

П.А. Глущенко<sup>1</sup>, О.В. Самойленко<sup>1</sup>, О.А. Жевтюк<sup>1</sup>, О.В. Радько<sup>2</sup>, В.М. Давиденко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ*

<sup>2</sup>*Національний університет оборони України, Київ*

## **РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ З УРАХУВАННЯМ СУЧАСНИХ ПРОГРАМ ЇХ СТВОРЕННЯ**

*У роботі визначено тенденції розвитку перспективних безпілотних авіаційних комплексів (далі – БпАК) на основі ретроспективного аналізу особливостей розвитку БпАК та передумов, що стимулювали їх подальший розвиток, аналізу досвіду застосування БпАК в умовах сучасних війн та аналізу сучасних програм розвитку технологій, що можуть бути застосовані при створенні БпАК. Основними тенденціями розвитку БпАК є здешевлення і спрощення їх виробництва, інтеграція пілотованих та безпілотних літальних апаратів (далі – БпЛА) в єдині авіаційні комплекси, підвищення автономізації та “інтелектуалізації” БпАК застосуванням систем технічного зору БпЛА, елементів штучного інтелекту, підвищення інтеграції планера і силової установки БпЛА, застосування розподілених силових установок БпЛА, реалізація концепції адаптивного крила. гібридизація, електрифікація БпЛА тощо.*

**Ключові слова:** *безпілотний авіаційний комплекс, комплекси бортового обладнання, критичні технології, композиційні матеріали, рівняння існування*

**Постановка проблеми.** При відсічі збройної агресії російської федерації (далі – рф) виявляється тенденція до підвищення ролі безпіотної авіації. Її основними завданнями є повітряна розвідка, коригування вогню артилерії, підтвердження виконання вогневих завдань, нанесення вогневого ураження противнику, доставка різних вантажів у визначені райони, тощо. Дедалі більшого розповсюдження набуває виконання ударних завдань з ураження озброєння і військової техніки (ОВТ), особового складу та інженерних споруд ворога, підтримка сухопутних військ в обороні або під час штурмових дій. Необхідно відмітити, що одну з головних ролей у збройній боротьбі почали відігравати безпілотні авіаційні комплекси (далі – БпАК) І класу.

Безпілотні літальні апарати (далі – БпЛА) та відповідні комплекси виникли майже одночасно з появою пілотованих літаків і мають свою історію розвитку. Проте у порівнянні з іншими типами літальних апаратів їх можна розглядати як відносно новий тип озброєння внаслідок значних якісних змін в рівні науки і техніки за останні три десятиріччя, що підвищило потенціал БпАК та розширило завдання, що можуть бути ними вирішені [1, с. 72]. Тому в останніх війнах, особливо під час збройної агресії РФ проти України, застосування БпАК суттєво вплинуло на ведення бойових дій.

Треба відзначити, що будь-який новий вид зброї або спосіб його використання на початку застосування часто буває дуже ефективним, але таке положення утримується зазвичай недовго.

Виникають засоби протидії, які зменшують цю ефективність і тим самим урівноважують ефективність нової зброї, підсилюючи загальні можливості воюючих сторін [2, с. 42]. Тобто відбувається взаємний розвиток певної зброї або способу її застосування та засобу або способу протидії цьому. БпЛА не стали виключенням. Якщо проти великих БпЛА II та III класу застосовують майже ті самі засоби, які застосовуються проти пілотованих літальних апаратів, то проти БпЛА I класу знадобився час на розробку заходів щодо протидії ним. І зараз, в умовах відбиття агресії РФ, відбувається взаємний швидкий розвиток БпАК та засобів протидії ним.

Сучасні БпАК і утворені з них системи є складними технічними системами, та характеризуються наявністю підсистем управління з розгалуженими потоками інформації та складністю процесу функціонування. Підвищення ефективності БпАК потребує застосування нових досягнень у різних галузях науки і техніки. При цьому необхідно застосовувати системний підхід, враховувати вимоги практики такі, як зміни умов застосування, поточний та прогнозований стан засобів протидії БпАК, завдання які вирішуються БпАК та можуть бути покладені на них, світові тенденції в галузі авіаційної техніки загалом та безпіотної, зокрема. Особливу увагу необхідно звернути на досягнення у сфері інформаційних технологій, на впровадження нейронних мереж і штучного інтелекту в різноманітні складові БпАК.

Таким чином, визначення актуальних тенденцій розвитку БпАК, факторів які визначають розвиток БпАК і БпЛА, є актуальним науково-практичним завданням.

Для вирішення цього завдання проведено ретроспективний аналіз розвитку БпАК та БпЛА, оскільки вони є визначальною складовою БпАК з метою визначення загальних з пілотованими літальними апаратами (далі – ЛА) закономірностей та тенденцій розвитку БпЛА. На основі аналізу сучасного стану розвитку БпАК визначити критичні технології, які визначають подальший розвиток БпАК із забезпеченням підвищення ефективності їх застосування.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Швидко зростаюче поширення використання БпАК для вирішення різноманітних завдань стимулює проведення досліджень щодо визначення тенденцій розвитку БпАК, напрямів їх удосконалення, аналізу досвіду їх застосування тощо. У роботі [3, с. 252] в історичному аспекті проаналізовано досвід застосування БпАК під час збройних конфліктів наприкінці ХХ та на початку ХХІ ст. Докладно висвітлено роль безпілотних літальних апаратів у війнах на Близькому Сході, у районі Перської затоки, в Сирії, Афганістані. Проте робота не охоплює періоду повномасштабного вторгнення РФ в Україну, під час якої відбуваються стрімкі зміни у застосуванні БпАК. Також аналіз застосування та розвитку безпілотної авіації (далі – БА) проведено в роботі [1, с. 66...81]. На основі ретроспективного аналізу показано трансформацію завдань безпілотної авіації та їх збільшення за етапами розвитку БпАК. Показано тенденцію покладання завдань пілотованої авіації на безпілотну. Серед цих завдань [1, с. 78] виявлення та дезорієнтація ЗРК противника; радіоелектронна протидія; радіоперехоплення; ретрансляція сигналів; тилова підтримка; евакуація поранених з поля бою; завоювання переваги у повітрі. Серед тенденцій розвитку БА у найближчій перспективі наведені актуальні й на сьогодні такі тенденції [1, с. 78]:

- зростання різноманітності БпЛА для виконання ударних завдань і завдань бойового забезпечення;
- розширення можливостей і створення ударних БпЛА великої кратності застосування;
- створення БпЛА тилової підтримки;
- мініатюризація та “інтелектуалізація” БпЛА;
- збільшення тривалості польоту БпЛА;
- уніфікація обладнання, виготовлення малогабаритного устаткування модульного типу;
- зниження оптичної, радіолокаційної, інфрачервоної та акустичної помітності;
- стійкість до дій засобів РЕБ.

Проте ці висновки не пов'язані з відповідними програмами розвитку БпАК у провідних країнах

світу та не наведені передумови, які спонукатимуть подальший розвиток за вказаними тенденціями.

Аналіз застосування БпЛА в російсько-українській війні наведений в [4, с. 52...59]. Авторами роботи розглянуто зміну підходів у застосуванні БпЛА оперативного рівня після посилення протиповітряної оборони та радіоелектронної боротьби обома сторонами військового протистояння. Зроблено висновок про зміну пріоритету агресора на застосування БпЛА тактичного рівня замість БпЛА оперативного рівня. Також описано роль БпЛА у підвищенні ефективності функціонування систем ситуаційної обізнаності «Дельта» та «Кропива», що є одним із прикладів підвищення ефективності системи вищого рівня при підвищенні ефективності БпАК. При цьому в роботі не розглядаються технічні аспекти розвитку і застосування БпАК.

Основні напрями розвитку безпілотної авіації в Збройних Силах України на основі комплексного підходу та з урахуванням вимог до спроможностей з єдиного переліку (каталогу) спроможностей Міністерства оборони України та Збройних Сил України визначені в роботі [5, с. 218...225]. Також запропоновано можливі підходи до забезпечення Збройних Сил України БпАК, визначені основні вимоги до перспективних БпАК та завдання, які ними повинні вирішуватись [5, с. 221, 223]. При цьому в роботі не розглянуті можливі технічні рішення або критичні технології, що необхідно застосувати для досягнення заданих вимог до перспективних БпАК.

