

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ОБРИСУ БЕЗПІЛОТНОГО АВІАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ КОНТЕЙНЕРНОГО СТАРТУ КЛАСУ «МІНІ»

Сьогодні в світі серійно випускають більше 570 безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) різних класів, серед них понад 30% становлять БпАК класу «міні» [1–2]. Основні тактико-технічні характеристики (ТТХ) БпАК цього класу: маса безпілотного літального апарата (БпЛА) – 1,2...10 кг, радіус дії – 10...25 км, тривалість польоту БпЛА – 1–3 год; крейсерська швидкість – 50...100 км/год. Ключові відмінності від інших класів БпАК: низька вартість виготовлення та експлуатації (вартість комплексу у складі трьох БпЛА – 60–120 тис. дол. США, у той час як середнього класу – більше 500 тис. дол. США); відносно короткий час розробки (2–12 місяців залежно від науково-технічної бази); мобільність (транспортування пішими групами); достатня точність та оперативність інформації для вирішення локальних задач різноманітного класу: розвідка, корегування вогню артилерії, аерофотозйомка, відеоспостереження, топографічна зйомка та ін.

Аналіз БпЛА, які входять до складу БпАК класу «міні» [1–3], показав, що найбільш часто використовуються дві схеми БпЛА: «літак» та «мультикоптер». Загальний аналіз основних ТТХ виконано в роботі [1], проте автор розглянув тільки військові БпЛА за схемою «літак». У роботі [3] проведено аналіз ТТХ обох схем. Визначено недоліки та переваги кожної з них.

Логічним розвитком комплексів класу «міні» стали БпАК з БпЛА контейнерного старту.

БпАК з БпЛА контейнерного старту сформований таким чином, що БпЛА та пусковий пристрій (ПуПр), розміщені в єдиному транспортному контейнері (ТрКн), та реалізується в двох варіантах [1–2]:

- БпЛА та ПуПр розміщені в ТрКн так, що БпЛА стартує безпосередньо з контейнера;
- ТрКн при старті слугує опорою, а БпЛА протягом декількох хвилин зводиться до крейсерської конфігурації.

З аналізу праць за темою проектування БпЛА класу «міні» [3–10] випливає:

- методики, що існують або пропонуються, не розглядають питання проектування БпЛА контейнерного старту;
- накопичено достатній статистичний матеріал щодо складових елементів і систем БпЛА, який може бути використано для

прогнозування габаритно-масових та енергетичних характеристик елементів або систем;

- не сформовано матрицю компоувальних ознак БпЛА контейнерного старту, яка дозволяє при визначенні компоувальної схеми БпЛА чітко описати основні компоувальні ознаки, характерні для об'єкта проектування, їхній взаємозв'язок. Це дозволяє автоматизувати процес формування загального обрису БпЛА та на ранніх стадіях проектування виключити неефективні конструктивні рішення (КР) [5].

**Мета статті** – формування загальної методики проектування БпЛА контейнерного старту та матриці компоувальних ознак.

Розробка концепту БпАК – процес прийняття базових проектно-конструкторських рішень на основі комплексного аналізу альтернатив (розглядаються можливі схемні варіанти нового комплексу, структура та склад його систем, основні показники інтегральних характеристик). У той же час проектування – ітераційний процес, що супроводжується постійною зміною кількості проектних параметрів за рахунок поступової деталізації та декомпозиції проектної задачі, що не дозволяє повністю формалізувати процедуру пошуку раціонального варіанта.

У цьому дослідженні виконується детальний аналіз та обґрунтування раціонального варіанта БпЛА, ПуПр та ТрКн в умовах, коли геометрія та внутрішній об'єм ТрКн є жорстким геометричним обмеженням, зміна якого не допускається умовами вирішення проектної задачі. У дослідженні не розглядається оптимізація параметрів бортового радіоелектронного обладнання та цільового навантаження, наземного пункту управління та каналів зв'язку.

