безпечних мережевих архітектур для роїв дронів є критично важливим для їх успішного розгортання у бойових умовах.

Класичні архітектури мереж для роїв (наприклад, «зірка» і «точка-точка»), які використовуються одиночними апаратами, характеризуються єдиною точкою потенційної відмови, невеликим операційним радіусом і низьким рівнем безпеки, що робить їх ненадійними в умовах протидії. Частково ця проблема вирішується прямим мережевим з'єднанням між БПЛА і децентралізованим ухваленням рішень. Однак така реалізація призводить до обмежень щодо габаритів, маси й потужності бортових комунікаційних модулів, а також до технічних труднощів динамічного переналаштування маршрутизації, що загрожує обривом зв'язку і втратою інформації.

Підвищення надійності роїв дронів, якої бракує класичним мережевим архітектурам, можна досягти застосуванням сіткової мережевої топології. Її децентралізована природа дає змогу кожному дрону підключатися до множинних точок зв'язку, підвищуючи стійкість системи. Вбудована динамічна маршрутизація та функція самовідновлення забезпечують автоматичне перенаправлення оперативних даних у разі бойової втрати окремого дрона чи радіоелектронного глушіння, підтримуючи безперебійну операцію та уможливаючи швидке нарощування бойового складу рою без складного переналаштування.

Для підвищення оперативної ефективності, стійкості та гнучкості безпілотних систем військового призначення розвиток різноманітних архітектур роїв дронів є критично важливим

Вплив сучасних інформаційних технологій на розвиток нових можливостей безпілотної авіації демонструє табл. 2.

Таблиця 2 – Базова архітектура взаємозв'язку інформаційних технологій і функціоналу безпілотних літальних апаратів військового призначення

Інформаційна технологія	Нові функції БПЛА	Ключові виклики
Штучний інтелект	Декодування знімків, нанесення цілей, оброблення трансляцій у реальному часі. Автономна робота, зменшення потреби у людському втручанні. Адаптація до мінливих умов, виявлення та уникнення перешкод. Координація роїв для складних завдань. Донаведення FPV-дронів. Автоматичне стеження за цілями і визначення координат	Складність розроблення алгоритмів. Когнітивне навантаження на операторів. Етичні і правові дилеми автономного прийняття рішень
Хмарні та периферійні обчислення	Швидкий доступ до інформації. Розширення обчислювальних можливостей БПЛА. Підвищення якості прийняття рішень та ситуаційної обізнаності. Оброблення великих даних у реальному часі. Зменшення затримок і вимог до пропускнуої здатності (периферійні)	Фізична безпека мережевої інфраструктури. Обмеження пропускнуої здатності у тактичних умовах. Потенційна відсутність надмірності. Залежність від майбутніх мережевих стандартів (5G/6G). Складність масштабування на тактичному рівні
Інтернет речей	Взаємодія та обмін даними між дронами. Збирання й моніторинг даних із датчиків у реальному часі. Поліпшення ситуаційної обізнаності. Передача даних і командних сигналів у реальному часі	Безпека, надійність, сумісність, енергоспоживання, обмеження мережі. Збільшення ризиків ідентифікації та кібербезпеки. Недостатній розвиток рішень кібербезпеки. Нежиттєздатність централізованих хмарних підходів у тактичних умовах
Сенсорна фузія	Інтеграція даних із різномірних датчиків. Створення цілісної картини поля бою. Виявлення, ідентифікація цілей, аналіз поведінки, повідомлення про загрози. Зменшення невизначеності, мінімізація втрат	Подальша мініатюризація та підвищення ефективності сенсорів. Інтеграція з ширшими мережами. Розвиток спеціалізованих сенсорів
Мережеві архітектури роїв дронів	Децентралізована природа, усунення єдиних точок відмови. Динамічна маршрутизація і самовідновлення. Масштабованість, додавання нових дронів без переконфігурації	Регуляторне схвалення для використання стільникових мереж. Досягнення справжньої автономії роїв. Обмеженість традиційних архітектур

Отже, трансформація безпілотної авіації у військових цілях зумовлюється розвитком штучного інтелекту, інтернету речей, сенсорної фузії, периферійних обчислень, а також мережевих рішень для роїв дронів.

Висновки й перспективи подальших досліджень. У межах дослідження здійснено

комплексний аналіз сучасного стану безпілотної авіації військового призначення під впливом інформаційних технологій. Масштабне впровадження безпілотної авіації кардинально змінило тактику ведення бойових дій, зробило доступними на тактичному рівні високоточні й розвідувальні можливості. Це потребує

переосмислення військових доктрин, структури військ і систем навчання, оскільки ефективність бойових дій дедалі більше залежить від технологічної переваги та швидкої адаптації.