Актуальний аналіз досвіду застосування БпАК у російсько-українській війні наведено в роботі [6, с. 9...17]. У роботі наведені способи сучасного застосування БпЛА та пропозиції щодо підвищення ефективності застосування БпЛА. З отриманого досвіду застосування авторами зроблено висновки [6, с. 14] про те, що:

- можливості БпАК щодо виконання завдань вогневого ураження противника обмежені;

- достатньо високий коефіцієнт втрат БпЛА;

- за тактико-технічними характеристиками БпЛА, що є на озброєнні ЗСУ не можуть забезпечити ураження об'єктів протиповітряної оборони (далі – ППО) противника типу “Панцирь”, “Тор”, “Бук”, “С-300”, “С-400” без входу в їх зону ураження;

- відсутність системи попередження про опромінення радіолокаційною станцією зенітно-ракетного комплексу, не дає можливості оператору оцінити обстановку і вивести БпЛА з-під атаки;

- складні погодні умови (низька хмарність) суттєво знижують ефективність виконання БпЛА завдань повітряної розвідки.

Також серед робіт, у яких досліджуються

питання розвитку БпАК, необхідно виділити роботи [7, 8], але в них не охоплюється період після початку російсько-української війни [7] та розглядається суто цивільне використання БпАК [8]. Таким чином, доступні роботи недостатньо повно розкривають питання розвитку БпАК, тому **метою статті** є визначення актуальних тенденцій розвитку перспективних БпАК на основі ретроспективного аналізу особливостей розвитку БпАК та передумов, що стимулювали подальший розвиток БпАК, досвіду застосування БпАК в умовах сучасних війн, а також аналізу сучасних програм розвитку технологій, що можуть бути застосовані при створенні БпЛА.

### Виклад основного матеріалу

Основною складовою частиною БпАК, що здебільшого визначає його можливості є БпЛА та його складові. Тому увага в дослідженні буде зосереджена на аналізі розвитку БпЛА. Розгляд розвитку БпЛА доцільно проводити на основі розгляду розвитку пілотованих літальних апаратів, виділяючи особливості розвитку БпЛА, оскільки більшість підходів до створення, дослідження та експлуатації пілотованих та безпілотних ЛА однакові. Для визначення впливу розвитку складових БпЛА скористаємося рівнянням існування БпЛА, що є основним елементом у комплексі, аналогічно підходу запропонованому в [2, с. 8], але з урахуванням особливостей БпЛА.

Відомо, що маса літального апарату визначає кількісно комплекс його якостей. Розглянемо масу БпЛА як масу конструкції його планера  $G_{пл}$ , силової установки  $G_{су}$ , палива  $G_n$  та цільового споряддя  $G_{цс}$ , тобто наведемо вираз балансу маси для БпЛА, аналогічно [2, с. 8]:

$$G = G_{пл} + G_{су} + G_{пл} + G_{цс}. \quad (1)$$

Складові рівняння представимо у вигляді залежностей від їх відповідних характеристик. Маса планера залежить від загальної маси БпЛА  $G$ , розрахункового перевантаження  $n$ , подовження крила  $\lambda$ , відносної товщини профілю  $c$ , від звуження і т. ін.:

$$G_{пл} = F(G, n, \lambda, c, \eta, \dots).$$

Аналогічно маса силової установки є функцією маси БпЛА, питомої маси  $\gamma_{дв}$ , максимальної горизонтальної швидкості  $V_{max}$  і т. ін., тобто

$$G_{су} = \Phi(G, \gamma_{дв}, f, V_{max}, \dots).$$

Маса паливної системи залежить від маси БпЛА, питомої витрати двигуна  $\gamma$ , висоти  $H$  і швидкості  $V_{кр}$  на крейсерському режимі польоту, аеродинамічної якості  $K$ , дальності польоту БпЛА  $L$  і т. ін.:

$$G_{пл} = \Psi(G, \gamma, f, V_{кр}, H, K, L, \dots).$$

Повна маса цільового споряддя складається

з маси озброєння  $G_{озбр}$  і корисного навантаження  $G_n$ , та іншого необхідного обладнання  $G_{обл}$ , що встановлюється на БпЛА:

$$G_{цс} = \Theta(G_{озбр}, G_n, G_{обл}, \dots).$$

Таким чином, рівняння (1) запишемо у вигляді:

$$G = F(G, n, \lambda, c, \eta, \dots) + \Phi(G, \gamma_{дв}, f, V_{max}, \dots) + \Psi(G, \gamma, f, V_{кр}, H, K, L, \dots) + \Theta(G_{озбр}, G_n, G_{обл}, \dots).$$

Або у відносних величинах, при діленні лівої та правої частини рівняння на злітну масу, рівняння існування для БпЛА матиме вигляд:

$$1 = \xi_{пл} + \xi_{су} + \xi_{пл} + \xi_{цс}, \quad (2)$$

де  $\xi_{пл} = f(G, n, \lambda, c, \eta, \dots)$  – відносна маса конструкції планера;

$\xi_{су} = \phi(G, \gamma_{дв}, f, V_{max}, \dots)$  – відносна маса силової установки;

$\xi_{пл} = \psi(G, \gamma, f, V_{кр}, H, K, L, \dots)$  – відносна маса палива (або акумуляторної батареї);

$\xi_{цс} = \theta(G_{озбр}, G_n, G_{обл}, \dots)$  – відносна маса цільового споряддя.

Рівняння (2) відображає вплив властивостей БпЛА на його злітну масу та на їх взаємозалежність через масу БпЛА. Тобто, якщо при заданій злітній вазі БпЛА необхідно отримати БпЛА з максимальною дальністю польоту, то це буде досягатись за рахунок збільшення відносної маси палива і зменшенням відносних мас інших систем і обладнання. Або необхідно застосувати силову установку з меншою витратою палива при заданих характеристиках, тобто більш технічно досконалою.

Для БпЛА, як і для більшості інших видів зброї, характерні два періоди: один – період виникнення, становлення; інший – період їх застосування та розвитку. Хоча обидва періоди як єдине ціле зумовлені вимогами практики та можливостями техніки свого часу, проте вони за своїми цілями докорінно відрізняються один від одного [2, с. 7]. Метою першого періоду було створення працездатних зразків, які виконують своє основне призначення з рисами, що відрізняє їх від інших видів існуючої до них техніки: для перших автомобілів – пересуватися по землі без допомоги мускульної сили; для перших літаків – підніматися в повітря та літати досить надійно; для перших БпЛА – виконувати політ та маневрувати в заданому напрямку без екіпажу на борту.

Метою другого періоду було поліпшення початкових зразків і, коли необхідно даний вид техніки робити в більших кількостях, – усіякє спрощення їх виробництва [2, с. 8].

Ідея використання БпЛА у військових цілях виникла задовго до перших польотів літаків. Перші зображення повітряних зміїв, що доставляють вибухівку за стіни міста, наведені близько 2000 років тому назад в китайських записах. У 1818 році французькими вченими було

розроблено повітряну кулю, яка, імовірно, використовувала часову затримку, повинна була пролітати над ворогами й запускати на них ракети. Пізніше, під час американо-іспанської війни в 1890-х роках винахідник в армії США Уільям Едді зробив сотні фотографій системою повітряного фотографування, що встановлювалась на великих повітряних зміях [9, с. 103]. Попри багато інших спроб збудувати БпЛА в початковій періоді зародження і становлення авіації, до розвитку трьох необхідних компонентів проекти БпЛА не могли бути успішними. Цими компонентами стали [10, с. 6]:

повітряна платформа, що може маневрувати і виконувати політ у необхідному напрямі;

система управління, яка б забезпечила автономний політ або зв'язок між оператором та БпЛА;

корисне навантаження, що здатне виконувати необхідні функції.

Так у період з 1900-х років до кінця Першої світової війни, коли активно розвивалось авіабудування, успішних проектів зі створення БпЛА не відбулось. Найбільш відомі спроби створити БпЛА були в Чарльза Кеттеринга. Він запропонував безпілотний літак (Рис. 1), що був начинений вибуховою речовиною, який летів по прямій певний час. Потім, за командою від часового механізму, літак скидав крила й атакував позиції ворога. Як датчики навігації системи керування було використано магнітний компас та барометричний висотомір. У 1917 році у Великій Британії була невдала спроба використати радіоконтроль [9, с. 104] над БпЛА-мішенню для підготовки зенітних підрозділів [11]. У Німеччині була запропонована ідея дистанційного керування ракетами зовнішнім пілотом, що знаходився на землі, по тонкому мідному дроту, який тягнувся позаду ракети. Цей принцип був реалізований в ракетах з дротовою системою наведення в 1970-х роках [9, с. 105] і застосовується до сьогодні. Також у Німеччині було розроблено декілька конструкцій літаючих бомб та планер, який був здатен нести близько 1 т вибухової речовини. Проте до кінця війни, ці проекти не були реалізовані.