На основі методів системного аналізу та проектування розроблено узагальнену методику формування раціонального обрису систем і підсистем БпАК контейнерного старту (БпЛА, ПуПр, ТрКн), схему якої наведено на рис.1. Реалізація методики проводиться у три етапи, суть яких пояснюється нижче.

*Етап 1.* На основі аналізу тактико-технічних вимог (ТТВ) шляхом аналізу реалізації схожих задач методом мозкового штурму формують перелік альтернативних КР (наприклад, за способом піднімальної сили). З урахуванням вибраних критеріїв ефективності розраховують числові значення ефективності можливих КР для вирішення даної задачі.

Визначення схеми реалізації аеродинамічного способу створення піднімальної сили залежить від тактико-технічних вимог до БпЛА і виконується комплексним методом [6], що забезпечує ефективне вирішення задачі оцінювання, впорядкування і вибору за рахунок комплексного використання різних методів кількісного і якісного оцінювання якості альтернативних варіантів. Цей підхід пропонується виконати алгоритмом, зображеним на рис. 2, в якому якісні параметри оцінюються експертним методом, а кількісні – на основі аналізу статистичних даних.

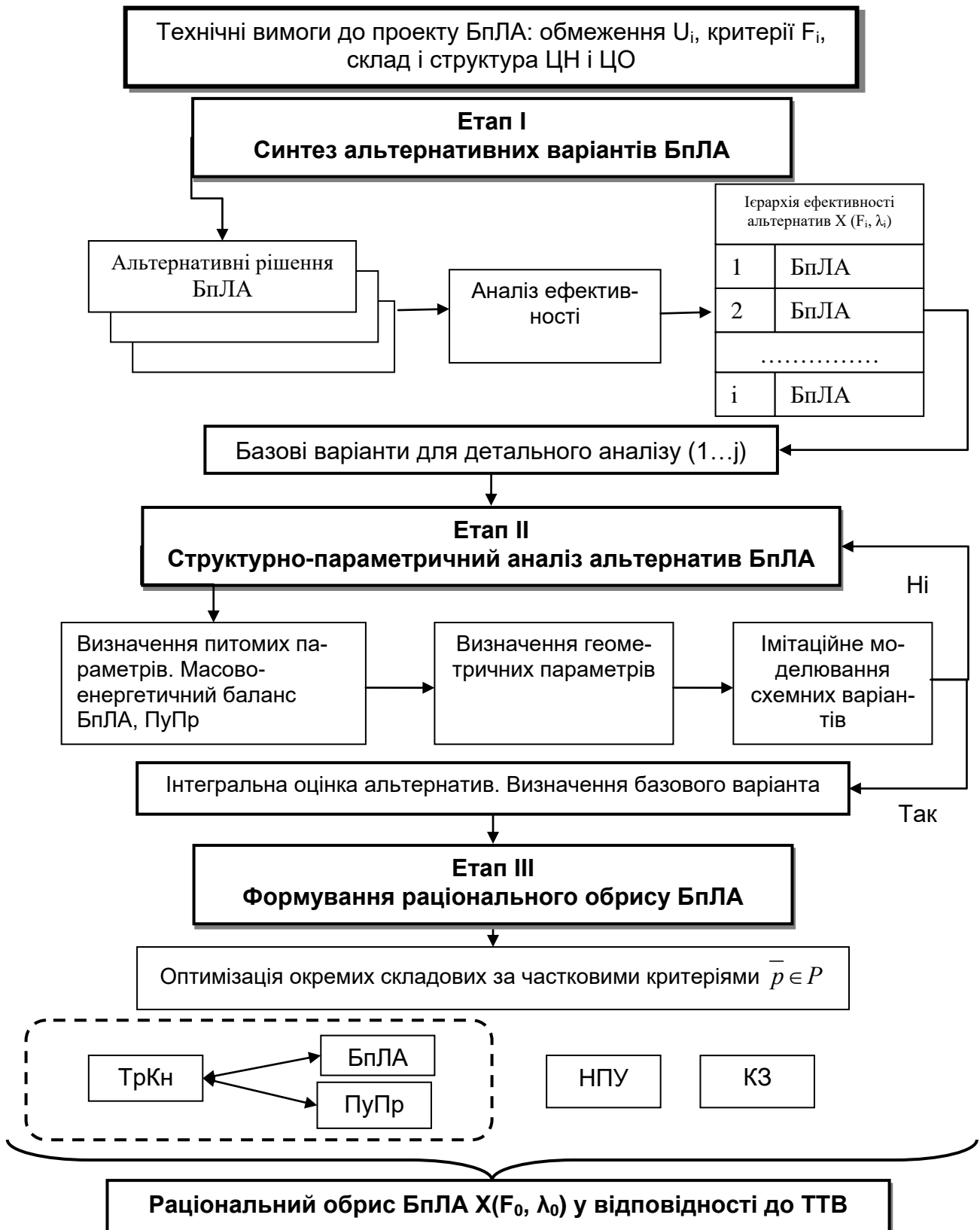


Рисунок 1 – Методика формування раціонального обрису БпЛА, ПуПр, ТрКн: ЦН – цільове навантаження; ЦО – цільове обладнання; НПУ – наземний пункт управління; ПуПр – пусковий пристрій; КЗ – канали зв'язку; ТрКн – транспортний контейнер

Кількісні критерії оцінювання БпЛА. На етапі вибору схеми БпЛА, оцінювання КР згідно з рекомендаціями [3–7] виконується з використанням транспортних і цільових критеріїв ефективності (табл. 1).

На основі проведеного експертного аналізу сучасних зразків БпЛА, науково-технічної літератури з використанням методів статистичного аналізу розраховано такі числові значення критеріїв (табл. 2).

Цільова ефективність оцінюється критерієм – вартістю виконання одного вильоту [8]:

$$C_e = C_{ЛА} / n_e = \overline{C_{ЛА}} \cdot m_0 / n_e$$

де  $\overline{C_{ЛА}}$  – відносна вартість одного кілограму планера БпЛА;  $n_e$  – кратність використання.