Досліджено етапи розвитку військової безпілотної авіації – від примітивних снарядів-прототипів (Kettering Bug, V-1) до інтегрованих, високоавтономних систем. Еволюція БПЛА зумовлювалася постійним прагненням до мінімізації втрат особового складу (доктрина «нуль смертей») і потребою в надійній розвідці та високоточних ударах у зонах проведення бойових дій.

Отже, сучасна трансформація військових БПЛА безпосередньо пов'язана з еволюцією сучасних інформаційних технологій, яка ґрунтується на інтеграції таких ключових цифрових технологій.

Штучний інтелект перетворює БПЛА на автономні бойові одиниці, здатні самостійно виконувати складні місії (розпізнавання цілей, автоматичний супровід, ураження без GPS), а також зміщує роль оператора від пілотування до стратегічного нагляду.

Сенсорна фузія поєднує дані з мініатюризованих сенсорів для створення цілісної, надійної та достовірної картини поля бою, що є критично важливим для зменшення невизначеності і мінімізації супутніх втрат у складних умовах.

Хмарні й периферійні обчислення долають фізичні обмеження БПЛА, уможливаючи локальне оброблення терабайтів даних у реальному часі (периферія), що прискорює ухвалення тактичних рішень і забезпечує автономну роботу навіть за відсутності стабільного зв'язку.

Інтернет речей перетворює дрони на взаємопов'язані мережеві вузли, які в реальному часі обмінюються даними з іншими військовими засобами, створюючи єдину оперативну картину.

Мережеві архітектури роїв дронів дають змогу забезпечити живучість і масштабованість роїв.

Поєднання штучного інтелекту, інтернету речей, сенсорної фузії та сіткових мереж сприяє «революції БПЛА», робить безпілотну авіацію ключовим, інтегрованим і високоінтелектуальним елементом сучасної військової стратегії. Така технологічна синергія і живучість дронів стають вирішальним чинником, що кардинально змінює тактику і стратегію ведення сучасних бойових дій.

Незважаючи на значні досягнення, є й суттєві виклики, зокрема такі: забезпечення

абсолютної кібербезпеки в умовах, що постійно змінюються; підвищення стійкості до дедалі складніших засобів РЕБ; розроблення алгоритмів для справжньої автономії роїв; вирішення глибоких етичних і правових питань щодо відповідальності за рішення, прийняті автономними системами.

На основі проведеного аналізу визначено ключові напрями для подальших досліджень. Ідеться про необхідність подолання існуючих технологічних викликів і досягнення максимальної автономності та стійкості систем у складних бойових умовах:

– створення гібридних архітектур роїв дронів, що поєднують переваги різних технологій зв'язку для забезпечення максимальної стійкості, зокрема штучного інтелекту, роєвого інтелекту, алгоритмів самонавчання тощо;

– розроблення ШІ-алгоритмів, які можуть пояснювати свої рішення, з метою забезпечення «людського контролю» (контролю оператора), тобто найкраще інтегрувати людське судження в автономні системи без зниження їхньої ефективності;

– розроблення і впровадження новітніх криптографічних способів захисту комунікаційних каналів передачі даних для забезпечення достовірності, точності та своєчасності передачі даних.

Перелік джерел посилання

1. Залужний В. Нова природа війни змінила сутність основ глобальної безпеки: український досвід і майбутній світовий порядок. URL: <https://surl.lu/yskfcc> (дата звернення: 25.07.2025).

2. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 25 червня 2024 року Про створення у структурі Збройних Сил України Сил безпілотних систем як окремого роду сил: Указ Президента України від 25.06.2024 р. № 382/2024. URL: <https://surl.lt/hphpvs> (дата звернення: 20.07.2025).

3. Автономні воєнні робототехнічні системи / Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <https://surl.lu/bsxbih> (дата звернення: 25.07.2025).

4. Кучеренко Ю. Ф., Науменко М. В., Кузнєцова М. Ю. Аналіз досвіду застосування безпілотних літальних апаратів та визначення напрямку їх подальшого розвитку при веденні мережецентричних операцій. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 1 (53). С. 25–30.

5. Основні тенденції створення та застосування груп безпілотних літальних апаратів / В. А. Лупандін та ін. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. № 2. С. 88–96.

6. Мосов С. П. Роїння дронів військового призначення: реалії та перспективи. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України*. Київ, 2024. № 1 (80). С. 77–86.