У міжвоєнний період більшість програм зі створення БпЛА було згорнуто внаслідок обмеження фінансування з боку урядів держав [9, с. 105; 10, с. 7, 11]. Проте в 1933 році в Англії було завершено розробку одного з найбільш відомих БпЛА на той період – радіокерованого багаторазового БпЛА-мішені DH82B Queen Bee (Рис. 2), що був побудований на базі відреставрованого літака Fairey Queen [12, с. 714]. У США в 1939 році масово випускався радіокерований БпЛА-мішень QQ-2, а в Німеччині

почали розробляти радіокеровані бомби Henschel Hs 293 и Fritz X.



Рис. 1. БпЛА “Жук Кеттеринга”.  
Джерело: [11].



Рис. 2. БпЛА DH82B Queen Bee.  
Джерело: [12, с. 714].

Якщо розглядати розвиток пілотованої та безпілотної авіації до початку Другої світової війни можна виділити спільні риси розвитку та особливості БпЛА. Для пілотованої авіації відбулось зародження і становлення. Літальні апарати стали більш швидкісними, маневреними, надійними у порівнянні з першими літаками. Також у цей період на озброєні літаків з'являються великокаліберні кулемети та гармати, встановлюються бронеспинки для захисту екіпажу [2, с. 6...78]. БпЛА, розвиток яких нерозривно пов'язаний з розвитком пілотованої авіації, на початок Другої світової війни пройшли лише стадію зародження. На цей час були принципово вирішені задачі з повітряною платформою, яка могла маневрувати і бути скерована в необхідному напрямі, а також дистанційним керуванням літака. Слід відмітити, що один із перших успішних БпЛА DH82B Queen Bee, як і перший пілотований ЛА, не мав корисного навантаження, що є цілком закономірним. Дані щодо маси елементів системи дистанційного керування, що була встановлена на борту БпЛА, відсутні у відкритому доступі, проте цілком імовірно, що для БпЛА багаторазового застосування, маса цієї системи була досить великою і можливості встановити додаткове обладнання зі збереженням льотно-технічних характеристик вихідного літака не було. Також DH82B Queen Bee мав низьку надійність [10, с. 7], як і перші пілотовані літаки. Тому можна

стверджувати, що рівень науки і техніки того часу забезпечив лише принципову можливість створення зразків БпЛА.

Отже, з аналізу наведеного періоду розвитку пілотованої та безпілотної авіації до Другої світової війни, можна зробити висновок, що попри суміжність пілотованої та безпілотної авіації розвиток БпЛА відбувається із затримкою відносно пілотованої авіації, але має схожі проблеми, які потребують вирішення.

Під час Другої світової війни втрати Німеччини літаків і льотного складу в повітряних боях над Англією змусили шукати альтернативи для продовження нанесення ударів по Британії. Однією з них стало застосування БпЛА-снаряду V-1 (Рис. 3), що є одним із перших масованих застосувань БпЛА [10, с. 9]. В Англії та США БпЛА продовжували застосовуватись як повітряні мішені з покращенням характеристик радіокерування. У Радянському Союзі використовувались переобладнані під ударні БпЛА разового застосування важкі бомбардувальники ТБ-3 для знищення мостів.

Під час та після Другої світової війни до розвитку безпілотної техніки відносять роботи з наведення за телевізійним, радіо та інфрачервоним каналом керування та корегованих авіаційних бомб [13, с. 16], а також створення ракетної техніки [10, с. 9].

Значним розвитком БпЛА, близькому до його сучасного розуміння, є розробка компанією Ryan Aeronautical Company сімейства БпЛА повітряного базування model 147 (147A, 147B, AQM-34, BQM-34) на базі модифікованого БпЛА-мішені FireBee. Серед удосконалень необхідно відмітити встановлення фотокамери високої роздільної здатності, програмований автопілот, використання засобів радіоелектронної боротьби, використання технологій малої радіолокаційної та інфрачервоної помітності [14, с. 21...26].



Рис. 3. Німецький БпЛА-снаряд V-1.  
Джерело: [12, с. 718].

Одними із причин, які спонукали активізацію розробки розвідувальних БпЛА в Сполучених Штатах Америки та подальше їх застосування, стали збиття літака-розвідника U-2 над Радянським Союзом [13, с. 16] і втрати авіації під час війни у В'єтнамі [15, с. 137]. Підтримання парку пілотованих літаків у бойових умовах стало доволі витратно. За результатами операції Buffalo Hunter,

що проводилась з 1964 по 1973 рік, було покращено ряд систем: дистанційного керування БпЛА, збору та передачі розвідувальної інформації, активного захисту, автоматичного управління польотом [13, с. 16]. Проте успішне виконання розвідувальних завдань склало лише 50 %. Основною причиною невиконання завдань були похибки в навігації [13, с. 24], що було основною проблемою до появи супутникової навігації.

Активно застосовувались БпЛА Ізраїлем в арабо-ізраїльських війнах як приманка для викриття та виснаження ППО противника [13, с. 16], визначення характеристик радіолокаційних станцій противника [9, с. 121], що стало значним удосконаленням тактики застосування БпЛА. Іншим важливим удосконаленням стало застосування малогабаритних БпЛА Mastiff та Scout для забезпечення спостереження за діями противника в режимі часу близькому до реального. Ефектом від цього стало значне зростання ефективності ППО Ізраїлю, оскільки було відомо час та місце зльоту літаків Південного Лівану, їх тип. У результаті співвідношення збитих літаків склало 95:1 на користь Ізраїлю [9, с. 122].

Отже, можна сказати, що після Другої світової війни і до початку 1990-х відбулося становлення БА. Даний період характеризувався продовженням еволюційного розвитку можливостей БпЛА і кількома інноваційними застосуваннями БпЛА. Усі ці успішні оперативні застосування БпЛА були обумовлені тим, що БпЛА відповідали трьом фундаментальним вимогам: наявність повітряної платформи, яка здатна маневрувати і виходити на ціль; цільове навантаження, що виконує необхідні функції; забезпечення дистанційного керування БпЛА або достатньої його автономності.

Розвиток БпЛА спирався на розвиток пілотованих літаків. Тому швидкості, висоти польоту наближались до меж пілотованої авіації. Перші розвідувальні БпЛА мали високі швидкості й висоти польоту, оскільки це забезпечувало менший час перебування в зоні дії ППО противника, а також зменшувало час доставки розвідувальної інформації до споживача. Для розвідки районів з розвинутою ППО відбувається зменшення розмірів БпЛА, швидкостей і висот їх польоту, починають ширше застосовуватись технології зменшення помітності БпЛА. Цьому також сприяє розвиток технологій в інших сферах. У цей період відбулась поява і удосконалення мікропроцесорної техніки, розвиток каналів передачі даних, інерціальних навігаційних систем. Це дало змогу зменшити масу і габарити обладнання, що встановлювалось на БпЛА, їх енергоспоживання. Зменшення габаритів і маси елементів систем керування БпЛА, цільового навантаження дозволило БпЛА в 1989 році (програма Condor [9, с. 112]) виконати повністю автономний політ від зльоту до посадки по

літаковому. Отже, можна виділити особливість розвитку БпЛА у порівнянні з пілотованими ЛА. Якщо для пілотованих ЛА на початковому етапі та етапі становлення було критично зменшувати відносну масу двигуна і його систем, то для БпЛА критичним був розвиток бортового обладнання, що відповідає за сталість і керованість польоту, навігацію, передачу даних на наземні станції керування і контролю, виконання корисних функцій.

Серед проблем БпАК, на рішення яких були направлені зусилля в даний період, були низькі оперативність і надійність, та висока вартість застосування. Так проведена оцінка застосування БпАК BGM-34C для забезпечення виконання завдань з РЕБ на європейському театрі бойових дій показало, що необхідно 18 вильотів БпЛА на добу. Це вимагає 8 літаків-носіїв DC-130 та 25 вертольотів MARS. Річні витрати були співставні з витратами на повітряне крило, що озброєне 72-ма F-4E, що могло виконувати сотні літако-вильотів в день [15, с. 35].

Необхідно відмітити, що на початку і в середині 1990-х років були створені передумови до подальшого розвитку БА. До цього часу відбувся розвиток систем ППО і суттєве зростання їх ефективності. Водночас відбувалось ускладнення і зростання вартості створення, виробництва і експлуатації авіаційної техніки. Підтримання парку пілотованих літаків разом з екіпажами в бойових умовах стало доволі витратно. Витрати на утримання і застосування БпАК були меншими відносно пілотованих ЛА. У подальший період з початку 1990-х років і до сьогодні відбувся експоненційний розвиток у сфері інформаційних технологій. Це спричинило як прямий вплив на характеристики БпЛА у вигляді застосування нових поколінь малорозмірних датчиків та іншого бортового обладнання, так і непрямий, що полягає у розвитку чисельних методів дослідження в аеро-, термо- та газодинаміці, технологіях конструкційних матеріалів, методів та засобів виробництва тощо.