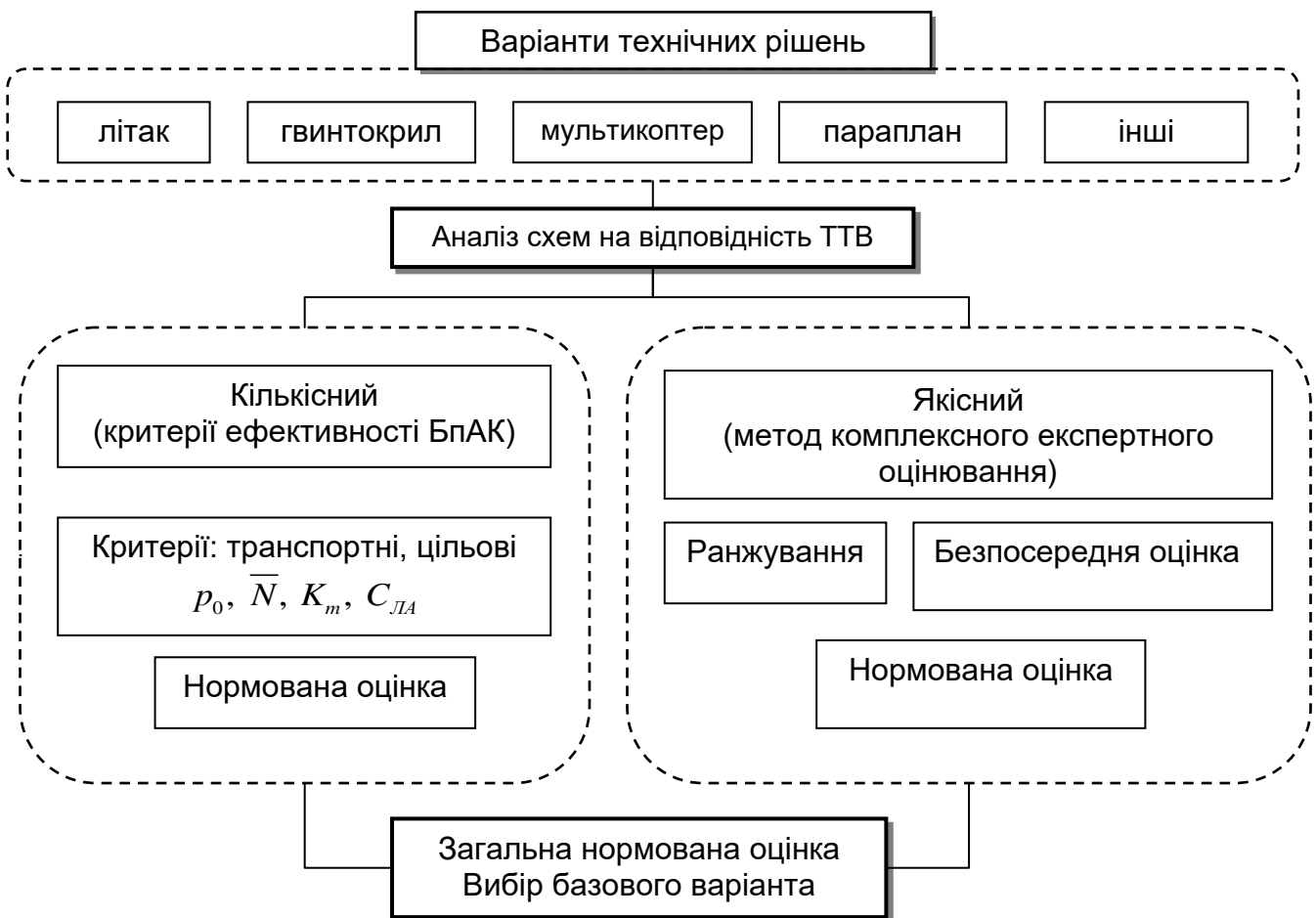


Рисунок 2 – Алгоритм аналізу схем створення піднімальної сили

Розрахунок сумарного критерію ефективності в числових значеннях пропонується виконувати таким чином:

- визначають числові значення критеріїв;
- визначають, які критерії ефективніші при максимальному значенні, які – при мінімальному;

- розраховують нормоване значення критерію при максимальному значенні;
- якщо критерій характеризується максимальним значенням, то змін у числовому значенні не виконують;
- якщо мінімальним – виконують перетворення:  $k_H = 1/k$ , де  $k_H$  – нормоване значення критерію;  $k$  – дійсне значення;
- серед отриманих величин визначають максимальне значення критерію і проводять нормування отриманих показників за виразом:  $t_{in} = t_i / t_{max}$ ;
- визначають загальну суму нормованих значень для кожної схеми:  $T_{cx} = \sum_{i=1}^I t_{in}$ .