7. Горбулін В. П., Мосов С. П. Рої дронів – кульмінація дронізації воєн. *Вісник Національної академії наук України*. Київ, 2024. № 3. С. 3–11.

8. Горбулін В., Мосов С. Смертельна автономна зброя. *Оборонний вісник*. 2022. № 3–4. С. 18–24.

9. Тонконог І. О. Деякі аспекти використання БПЛА. Оперативно-бойова діяльність сил сектору безпеки і оборони в умовах воєнного стану : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. представників сектору безпеки і оборони України, наукових та науково-педагогічних працівників, здобувачів освіти та інших зацікавлених осіб (м. Київ, 24 жовт. 2024 р.). Київ : НА СБУ, 2024. Вип. 1. С. 316 – 319.

10. Yongkun Zhou, Bin Rao, And Wei Wang. UAV Swarm Intelligence: Recent Advances and Future Trends. IEEE Access: Multidisciplinary rapid review. *Open Access Journal*. 2020. No. 8. P. 183856 – 183878.

11. Yahao Ding, Zhaohui Yang, Quoc-Viet Pham, Zhaoyang Zhang, Mohammad Shikh-Bahaei. Distributed Machine Learning for UAV Swarms: Computing, Sensing, and Semantics. URL: <http://arxiv.org/abs/2301.00912v1> (accessed: 1 August 2025).

12. Jimmy Stamp. Unmanned Drones Have Been Around Since World War I. URL: <https://surl.li/vkfyfn> (accessed: 1 August 2025).

13. Thomas A. Hughes, John Graham Royde-Smith. V-1 missile military technology. URL: <https://surl.cc/vuswjg> (accessed: 1 August 2025).

14. National Museum of the United States Air Force. Radioplane OQ-2A. URL: <https://surl.li/iuggai> (accessed: 1 August 2025).

15. Ryan. AQM-34N Firebee. URL: <https://surl.li/xasyis> (accessed: 1 August 2025).

16. Eitan, Y. The Role of UAVs in the Yom Kippur War. *Journal of Military History*. 2005. No. 69 (3). P. 789–805.

17. Goff P. Evolution of UAV Technology in Military Applications. *Air & Space Power Journal*. 2012. No. 26 (3). P. 69–79.

18. GlobalSecurity.org. Pioneer Short Range (SR) UAV. URL: <https://surl.li/gcdygp> (accessed: 1 August 2025).

19. Peter Faber and Carlo Masala. Operation Iraqi Freedom: Lessons Learned, Ways Ahead, and Open Questions. RESEARCH PAPER Academic Research Branch – NATO Defense College, 2024. No. 9. P. 2–7.

20. Alan W. Dowd. Drone Wars: Risks and Warnings. URL: <https://surl.lu/jyqqvs> (accessed: 14 August 2025).

21. Українські бренди БПЛА у сучасній війні дронів. URL: <https://surl.li/hkctsn> (дата звернення: 05.08.2025).

22. Daniel Caballero-Martin, Jose Manuel Lopez-Guede, Julian Estevez, Manuel Graña. Artificial Intelligence Applied to Drone Control: A State of the Art. URL: <https://surl.li/xctyvf> (accessed: 15 August 2025).

23. Безпрецедентна операція: Третя штурмова атакувала виключно наземними та FPV-дронами і захопила полонених. *Texty.org.ua*. URL: <https://surl.li/qblxrt> (дата звернення: 01.09.2025).

24. Grace Sheehan. Cheap Drones, Expensive Lessons: Ethics, Innovation, and Regulation of Autonomous Weapon Systems. URL: <https://surl.li/vejgvp> (accessed: 5 September 2025).

25. Enhancing Military Strategies With Edge Computing in Aerospace Defense Technology. URL: <https://surl.li/xugkhs> (accessed: 10 September 2025).

26. Army researchers develop breakthrough sensors for small drones. URL: <https://surl.lu/dwlnuw> (accessed: 10 September 2025).

27. Jacobsen, R. H., Matlekovic, L., Shi, L., Malle, N., Ayoub, N., Hageman, K., et al. Design of an Autonomous Cooperative Drone Swarm for Inspections of Safety Critical Infrastructure. *Applied Sciences*. 2023. No. 13. Art. 1256. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13031256> (accessed: 10 September 2025).

References

1. Zaluzhnyi V. *Nova pryroda viiny zminyla sutnist osnov hlobalnoi bezpeky: ukrainskyi dosvid i maibutnii svitovyi poriadok* [The new nature of crime has changed the essence of global security: the Ukrainian experience and the future world

order]. Retrieved from: <https://surl.lu/yskfcc> (accessed 25 July 2025) [in Ukrainian].