У цьому контексті необхідно приділити увагу розвитку комплексів бортового обладнання (далі – КБО) літальних апаратів. Починаючи з 60-х років виділяють три періоди розвитку КБО, що базуються на архітектурі побудови обладнання, що застосовується [16, с. 54]:

- незалежна;
- федеративна;
- інтегральна модульна.

Незалежна архітектура приладів бортового обладнання характеризується застосуванням електромеханічних обчислювачів, зміна призначення якого неможлива без зміни його конструкції. Реалізація математичних обчислень на основі технологій електромеханіки призводила до високих

значень масогабаритних показників. Тому їх застосування в авіації взагалі було ускладнено. З появою напівпровідникових технологій з'явилась можливість застосовувати цифрові технології при створенні КБО, проте і воно виявилось великим для застосування на ЛА тактичного рівня [16, с. 56]. Лише з подальшим розвитком технологій виготовлення напівпровідникових радіоелементів і появою гібридних інтегральних схем було досягнуто прийняттого рівня масогабаритних показників КБО, що дало змогу їх широкого використання в авіації, зокрема в безпілотній. Значне зменшення відносної маси бортового обладнання збіглося в часі з появою і застосуванням перших розвідувальних БпЛА. Проблема незалежної архітектури полягала в унікальності створюваного обладнання, що потребувало великих витрат на їх розробку. Для вирішення цієї проблеми відбувся перехід від проектування окремих моделей з несумісними системами команд до сімейств машин, побудованих на основі однотипної архітектури, тобто перехід до федеративної архітектури.

Федеративна архітектура – така організація структури авіоніки, коли КБО складається з напівнезалежних систем, об'єднаних єдиними мультиплексними каналами обміну даних або іншими розгалуженими системами зв'язку, що забезпечує можливість загального доступу систем до загальних ресурсів (датчики, індикатори та пульти управління). Побудова КБО на основі федеративної архітектури продовжується і в сучасний період для пілотованих ЛА і безпілотних БпЛА II та III класів. В основі застосовуються сучасні бортові цифрові обчислювальні машини, засновані на підході комбінування спеціалізованих та уніфікованих процесорних модулів. Розширення функціональності КБО досягається зростанням кількості систем у його складі. Проте практично лінійна залежність масштабування функціональності КБО від кількості його систем, що входять до його складу і є одним із основних недоліків федеративної архітектури [17, с. 46], особливо при застосуванні на менших БпЛА. Зростання кількості систем у КБО приводило до зменшення надійності всього комплексу в цілому.

Вимоги до зменшення відносної маси бортового обладнання і підвищення його надійності зумовили поширення використання інтегральної модульної архітектури (ІМА) авіоніки. При такому типі архітектури комплекс обладнання представлено групою датчиків, індикаторів та сигналізаторів (за необхідності) та єдиним обчислювальним блоком – крейтом. Функції, що виконуються КБО, реалізуються у вигляді

програмних додатків, що використовують спільні обчислювальні потужності крейта. Концепція ІМА має на увазі повну централізацію обчислювальних функцій КБО на одному обчислювальному ядрі. Усе обладнання комплексу, що залишилося (периферійне відносно крейта) розташовується залежно від вимог до його місця розташування на борту ЛА.

У загальному випадку крейт складається з модулів та магістралей. Модулі – електронні блоки, що виконують різні функції: вимірювання, генерація сигналів, зберігання інформації, перетворення сигналів та ін. Модулі встановлюються в крейт і підключаються до магістралі. Магістраль – сукупність електричних провідників, що з'єднують різні модулі крейта, згрупованих за функціональним призначенням у шини. У загальному випадку виділяють такі типи шин: шина адреси, шина даних, шина команд, шина стану, шина управління, шина арбітражу, шини переривання [17, с. 48]. Типовий склад крейта має такі модулі: обчислювальний, модуль пам'яті або прийому передачі даних, живлення, підтримання нормальних кліматичних умов [18, с. 18].

Чітке розмежування крейта та периферійного обладнання призводить до того, що відмова функції комплексу стає можливою у разі несправності безпосередньо самого периферійного устаткування, лінії передачі чи крейта. Враховуючи високі показники надійності кожного з цих елементів, виходить, що ймовірність відмови функції у КБО з ІМА архітектурою менше, ніж КБО інших типів [17, с. 47]. Так, за наведеною оцінкою [19, с. 8] вираш при застосуванні бортового комплексу Primus Epic на основі ІМА фірмою Honeywell у порівнянні з апаратурою, що була розроблена за стандартами 700 серії ARINC за такою системою показників склав:

маса та геометричні розміри апаратури КБО знижено на 40 %;

надійність КБО збільшена на 100 %;

вартість придбання обладнання знижено на 30 %;

вартість використання обладнання знижено на 50 %;

ремонтпридатність бортового обладнання підвищено на 60 %;

протяжність електропроводки ЛА знижена на 30 %.

Ще однією із переваг ІМА архітектури є незалежність програмного забезпечення та апаратної частини крейту, що дало змогу реалізувати відкриту архітектуру, що змінює конфігурацію КБО за принципом «plug and play», тобто включення нових додатків (функцій КБО або модернізація апаратної частини комплексу)

здійснюється, не торкаючись функцій, що вже працюють.

Концептуальними напрямками розвитку авіоніки нового покоління є:

створення уніфікованого ряду відкритих відмовостійких адаптуємих мережевих архітектур КБО на базі масштабованої ІМА з метою збільшення продуктивності, підвищення надійності передачі інформації, стійкості до перешкод і зниження масових характеристик ліній зв'язку;

застосування перспективних інтерфейсів (авіаційної Ethernet, Fibre Channel, RapidIO, Wi-Fi) і протоколів зв'язку (ТТП) в ІМА-платформі, між функціями, датчиками і виконавчими елементами, що забезпечують ефективну побудову динамічних структур з мережевою організацією;

подальша уніфікація модулів і компонентів з метою зниження номенклатури і термінів розробки КБО, їх масогабаритних характеристик, підвищення продуктивності елементної бази, надійності та відмовостійкості;

впровадження перспективних схемотехнічних і конструктивних рішень для функціональних модулів: багатоядерних процесорів, графічних модулів з формуванням 3D-зображень високої роздільної здатності, модулів електроживлення з компенсацією перерв електропостачання, високонадійних мережевих комутаторів і т.д.;

широке застосування комерційних апаратних і програмних компонентів для зниження вартості авіоніки;

забезпечення незалежності програмного забезпечення від використовуваних апаратних засобів;

створення інтегрованого автоматизованого середовища забезпечення процесів розробки КБО на основі інтелектуальних систем, моделювання та віртуального прототипування.

Подальше підвищення динаміки бойових дій у збройних конфліктах з 1990-х років та успішне застосування Ізраїлем БпАК для спостереження за противником в режимі часу близького до реального зумовило розвиток БпАК для задач спостереження у більшості розвинених країн світу. Так під час війни у Перській затоці БпЛА RQ-2 “Pioneer” різних підрозділів збройних сил США налітали 1348 годин [9, с. 124], здійснюючи цілевказання, спостереження за противником і виконуючи розвідку маршрутів руху наземних сил та вертольотів. Застосування RQ-2 “Pioneer” дало змогу оперативно отримувати командирам, що приймають рішення, необроблену інформацію, що спростило прийняття рішень.

У конфліктах на території колишньої Югославії активно застосовувалися три типи БПЛА. Це були комплекси з БпЛА Pioneer, Hunter



і Predator. Відбувся еволюційний розвиток обладнання БПЛА: БПЛА Predator був обладнаний оптико-електронною інфрачервоною камерою та мав можливість передавати дані через ультрависокочастотний супутниковий канал зв'язку. У системі управління військами були використані технології комерційного супутникового телебачення з широкою смугою пропускання, безпечне підключення до мережі інтернет тактичної ланки управління через оптико-волоконні кабелі та комерційні супутникові транспондери. Це дало змогу значно збільшити швидкість передачі даних. БПЛА Predator і наземний командний пункт Bosnia Command and Control Augmentation (BC2A) передавали інформацію з цільового споряддя напряму керівникам театру бойових дій через Об'єднану службу мовлення [20, с. 45...50]. Командири отримували зв'язок зі швидкістю 30 мегабіт на секунду через супутники прямої трансляції. Це було приблизно в 3100 разів більше, ніж швидкість передачі даних у 9,6 кілобіт за секунду, дозволена модемами, доступними під час війни в Перській затоці [9, с. 125]. Під час цих конфліктів було доведено ефективність інтеграції БпАК в C4I (command, control, communications, computer, and intelligence) структуру, що обумовило майбутні вимоги до нових БпАК.