Схема з максимальним значенням буде найліпшою за вибраними критеріями ефективності. Для врахування параметрів проектованої системи, які на даному етапі розробки не описуються числовим значенням, здійснюють експертне оцінювання, з врахуванням вербальних вимог до систем – тобто виконують якісне оцінювання.

Таблиця 1 – Критерії ефективності

Назва	Розрахунковий вираз	Пояснення
Транспортна ефективність	$K_m = \frac{\overline{m_{к.н}}}{V_{кр} \cdot t_{пол}}$	$t_{пол}$ – час польоту БПЛА, год $V_{кр}$ – крейсерська швидкість польоту
Коефіцієнт масової віддачі	$\overline{m_{к.н}} = m_{к.н} / m_0$	$m_0$ – максимальна злітна маса ЛА $m_{к.н}$ – маса корисного навантаження, кг.
Енергоозброєність ЛА $\overline{N_0}$ , Вт/кг	$\overline{N_0} = N_0 / m_0$	$N_0$ – потужність силової установи, Вт
Питоме навантаження на несучу поверхню ЛА $\rho_0$ , кг/м <sup>2</sup>	$\rho_0 = m_0 / S$	$S$ – площа крила, м <sup>2</sup>
Крейсерська аеродинамічна якість	$K_{кр}$	