2. *Ukaz Prezidenta Ukrainy Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 25 chervnia 2024 roku "Pro stvorennia u strukturi Zbroinykh Syl Ukrainy Syl bezpilotnykh system yak okremoho rodu syl"* № 382/2024 [Decree of the President of Ukraine on the Resolution of the National Security and Defense Council of Ukraine dated June 25, 2024 "On the Creation of Unmanned Aerial Systems as a Separate Type of Force in the Structure of the Armed Forces of Ukraine" activity no. 382/2024]. (2024, June 25). Retrieved from: <https://surl.lt/hphpvs> (accessed 20 July 2025) [in Ukrainian].

3. Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen (2017). *Avtonomni voienni robototekhnichni systemy* [Autonomous military robotic systems]. Retrieved from: <https://surl.lu/bsxbih> (accessed 25 July 2025) [in Ukrainian].

4. Kucherenko Yu. F., Naumenko M. V., Kuznietsova M. Yu. (2018). *Analiz dosvidu zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ ta vyznachennia napriamku yikh podalshoho rozvytku pry vedenni merezhentsentrychnykh operatsii* [Analysis of the experience of using unmanned aerial vehicles and identification of the direction of their further development when conducting network-centric operations]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, no. 1 (53), pp. 25–30 [in Ukrainian].

5. Lupandin V. A., Mehelbei H. V., Matsko O. Yu., Kurtseitov T. L., Mironenko P. O. (2019). *Osnovni tendentsii stvorennia ta zastosuvannia hrup bezpilotnykh litalnykh aparativ* [The main trends in the creation and use of drones]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*, no. 2, pp. 88–96 [in Ukrainian].

6. Mosov S. P. (2024). *Roinnia droniv viiskovoho pryznachennia: realii ta perspektyvy*. [The development of military drones: realities and perspectives]. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy*, no. 1 (80), pp. 77–86 [in Ukrainian].

7. Horbulin V. P., Mosov S. P. (2024). *Roi droniv – kulminatsiia dronizatsii voien* [Drone swarms are the culmination of drone warfare]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, no. 3, pp. 3–11 [in Ukrainian].

8. Horbulin V., Mosov S. (2022). *Smertelna avtonomna zbroia* [Lethal autonomous weapons]. *Oboronnyi visnyk*, no. 3–4, pp. 18–24 [in Ukrainian].

9. Tonkonoh I. O. (2024). *Deiaki aspekty vykorystannia BPLA* [Some aspects of using BPLA]. Proceedings of the All-Ukrainian

scientific and practical conference "Operatyvno-boiova diialnist syl sektoru bezpeky i oborony v umovakh voiennoho stanu" (Kyiv, October 24, 2024). Kyiv : NA SBU, vol. 1, pp. 316–319 [in Ukrainian].

10. Yongkun Zhou, Bin Rao, And Wei Wang (2020). UAV Swarm Intelligence: Recent Advances and Future Trends. IEEE Access: Multidisciplinary rapid review. *Open Access Journal*, no. 8, pp. 183856 – 183878 [in English].

11. Yahao Ding, Zhaohui Yang, Quoc-Viet Pham, Zhaoyang Zhang, Mohammad Shikh-Bahaei (2023). Distributed Machine Learning for UAV Swarms: Computing, Sensing, and Semantics. Retrieved from: <http://arxiv.org/abs/2301.00912v1> (accessed 1 August 2025) [in English].

12. Jimmy Stamp. Unmanned Drones Have Been Around Since World War I. Retrieved from: <https://surl.li/vkfyfn> (accessed 1 August 2025) [in English].

13. Thomas A. Hughes, John Graham Royde-Smith. V-1 missile military technology. Retrieved from: <https://surl.cc/vuswjg> (accessed 1 August 2025) [in English].

14. National Museum of the United States Air Force. Radioplane OQ-2A. Retrieved from: <https://surl.li/iuggai> (accessed 1 August 2025) [in English].

15. Foundation Museum of Aviation. Ryan. AQM-34N Firebee. Retrieved from: <https://surl.li/xasyis> (accessed 1 August 2025) [in English].

16. Eitan, Y. (2005). The Role of UAVs in the Yom Kippur War. *Journal of Military History*, no. 69 (3), pp. 789–805 [in English].

17. Goff, P. (2012). Evolution of UAV Technology in Military Applications. *Air & Space Power Journal*, no. 26 (3), pp. 69–79 [in English].