На сьогодні в умовах бойових дій, спостерігається велике різноманіття БпАК, особливо I класу, але є труднощі із забезпеченням необхідної кількості відповідних БпАК. Подібний процес спостерігався і в пілотованій авіації. Потреба у великій кількості літаків привела, з одного боку, до прагнення всіляко скоротити кількість типів літаків і кількість прийнятих на озброєння зразків, з іншого боку, до пошуків таких матеріалів, технічних прийомів, виробничих процесів, конструктивних форм, які сприяли найбільшою мірою машинізувати та прискорити процес виробництва літаків. Тому в пошуках напрямів удосконалення виробництва досліджувались напрями можливого удосконалення виробництва. Розглянемо підхід для виявлення напрямів удосконалення виробництва сучасних БпАК.

Аналогічно отриманню рівняння існування БПЛА наведено в спрощеному вигляді складові трудомісткості БПЛА  $T_{\text{БПЛА}}$  (механічні  $T_{\text{мех}}$ , заготівельні  $T_{\text{загот}}$ , складальні  $T_{\text{склад}}$  і монтажні роботи  $T_{\text{монт}}$ ). Також необхідно врахувати роботи з розробки та інтеграції програмного забезпечення  $T_{\text{пз}}$ :

$$T_{\text{БПЛА}} = T_{\text{мех}} + T_{\text{загот}} + T_{\text{склад}} + T_{\text{монт}} + T_{\text{пз}}. \quad (3)$$

Або у відносних величинах при діленні на  $T_{\text{БПЛА}}$ :

$$1 = \zeta_{\text{мех}} + \zeta_{\text{загот}} + \zeta_{\text{склад}} + \zeta_{\text{монт}} + \zeta_{\text{пз}}. \quad (4)$$

Наприклад, для літаків розподіл трудомісткості мав вигляд, представлений на рис. 4.

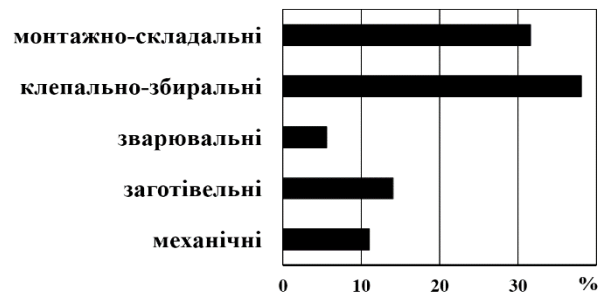


Рис. 4. Трудомісткість різних видів робіт при виготовленні літака.

Джерело: розроблено авторами за даними [2, с. 84].

Для зменшення трудомісткості застосовувались підходи панелірування. У розрізній панелірованій конструкції було досягнуто зниження трудомісткості клепальних і монтажних робіт на 33 %. Отже, як для пілотованих літаків, так і для БпЛА, щоб забезпечити його ефективність, необхідно закладати технологічні можливості на стадії проєктування БпАК. Як для пілотованої авіації, так і безпілотної, у розвинених країнах відбувається подальший пошук спрощення та здешевлення виробництва бойових БпЛА, наприклад, у США одна з програм – Replicator під керівництвом Агентства передових оборонних дослідницьких проєктів (англ. Defense Advanced Research Projects Agency) (далі – DARPA) Міністерства оборони (далі – МО) США [21]. Метою програми є значне здешевлення виробництва БпАК, можливість їх масштабування і збирання в місцях, що наближені до тактичних армійських підрозділів.

Особливістю сучасного виробництва БпАК є застосування адитивних технологій, а також широке застосування в конструкції БПЛА I класу елементів, які призначались для цивільного використання і має налагоджене серійне виробництво. Це дає змогу доволі швидко переорієнтувати та масштабувати виробництво. Також відбувається широке застосування інтегральної модульної авіоніки, що значно зменшує обсяг складальних робіт.

На сьогодні розвиток БпАК відбувається під впливом різних факторів. Серед них наявність тенденції покладання дедалі більшої кількості завдань пілотованої авіації на безпілотну. У свою чергу переміщення пілота з кабіни повітряного судна на землю, з однієї сторони, усуває обмеження, що накладає наявність людини на борту, виключає необхідність наявності на повітряному судні систем життєзабезпечення та рятування людини. З іншої сторони, зумовлює необхідність наявності на борту досконаліших навігаційних засобів, здатних до автономного



самопозиціонування, комплексу продуктивних бортових обчислювачів, у тому числі для роботи з нейромережевими алгоритмами, оптико-електронних систем і сенсорів високої точності та чутливості, а також систем автоматичного управління польотом та автоматичного запобігання зіткнень.

Іншим фактором, що впливає, є концепція технічного розвитку і вимоги до майбутніх БпЛА, що наведені в [22, с. 45]. Серед них повна автономізація БпЛА, низька помітність, маневреність з переваженням до 40g, над- та гіперзвукові швидкості польоту, збільшення кількості датчиків “технічного зору”, що сприймають входні параметри для управління БпЛА, політ в умовах обледеніння, будь якої турбулентності і вологості, значні дальність і тривалість польоту. Це потребує зосередження робіт на розробці нових матеріалів, джерел енергії, двигунів для розподілених силових установок, аеродинамічних компонувань з високим ступенем інтеграції елементів планеру та силовій установки БпЛА тощо.

Суттєво впливає на розвиток БпАК значний прогрес систем протидії БпАК, зокрема засобів радіоелектронної боротьби, що потребує розвитку захищених каналів зв'язку БпАК, автономності функціонування БпЛА, підвищення інтелектуальності його систем, створення надманеврених БпЛА, зменшення помітності та габаритів БпЛА. Також впливовими факторами, які залишаються, є вимоги зі збільшення дальності і тривалості польоту, покращення систем навігації та автономності польоту (особливо для малогабаритних БпЛА), збільшення корисного навантаження, стійкість до радіоелектронної боротьби.

Зниження рівня застосування малогабаритних БпАК до індивідуального, внаслідок жорстких обмежень за масою і габаритами, потребує високого рівня зв'язків між компонентами системи та створення високоінтегрованих конструкцій, де елементи фюзеляжу можуть виконувати, наприклад, функції антени для БпЛА багаторазового застосування або корпусу боєприпасу для БпЛА-камікадзе. Попри те, що вже існують камери оптичного та інфрачервоного діапазону, датчики для різних систем мають порівняно невелику масу, БпАК індивідуального рівня, у переважній більшості яких використовуються електродвигуни, обмежуються можливостями акумуляторних батарей [23, с. 19].

З аналізу факторів, що впливають на розвиток БпАК, можна сказати, що як і для літаків пілотованої авіації, так і для БпЛА перспективним напрямом розвитку є вдосконалення силових

установок з метою покращення тактико-технічних характеристик двигунів, зниження витрат на обслуговування БпЛА, покращення показників помітності, живучості та значного підвищення паливної економічності, збільшення дальності польоту та тривалості баражування. Посилюється тенденція до здатності силовій установці забезпечити вертикальний зліт та посадку БпЛА. Крім того, до майбутніх силових установок висуваються вимоги щодо живлення бортової зброї спрямованої енергії та забезпечення протидії такій зброї. Для цього потрібно розробка силових установок з комплексним управлінням тепловим станом і потужністю двигуна, а також з інтегрованими джерелами електричної енергії великої потужності. Технології силових установок для БпЛА II-III класів доцільно поєднувати з програмами розвитку авіаційних комплексів 6-го покоління, що поєднуватимуть в собі пілотовані та безпілотні ЛА [24, 25].

Очікується, що на перспективних пілотованих та безпілотних ЛА будуть встановлені трьохконтурні адаптивні двигуни 6-го покоління, що забезпечить високу паливну ефективність і високий рівень характеристик у широкому діапазоні висот і швидкостей польоту з малими характеристиками помітності [26]. Для забезпечення потреби в енергії перспективних КБО та систем озброєння направленої енергії вже опрацьовуються питання покращення двигунів 6-го покоління. Так проєкт Міністерство оборони США АТТАМ (Advanced Turbine Technology for Affordable Mission Capability) направлений на розробку технологій, що дають змогу не лише суттєво покращити характеристики адаптивного двигуна, а й інтегрувати в ньому такі технології, як генерація електроенергії та терморегулювання. У програмі АТТАМ буде приділено велику увагу зниженню помітності для інфрачервоних систем виявлення [27, с. 70].