Якісне оцінювання. Вибір критеріїв оцінювання залежить від вимог технічного завдання, призначення комплексу і т.д. Для БПЛА контейнерного старту автором сформовано якісні критерії, які найбільш повно описують специфіку БПЛА контейнерного старту, розраховано коефіцієнти вагомості кожного критерію. Результати обчислень наведено в табл. 3.

Таблиця 2 – Середні показники  $V_{кр}$  та  $K_{кр}$  для БПЛА класу «міні»

Схема/параметр	Літак	Мультикоптер	Автожир	Гнучке крило
$K_{кр}$	11	5,75	6,5	6,5
$V_{кр}$ , км/год	70	40	50	40
$t_{пол}$ , год	2	1	1,2	1,5
$\overline{m}_{ц.н}$	0,162	0,25	0,22	0,3
$\rho_0$ , кг / м <sup>2</sup>	8,6	2,37	1,275	2,8
$\overline{N}$ , Вт / кг min	131	315	280	155
$\overline{C}_{ЛА}$	0,6	1	0,8	0,5

Таблиця 3 – Якісні критерії оцінювання БПЛА

$A_j$	$k_j$	$r_j$	$t_j$	$b_j$
Відповідність ТТВ	1	1	0,895	0,167
Зменшення транспортних габаритів	2	3	0,717	0,133
Технічна складність	3	3	0,717	0,133
Надійність	4	3	0,717	0,133
Стійкість до вітрового навантаження	5	5	0,574	0,107
Ефективність	6	6	0,513	0,096
Модернізаційний потенціал	7	7	0,459	0,086
Стійкість до високих стартових прискорень	8	8,5	0,389	0,072
Кратність використання	9	8,5	0,389	0,072

*Етап 2.* Відповідно до розрахованої ієрархії ефективних КР вибирають найбільш ефективні та виконують поглиблений структурно-параметричний аналіз реалізації КР з врахуванням граничних обмежень.

На цьому етапі визначають масово-енергетичні взаємозалежності основних проектних параметрів, їх вплив на ефективність КР; формують загальну компоновку БПЛА з використанням матриці компоновальних ознак; на основі числових методів виконують оцінні розрахунки аеродинамічних і динамічних характеристик, параметрів міцності та жорсткості,

об'ємно-масове компонування об'єкта проектування (БпЛА, ПуПр, ТрКн); визначають загальну ефективність КР на основі прийнятих критеріїв ефективності. У результаті з можливих КР вибирають базовий варіант (див. рис. 1). Для проведення детального аналізу можливих варіантів КР доцільно виконати чіткий опис можливих компонувальних варіантів (ознак), залишити тільки ті, які найбільш повно відповідають ТТВ. Наприклад: для схеми «літак» – це розміщення крила, двигуна; для схеми «мультикоптер» – кількість гвинтів, розміщення відсіку цільового навантаження і т. д.

Принцип формування матриці компонувальних ознак (МаКО) для БпЛА схеми «літак», ПуПр та ТрКн наведено в табл. 4–5. Розроблена МаКО формалізовано описує основні компонувальні рішення БпЛА, ТрКн, ПуПр і дозволяє чітко визначити вербальну характеристику об'єкта проектування. Для спрощення виведення алгоритмів та автоматизації вибору схемних варіантів використано систему буквено-цифрового позначення компонувальних ознак.