18. GlobalSecurity.org (2011). Pioneer Short Range (SR) UAV. Retrieved from: <https://surl.li/gcdygp> (accessed 1 August 2025) [in English].

19. Peter Faber and Carlo Masala (2024). Operation Iraqi Freedom: Lessons Learned, Ways Ahead, and Open Questions. *RESEARCH PAPER Academic Research Branch – NATO Defense College*, no. 9, pp. 2–7 [in English].

20. Alan W. Dowd (2013). Drone Wars: Risks and Warnings. Retrieved from: <https://surl.lu/jyqqvs> (accessed 14 August 2025) [in English].

21. Dignitas. Fund (2025). *Ukrainski brendy BPLA u suchasni viini droniv* [Ukrainian brands BPLA in modern drones]. Retrieved from: <https://surl.li/hkctsn> (accessed 5 August 2025) [in Ukrainian].

22. Daniel Caballero-Martin, Jose Manuel Lopez-Guede, Julian Estevez, Manuel Graña

(2024). Artificial Intelligence Applied to Drone Control: A State of the Art. Retrieved from: <https://surl.li/xctyvf> (accessed 15 August 2025) [in English].

23. Texty.org.ua (2025). *Bezpretsedentna operatsiia: Tretia shturmova atakovala vykliuchno nazemnyu ta FPV-dronamy i zakhopyla polonenykh* [Unprecedented operation: The third assault group attacked exclusively with ground and FPV drones and buried the prisoners]. Retrieved from: <https://surl.li/qblxrxj> (accessed 1 September 2025) [in Ukrainian].

24. Grace Sheehan (2025). Cheap Drones, Expensive Lessons: Ethics, Innovation, and Regulation of Autonomous Weapon Systems. Retrieved from: <https://surl.li/ehyrno> (accessed 5 September 2025) [in English].

25. Namber Analytics (2025). Enhancing Military Strategies With Edge Computing in Aerospace Defense Technology. Retrieved from: <https://surl.li/xugkhs> (accessed 10 September 2025) [in English].

26. Army.mil (2020). Army researchers develop breakthrough sensors for small drones. Retrieved from: <https://surl.li/ccgvlxsc> (accessed 10 September 2025) [in English].

27. Jacobsen, R. H., Matlekovic, L., Shi, L., Malle, N., Ayoub, N., Hageman, K., et al. (2023). Design of an Autonomous Cooperative Drone Swarm for Inspections of Safety Critical Infrastructure. *Applied Sciences*, no. 13, art. 1256. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13031256> [in English].

Стаття надійшла до редакції / Received: 06.10.2025

Прорецензовано / Revised: 17.10.2025

Схвалено до друку / Accepted: 26.10.2025

ARCHAKOVA OLEKSANDRA

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Tactics,

Kyiv Institute of the National Guard of Ukraine

<https://orcid.org/0009-0000-2260-4751>

DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND THEIR IMPACT ON THE TRANSFORMATION OF MILITARY UNMANNED AVIATION

The article provides a comprehensive systemic analysis of the interrelationship between the development of information technologies and the transformation of military unmanned aerial vehicles (UAVs). It is demonstrated that modern warfare, particularly the full-scale aggression against Ukraine, has evidenced the shift of UAVs from an auxiliary means to a leading instrument for reconnaissance, fire adjustment, strike operations, and more.

The significance of this research lies in its uncovering of the key role of information technologies in modern warfare, identifying and analyzing the critical technologies that provide a strategic and tactical advantage.

The study covers the historical evolution of UAVs and details the synergistic impact of five key IT innovations on their functionality: Artificial Intelligence, sensor fusion, cloud and edge computing, the Internet of Things, and network architectures for swarms.

The following research methods (at the theoretical level) were utilized in the article: analysis of scientific literature, systemic analysis, and comparative analysis.

Based on the analysis, key areas for further research are identified. This is about the need to overcome existing technological challenges and achieve maximum autonomy and resilience of systems in difficult combat conditions:

– creating hybrid drone swarm architectures that combine the advantages of various communication technologies to ensure maximum resilience, in particular artificial intelligence, swarm intelligence, self-learning algorithms, etc.;

– developing AI algorithms that can explain their decisions, in order to ensure "human control" (operator control), that is, to best integrate human judgment into autonomous systems without reducing their effectiveness;

– developing and implementing the latest cryptographic methods for protecting communication channels for data transmission to ensure the reliability, accuracy and timeliness of data transmission.

Keywords: *unmanned aviation; UAVs; drones; artificial intelligence; sensor fusion; cloud and edge computing; Internet of Things; swarm network architectures.*