Необхідно виділити напрям розвитку БпЛА з гіперзвуковими швидкостями польоту. До одних із прототипів можна віднести гіперзвукові БпЛА Х-43А на водні (число Маха  $M_n \approx 9$ ) та Х-51А на вуглеводневому паливі (число Маха  $M_n = 5,1$ ) [28, с. 1.7-4...1.7-9]. Компанією Lockheed Martin також ведуться роботи по створенню гіперзвукового розвідувального БпЛА SR-72 [29] з комбінованою силовою установкою (Рис. 5). Швидкості польоту плануються близько 5,5...6 Махів.

Окремим напрямом є опціонально-пілотовані ЛА. Прикладом такого є створюваний за Європейською програмою Tempest перспективний АК, що буде включати перелік перспективних технологій:

технології, що забезпечують низький рівень помітності;

управління роєм БПЛА;

застосування зброї спрямованої енергії, а також гіперзвукової зброї;

можливість взаємодії з іншими платформами, що передбачає обмін інформацією у захищеному інформаційному просторі для координації бойових дій (cooperative engagement capability);

адаптивний двигун;

системи енергозабезпечення та теплового регулювання.

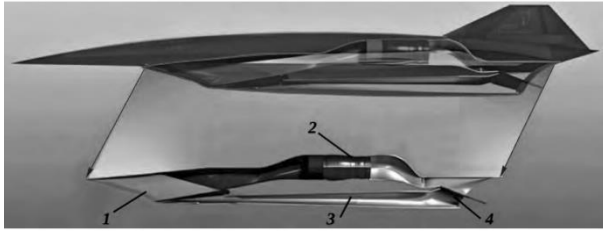


Рис. 5. Схема комбінованої силової установки SR-72: 1 – спільний повітрязабірник, 2 – газотурбінний двигун, 3 – гіперзвуковий повітряно-реактивний двигун, 4 – спільне сопло.

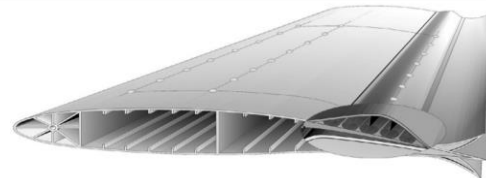
Джерело: [29].

Перспективним напрямом розвитку силових установок для БПЛА всіх класів є застосування водневих технологій на основі паливних елементів [31, с. 1...5]. Особливістю водневих технологій є їх різноманітність і можливість застосування різних типів силових установок з різними способами зберігання водню на борту [32, с. 9070]. Застосування паливних елементів є одним із напрямів гібридизації БПЛА. Це дає змогу зменшити відносну масу силової установки, що дозволяє перерозподілити масу БПЛА на досягнення необхідних показників інших властивостей.

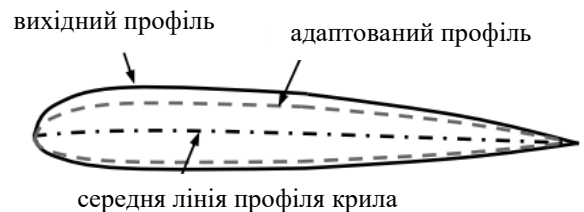
З точки зору забезпечення кращих аеродинамічних характеристик БПЛА на різних режимах польоту перспективним напрямом розвитку є застосування морфінгових технологій, що дають змогу змінювати геометричні параметри елементів конструкції планеру з метою реалізації ідеї адаптивного крила [33...36]. Цей підхід потребує застосування новітніх матеріалів з пам'яттю форм, гнучкістю та ін. Концепція адаптивного крила припускає зміну кривини крила, його товщини, стрілоподібності, кута поперечного V і т. д (Рис. 6).

У 1990-х роках DARPA, AFRL (Air Force research laboratory), NASA та Northrop Grumman співпрацювали над програмою Smart Wing, щоб експериментально визначити, як стандартні шарнірні поверхні управління можна замінити адаптивними структурами крил із вбудованими механізмами приведення в дію, щоб забезпечити змінні оптимальні аеродинамічні форми для різних

режимів польоту. У програмі використовувались матеріали з пам'яттю форми (shape memory alloy – SMA) для контуру керуючих поверхонь задньої кромки та торсійні SMA трубки для зміни крутки крила. Випробування в аеродинамічній трубі проводилися на моделі UCAV (unmanned combat aircraft vehicle) від Northrop Grumman у масштабі 30 %. Випробування в аеродинамічній трубі показали покращення в підймальній силі та крені на 8-12 % у порівнянні зі звичайним крилом [34, с. 265].

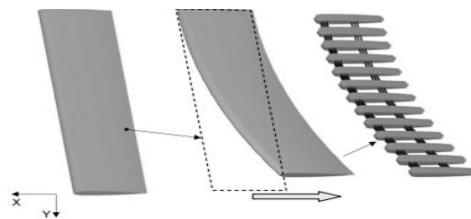


а) гнучка задня частина крила;



середня лінія профіля крила

б) зміна товщини профілю крила;



в) зміна форми крила в плані.

Рис. 6. Приклади застосування морфінгових технологій.

Джерело: розроблено авторами за даними [33, 35].

Впровадження композиційних матеріалів у конструкції БПЛА аналогічне переходу від дерев'яних до металевих конструкцій під час побудови літаків у 20-х роках минулого століття. Перспективи використання композиційних матеріалів надзвичайно широкі, оскільки вони дають змогу створювати конструкції із заданими властивостями при зменшенні маси конструкції літального апарату.

Наприклад, знаючи навантаження, що діють на ЛА, можна спроектувати конструкції, які будуть оптимізовані під сприйняття навантажень у заданих місцях. Тим самим вдасться заощадити на вазі конструкції. Крім того, завдяки новим матеріалам можна розглядати нові форми фюзеляжу, наприклад, у вигляді еліпса або короба (для транспортного БПЛА). Композиційні матеріали дають змогу перейти до геодезичних конструкцій БПЛА, що складаються не з традиційних лонжеронів і стрінгерів, а з переплетення

вуглецевих ниток. Можливість застосування в авіабудуванні даного підходу досліджувалась за програмою ALaSCA (Advanced lattice structures for composite airframes) [37] в Європейському Союзі. Такі конструкції застосовуються для виготовлення корпусів ракет, забезпечуючи зниження маси на 25...40 %.

Подібна конструкція є неоднорідною і дає змогу сприймати потрібні навантаження (крутні, що розтягують, стискають) у критичних місцях. Результати даного проекту можуть дати старт застосуванню нових, так званих прокомполітичних конструкцій, які, на відміну від традиційних виробів з композиційних матеріалів якими просто заміняють алюмінієві елементи конструкції, дають змогу повною мірою реалізувати потенціал композиційних матеріалів.

У сфері виробництва БпАК одним із напрямів розвитку є застосування під час виробництва БпЛА технологій адитивного виробництва. Застосування 3-d принтерів дає змогу створювати більш складні конструкції та її елементи, підвищити інтеграцію елементів планера. Проте адитивне виробництво потребує адаптації існуючих чи створення нових матеріалів, що застосовуються під час виробництва БпЛА, а також розвиток методів проектування ЛА, що враховують особливості адитивного виробництва і матеріалів [38, с. 206...208].

З розвитком і впровадженням у БпАК елементів штучного інтелекту та нейронних мереж, підвищення автономності та "інтелектуалізації" БпЛА активно досліджуються напрями групового і ройового застосування БпЛА, а також спільного застосування з пілотованими ЛА. Тривають розробки БпЛА з повітряним стартом з літака-носія і подальшим поверненням на нього [39].

Інші питання, проблеми та напрями розвитку БпАК, що направлені на суто цивільне використання, наведені в [40, с. 109...137]. Проте певні наведені підходи можуть бути застосовані й для бойових БпЛА у майбутньому.

### **Висновки**

У результаті ретроспективного аналізу розвитку БпЛА як основного елементу БпАК, визначено особливості розвитку БпЛА у порівнянні з пілотованими ЛА та їх спільні риси розвитку. Природно, що розвиток БпЛА відбувається, спираючись на досягнення пілотованих ЛА. Внаслідок цього ключовим для БпЛА стала не поява силової установки з відносною масою, що забезпечує можливість польоту, а розвиток бортового обладнання прийнятної маси, що забезпечує стійкість та керованість БпЛА при віддаленому управлінні ним або в автономному польоті. Спільними рисами розвитку є низька надійність ЛА та відсутність спеціалізованих засобів ураження на початкових етапах розвитку, велике різноманіття типів ЛА, необхідність уніфікації та стандартизації

тощо. Загалом розвиток БпАК аналогічний розвитку пілотованих ЛА з певною затримкою в часі та особливостями, що визначаються фундаментальними вимогами до БпЛА. Це дає змогу прогнозувати розвиток БпАК, у тому числі агресора, заздалегідь визначати загрози, що можуть виникати і готувати адекватну відповідь з меншими втратами. Під час створення вітчизняних зразків БпАК передбачати проблеми, що виникатимуть, стимулювати розвиток спеціалізованих галузей і виробів, що необхідні для сталого розвитку власних БпАК.