Таблиця 4 – Фрагмент матриці компонувальних ознак БпЛА класу «міні» схеми «літак»

Загальне компонування А01					
Схема балансування	ЛК	Класична	Качка	Триповерхньова	Тандем
Індекс А01-1	А01-11	А01-12	А01-13	А01-14	А01-15
Розташування крила	Низькоплан	Верхньоплан	Середньоплан	Поєднання у випадку поліплану	Біплан
Індекс А01-2	А01-21	А01-22	А01-23	А01-24	А01-25
Характер поздовжньої стійкості	Нестійка	Нейтральна	Стойка	Підвищеної стійкості	
Індекс А01-3	А01-31	А01-32	А01-33	А01-34	
.....					
Схема трансформації (складання) елементів планера А10					
Вид трансформації	Ручна	Автоматична	Змішана		
Індекс А10-1	А10-11	А10-12	А10-13		

МаКО, яка описує ТрКн та ПуПр, зведена в єдину таблицю, оскільки їхні характеристики взаємозв'язані: внутрішній об'єм ТрКн впливає на розміри та тип ПуПр (див. табл. 5).

На основі матриці компонувальних ознак формують вербальний опис компонування БпЛА, ТрКн, ПуПр, які далі використовуються в блоках визначення геометричних, масових та енергетичних параметрів.

Приклад опису раціонального варіанта компонування БпЛА:

$Pr_{Б01} = (A01-15, A01-24, A01-33, A01-43, A01-52, A01-11, A02-22, A03-11, A03-21, A03-31, A04-12, A04-22, A04-33, A04-43, A04-52, A04-63,$

A06-11, A06-22, A06-31, A07-11, A07-23, A08-11, A09-11, A10-12, A10-22, що еквівалентно такому вербальному опису компоновання: балансувальна схема тандем змішаного розташування крил по вертикалі фюзеляжу, нейтральної поздовжньої стійкості, з вертикальним оперенням без шасі, цільове навантаження, інтегроване у фюзеляж з розміщенням в центральній частині, силова установка – один електричний двигун, розміщений у носовій частині фюзеляжу, крило трапецеподібне з поворотними консолями високого видовження без злітно-посадочної механізації, напливи у кореневій частині крила відсутні, аеродинамічні поверхні – флаперони; ВО у хвостовій частині фюзеляжу є суцільно поворотним без РН, фюзеляж однобалочний прямокутного перерізу; схема посадки – на корпус, трансформація елементів планера автоматична без порушення зв'язку. При визначенні враховують також взаємовиключні параметри, наприклад: літаюче крило – відсутність ГО.

Таблиця 5 – Фрагмент матриці компоновальних ознак ТрКн та ПуПр

ПуПр В01							
Тип ПуПр	Механічний на енергії піднятого вантажу	Механічний на пружних та еластичних елементах	Механічний інерційний	Пневматичний	Пневмогідравлічний	Гідрравлічний	Реактивний
Індекс В01-11	В01-11	В01-12	В01-13	В01-14	В01-15	В01-16	В01-17
Розташування ПуПр	У корпусі ТрКн	Окремий елемент					
Індекс В01-2	В01-21	В01-22					
.....							
ТрКн В02							
Конструкція	Інтегральна з ПуПр	Окремий елемент					
Індекс В02-2	В02-21	В02-22	В02-23	В02-24			

*Етап 3.* На попередніх етапах вирішувалась задача звуження області пошуку ефективних КР. Для базового варіанта методами багаток-



критеріальної оптимізації розраховують оптимальні проектні параметри елементів БпАК, що зводиться до вирішення однієї з задач:

а) пошук оптимального за вибраним критерієм  $F$  розв'язку:

$$\bar{p} = \arg \min F(p), \bar{p} \in P,$$

де  $F(p)$  – цільова функція, що залежить від вектора проектних параметрів  $\bar{p}$ ;

$\bar{p} = (p_1, p_2, \dots, p_k)^T$  – вектор проектних параметрів розмірності  $k$ ;

$P$  – множина допустимих проектних параметрів БпАК;

б) пошук оптимального головного критерію  $F_1$  рішення  $\bar{p}$  за умови, що інші критерії стають обмеженнями (багатокритеріальна задача):

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{p} = \arg \min F_1(p), \\ \bar{p} \in P, \\ F_i \geq F_i^*, \\ i \in (2, k), \\ F_2 \geq F_2^*, F_3 \geq F_3^*, \dots, F_k \geq F_k^*; \end{array} \right.$$

в) пошук області допустимих проектних рішень  $P^* \subset P$ , де всі критерії  $F_1, F_2, \dots, F_k$  мають значення не гірше заданих.