На основі аналізу доступних у відкритому доступі джерел наукової та науково-технічної інформації визначено основні технічні фактори, що визначають сучасні напрями розвитку БпАК, серед яких:

- значний прогрес у засобах протидії БпАК;
- уразливість каналів передачі даних між БпЛА та наземною станцією керування і контролю;
- недостатня швидкість передачі даних;

- експоненційне зростання можливостей обчислювальної техніки та розвиток технологій штучного інтелекту;

- обмежений запас енергії та недостатня потужність джерел живлення на борту БпЛА;

- поширення концепцій мережоцентричних війн, "розумної зброї", асиметричних методів ведення війни;

- зменшення масогабаритних показників цільового споряддя та систем автоматичного управління БпЛА;

- вимоги до вартості, масовості, швидкості та локалізації виробництва БпАК, мінімізації експлуатаційних витрат.

На основі аналізу етапів розвитку БпАК та сучасних програм створення перспективних БпАК та їх складових визначено тенденції розвитку БпАК. Цими тенденціями є:

- інтеграція БпЛА та пілотованих ЛА в єдині авіаційні комплекси;

- підвищення автономізації та "інтелектуалізації" БпАК застосуванням систем технічного зору БпЛА, елементів штучного інтелекту;

- застосування силових установок БпЛА на основі водневого палива із забезпеченням вертикального зльоту та посадки;

- підвищення інтеграції планера і силової установки БпЛА, застосування розподілених силових установок БпЛА, реалізація концепції адаптивного крила;

- розширення можливостей БпЛА виконувати ударні функції, здатність вести повітряний бій та перехоплення повітряних цілей;

- застосування нових методів виробництва і матеріалів, здешевлення і спрощення виробництва БпАК;

- поширення відкритої ІМА авіоніки, уніфікація модулів і компонентів КБО, забезпечення незалежності програмного забезпечення від

використовуваних апаратних засобів;

впровадження перспективних інтерфейсів (авіаційної Ethernet, Fibre Channel, RapidIO, Wi-Fi) і протоколів зв'язку (ТТП) в ІМА-платформі, між функціями, датчиками і виконавчими елементами;

групове застосування БпЛА та інш.

Отже, визначені тенденції розвитку, з однієї сторони, є наслідком зменшення маси складових цільового споряддя  $G_{цс}$ , що в межах незмінної відносної маси  $\zeta_{цс}$  (рівняння (2)) БпЛА дає змогу покращити показники БпАК. З іншої сторони, зі збільшенням функцій, що покладаються на БпАК, розширюється обладнання, що встановлюється на борту БпЛА і виникає енергетичний дисбаланс на борту БпЛА, і необхідно збільшувати  $\zeta_{пал}$  та  $\zeta_{су}$  для забезпечення необхідних запасу палива (енергії) та потужності силової установки. Для цього можливо зменшити відносну масу планера  $\zeta_{пл}$  шляхом застосування нових конструкційних матеріалів. Також можливо здійснити перехід на нові типи силових установок, що при незмінних  $\zeta_{пал}$  та  $\zeta_{су}$  підвищить їх ефективність.

Врахування тенденцій розвитку БпАК та факторів, що впливають на їх розвиток у сукупності з вимогами до БпАК дає змогу визначити пріоритети в створенні проривних технологій, що забезпечать

ефективність вітчизняних БпАК під час відсічі збройної агресії та конкурентну перевагу в довгостроковій перспективі. До критичних технологій, на розвиток яких доцільно звернути увагу, можна віднести силові установки з водневими паливними елементами, технології гібридизації та електрифікації БпЛА, конструкційні матеріали з пам'яттю форми, що можуть бути використані при створенні морфінгових елементів планеру. Також необхідно віднести матеріали, що можуть бути використані для виробництва елементів БпЛА за допомогою 3D друку. Необхідно приділити увагу розвитку жароміцних та жаростійких матеріалів та сплавів для виробництва газотурбінних двигунів, планерів над- та гіперзвукових БпЛА тощо. Окремим напрямом є розвиток штучного інтелекту та інших інформаційних технологій, інтегральних схем, компонентів мікроелектроніки, що забезпечить інтелектуалізацію та подальшу автономізацію БпЛА тощо.

**Напрямок подальших досліджень** має бути синтез аеродинамічних конструвань перспективних БпЛА з урахуванням їх гібридизації при застосуванні водневих паливних елементів.

#### Список літератури

1. Корсунов С. І., Волков А. Ф., Оборонов М. І., Орехов С. В., Гуртовенко В. В., Федченко С. І. Трансформація завдань безпілотної авіації: від створення до застосування у воєнних конфліктах сучасності. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 3(44). С. 66-81. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.44.08>.
2. Етапи розвитку військових літальних апаратів: навч. посіб. / В. В. Логінов, Є. О. Українець, Є. В. Спіркін, П. А. Глушенко. – Х.: ХНУПС, 2023. – 154 с.
3. Туранський М. О., Пулим О. В., Корольова О. В. Історія розвитку та застосування розвідувальних і розвідувально-ударних безпілотної комплексів у збройних конфліктах сучасності. Військово-науковий вісник. 2021. №35. – С. 252–267. <https://doi.org/10.33577/2313-5603.35.2021.252-267>.
4. Медведєв В. К., Коренівська І. С., Хажанець Ю. А., Салов А. О. Безпілотні літальні апарати та їхній вплив на перебіг російсько-української війни. Наука і оборона. 2023. № 2. С. 52-59. <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2023-22-2-52-59>.
5. Самойленко О. В., Богославець С. О., Хлоп'ячий В. А. Основні напрями розвитку безпілотної авіації збройних сил України. Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2022. Вип. 18(25). – С. 218–226. <https://doi.org/10.54858/dndia.2022-18-33>.
6. Коршець О., Горбенко В. Уроки застосування безпілотної літальних апаратів у російсько-українській війні. Повітряна міць України. 2023. Том 1, Вип. 4. С. 9-17. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2023-1-4-9-17>.
7. Gupta S. G., Ghonge M., Jawandhiya P. M. Review of unmanned aircraft system (UAS). SSRN Electronic Journal. 2013. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3451039> (date of access: 30.11.2023).
8. Unmanned aerial vehicles: a review / A. A. Laghari et al. Cognitive Robotics. 2022. Vol. 3. P. 8-22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004> (date of access: 30.11.2023).
9. Erdemli M. G. General use of UAS in EW environment--EW concepts and tactics for single or multiple UAS over the net-centric battlefield : thesis. 2009. URL: [http://edocs.nps.edu/npspubs/scholarly/theses/2009/Sep/09Sep\\_Erdemli.pdf](http://edocs.nps.edu/npspubs/scholarly/theses/2009/Sep/09Sep_Erdemli.pdf) (date of access: 30.11.2023).
10. James G. K. Unmanned aerial vehicles and special operations : future directions / : thesis. 2000. URL: <http://handle.dtic.mil/100.2/ADA386387> (date of access: 30.11.2023).
11. История развития дронов. URL: [https://dronomania.ru/faq/istoriya-razvitiya-dronov.html?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fdronomania.ru%2Ffaq%2Fistoriya-razvitiya-dronov.html](https://dronomania.ru/faq/istoriya-razvitiya-dronov.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fdronomania.ru%2Ffaq%2Fistoriya-razvitiya-dronov.html) (date of access: 30.11.2023).
12. Петушкова В. Б., Потапова С. О. История создания беспилотных летательных аппаратов. Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. №9. С. 713–717. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-sozdaniyabespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата звернення: 16.10.2023).
13. Dennis Larm. Expendable remotely piloted vehicles for strategic offensive airpower roles. 1996. Air University Press Maxwell Air Force Base, Alabama. – P.71.
14. Cargill R. Hall. Reconnaissance drones: their first use in the cold war. Air power history, 2014, Vol. 61, No. 3. P. 20–27. URL: <https://www.jstor.org/stable/26276490>.

15. Куатов Б. Ж., Макаев Т. З. История развития беспилотных летательных аппаратов. Труды Международного симпозиума “Надежность и качество”. 2017. т. 1. – С. 137–139.
16. Хакимов Д.В., Киселёв С.К. Историческое развитие и современное состояние комплексов бортового оборудования летательных аппаратов. Вестник УЛГТУ. 2017. №2 (78). – С 54–59. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoricheskoe-razvitiie-i-sovremennoe-sostoyanie-kompleksov-bortovogo-oborudovaniya-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 04.11.2023).
17. Хакимов Д. В., Киселёв С. К. Историческое развитие и современное состояние комплексов бортового оборудования летательных аппаратов (окончание). Вестник УЛГТУ. 2017. №3 (79). – С 42–50.
18. Головкина Л. В., Зайченко О. Б. Розподіл обчислювальних ресурсів в модульній авіоніці. Вісник Національного технічного університету “ХПІ” Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. 2019. № 1. – С. 7–20.
19. Парамонов П. П., Жаринов И. О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. №2 (84). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integrirovannye-bortovye-vychislitelnye-sistemy-obzor-sovremennogo-sostoyaniya-i-analiz-perspektiv-razvitiya-v-aviatsionnom> (дата звернення: 14.11.2023).
20. Thomas P. Ehrhard. Air Force UAVs the secret history. Mitchell Institute Press, Arlington, VA, 2010. p.85.
21. Pentagon about to pick systems for Replicator initiative. DefenseScoop. URL: <https://defensescoop.com/2023/11/21/pentagon-about-to-pick-systems-for-replicator-initiative> (date of access: 30.11.2023).
22. Government U. S., Department of Defense, Army U. S. 2009 - 2034 Unmanned Systems Integrated Roadmap - Unmanned Aircraft (UAS), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), UGV Ground Vehicles, UMS Maritime Systems, Drones, Technologies, Current and Future Programs. Independently Published, 2017.
23. Unmanned aerial vehicles: A review. Asif Ali Laghari, Awais Khan Jumani, Rashid Ali Laghari, Haque Nawaz. Cognitive Robotics. 2023, № 3 P. 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.corg.2022.12.004>.
24. Future Combat Air System: Owning the sky with the Next Generation Weapons System. 17 June 2020 Режим доступа: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-06-future-combat-air-system-owning-the-sky-with-the-next-generation-weapons> (date of access: 30.11.2023).
25. Henrich I. A brief guide: The Future Combat Air System. MTU AEROREPORT. URL: <https://aeroreport.de/en/good-to-know/a-brief-guide-the-future-combat-air-system> (date of access: 30.11.2023).
26. The latest adaptive cycle engine testing is a significant step forward. Air & Space Forces Magazine. URL: <https://www.airandspaceforces.com/the-latest-adaptive-cycle-engine-testing-is-a-significant-step-forward/> (date of access: 15.11.2023).
27. Солонин В. И., Палкин В. А. Программы США по разработке принципиально новых технологий для двигателей шестого поколения военной авиации (обзор). Авиационные двигатели. 2019. № 4(5). – С. 63–74.
28. Lane, J. (2007) Design Processes and Criteria for the X-51A Flight Vehicle Airframe. In UAV Design Processes / Design Criteria for Structures (pp. 1.7-1 – 1.7-14). Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-145, Paper 1.7. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. URL: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>.
29. Gelzer C. X-43A Hyper-X - NASA. NASA. URL: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/armstrong/x-43a/> (date of access: 30.11.2023).
30. UK Government clarifies British Tempest fighter jet role, Lisa West. UK defense journal. 05.2023. URL: <https://ukdefencejournal.org.uk/uk-government-clarifies-british-tempest-fighter-jet-role/>.
31. Current technologies and challenges of applying fuel cell hybrid propulsion systems in unmanned aerial vehicles / B. Wang et al. Progress in Aerospace Sciences. 2020. No. 116. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100620> (date of access: 30.11.2023).
32. Fuel cell system with sodium borohydride as hydrogen source for unmanned aerial vehicles / K.Kim et al. Journal of Power Sources. 2011. Vol. 196, no. 21. P. 9069–9075. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.038> (date of access: 30.11.2023).
33. A review of modelling and analysis of morphing wings / D. Li et al. Progress in Aerospace Sciences. 2018. Vol. 100. P. 46–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.06.002> (date of access: 30.11.2023).
34. Kudva J. N. Overview of the DARPA smart wing project. Journal of intelligent material systems and structures. 2004. Vol. 15, no. 4. P. 261–267. URL: <https://doi.org/10.1177/1045389x04042796> (date of access: 30.11.2023).
35. Morphing Wing Technologies within the Airgreen 2 Project / I. Dimino та ін. AIAA SCITECH 2022 Forum, м. San Diego, CA & Virtual. Reston, Virginia, 2022. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2022-0718> (дата звернення: 30.11.2023).
36. A Review of Morphing Aircraft / S. Barbarino та ін. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2011. Т. 22, № 9. – С. 823–877. URL: <https://doi.org/10.1177/1045389x11414084> (дата звернення: 30.11.2023).
37. Advanced Lattice Structures for Composite Airframes. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/265881> (date of access: 10.11.2023).
38. Kumar M., Cazaurang F., Cohen K. Multi-Rotor Platform Based UAV Systems. ISTE Press Limited - Elsevier Incorporated, 2020. – 300 с.
39. Gremlins. Defense Advanced Research Projects Agency. URL: <https://www.darpa.mil/program/gremlins> (date of access: 30.11.2023).
40. Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends / S. A. H. Mohsan et al. Intelligent Service Robotics. 2023. No. 16. P. 109–137. URL: <https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4> (date of access: 20.11.2023).

*Надійшла до редколегії 04.12.2023*

*Схвалена до друку 20.12.2023*

**Відомості про авторів:**

**Глушенко Павло Аркадійович**

доктор філософії  
старший науковий співробітник  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-8231-8877>

**Самойленко Олексій Валерійович**

кандидат технічних наук  
старший науковий співробітник  
начальник науково-дослідного відділу  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3088-3268>

**Жевтюк Олександр Анатолійович**

кандидат технічних наук  
старший науковий співробітник  
провідний науковий співробітник  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
м. Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-6337-4750>

**Радько Олег Віталійович**

кандидат технічних наук  
доцент  
професор кафедри авіації інституту авіації  
і протиповітряної оборони Національного університету  
оборони України,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

**Давиденко Віталій Миколайович**

науковий співробітник  
Державного науково-дослідного інституту авіації,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-7317-6694>

**Information about the authors:**

**Pavlo Hlushchenko**

Doctor of Philosophy  
Senior Researcher  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-8231-8877>

**Oleksiy Samoylenko**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Researcher  
Head of Research Department  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3088-3268>

**Oleksandr Zhevtiuk**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Researcher  
Leading Researcher  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-6337-4750>

**Oleg Radko**

Candidate of Technical Sciences  
Associate Professor  
Professor of the Department of Aviation  
(Institute of Aviation and Air Defence)  
of the National Defence University of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-6391-5713>

**Vitalij Davidenko**

Researcher Associate  
of State Research Institute of Aviation,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7317-6694>

**RETROSPECTIVE ANALYSIS AND DEVELOPMENT TRENDS OF UNMANNED AVIATION SYSTEM  
TAKING INTO ACCOUNT MODERN PROGRAMS FOR THEIR CREATION**

*P. Hlushchenko, O. Samoylenko, O. Zhevtiuk, O. Radko, V. Davidenko*

*When repelling the armed aggression of the Russian Federation, unmanned aerial systems (hereinafter - UAS) became one of the main means of armed confrontation. The paper defines the development trends of promising unmanned aircraft complexes based on a retrospective analysis of the features of the development of UAS and the prerequisites that stimulated their further development, the analysis of the experience of using UAS in the conditions of modern wars, and the analysis of modern technology development programs that can be applied in the creation of UAS. On the basis of a retrospective analysis of the development of UAS, it was determined that the main prerequisites for the emergence and development of UAS in the modern sense were large losses during combat operations of manned aircraft with their flight crews as a result of significant progress in air defense equipment, the development of radio-electronic systems, which ensured the possibility of creating an acceptable weight complex of on-board equipment. The main factors influencing the development of UAVs are significant progress in means of countering UAVs, the vulnerability of data transmission channels between an unmanned aerial vehicle (hereinafter - UAV) and a ground control and control station, insufficient data transmission speed; exponential growth of computing capabilities and development of artificial intelligence technologies; limited energy reserve and insufficient power of power sources on board the UAV; spread of concepts of network-centric wars, "smart weapons", asymmetric methods of warfare; reduction of weight and size indicators of target equipment and automatic control systems of UAVs; requirements for the cost, mass, speed and localization of UAS production, minimization of operating costs.*

*The main trends in the development of UAVs are the reduction in cost and simplification of their production, the integration of manned and unmanned aerial vehicles into single aviation complexes, the increase in the autonomy and "intellectualization" of UAVs by using the technical vision systems of UAVs, elements of artificial intelligence, increasing the integration of the glider and power plant of UAVs, the use of distributed power installations of UAVs, implementation of the concept of an adaptive wing, hybridization, electrification of UAVs, etc.*

*Keywords: unmanned aircraft system, on-board equipment complexes, critical technologies, composite materials, equations of existence.*