Задача параметричного синтезу полягає у формуванні такого вектора основних проектних параметрів, при якому досягається мінімальне значення проектного критерію в умовах жорстких обмежень: геометричних, енергетичних і фінансових:

$$\bar{p} = \arg \min \left\{ M = F(p) \left. \begin{array}{l} a \in (a_{min}, a_{max}) \\ b \in (b_{min}, b_{max}) \\ h \in (h_{min}, h_{max}) \\ \bar{N} \in (\bar{N}_{min}, \bar{N}_{max}) \\ C \in (C_{min}, C_{max}) \end{array} \right\}, \right.$$

де  $M = F(p)$  – вектор проектних критеріїв;

$a \in (a_{min}, a_{max})$ ,  $b \in (b_{min}, b_{max})$ ,  $h \in (h_{min}, h_{max})$  – допустимі діапазони геометричних параметрів;

$\bar{N} \in (\bar{N}_{min}, \bar{N}_{max})$  – допустимі діапазони енергетичних параметрів;  
 $C \in (C_{min}, C_{max})$  – допустимі діапазони вартості.



Рисунок 3 – Прототип БПЛА «Сокіл-2»

**Висновок.** За результатами проведених досліджень:

- сформовано загальну методику формування раціонального обрису БПЛА контейнерного старту, ПуПр та ТрКн;
- розроблено алгоритм аналізу ефективності схем створення піднімальної сили;
- для формування обрису елементів комплексу розроблено матрицю компонувальних ознак, яка узагальнює відомі конструкторсько-технічні рішення БПЛА, ПуПр та ТрКн, характерних для БПАК контейнерного старту класу «міні»;
- розроблений підхід дозволяє обґрунтовано вибирати схему БПЛА контейнерного старту та його основних елементів, формує альтернативні КТР рішення БПЛА, ПуПр та ТрКн.

Метод апробовано при розробленні БПЛА контейнерного старту «Сокіл-2», що дозволило в стислі терміни (3 місяці) сформувавши раціональний обрис елементів комплексу.

### Перелік використаних джерел

1. Військові безпілотні авіаційні комплекси класу "mini" в збройних силах іноземних держав / Є.І. Жилін, О.П. Колодій, А.С. Риб'як, та ін. / Системи озброєння і військова техніка. – 2011. – № 1(25). – С.14–20.
2. Unmanned Vehicles (Including Aerostats) Large Procurement Opportunity Thought Leadership Series August, 2011 [Electronic resource]/ – Mode of access: World Wide Web: [http://aviotech.com/pdf/AviotechThought\\_Leadership\\_Series\\_UAVs\\_August\\_2011.pdf](http://aviotech.com/pdf/AviotechThought_Leadership_Series_UAVs_August_2011.pdf) (viewed on June 17, 2016). – Title from the screen.

3. Збруцький О.В. Безпілотні літальні апарати контейнерного стар-ту: сучасний стан і напрямки досліджень / О.В. Збруцький, О.М. Масько, В.В. Сухов // – Вісник Нац. техн. ун-ту України «КПІ». Сер. Машинобудування. – 2012. – № 62. – С. 63 – 66.

4. Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик / В.М. Ильюшко, М.М. Митрахович, А.В. Самков и др.; под общ. ред. В.И. Силкова. – Киев: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. – 302 с.

5. Егер С.М. Основы автоматизированного проектирования самолетов / С.М. Егер, Н.К. Лисейцев, О.С. Самойлович. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.

6. Лисецкий Ю. М. Метод комплексной экспертной оценки для проектирования сложных технических систем / Ю. М. Лисецкий // Математичні машини і системи. – 2006. – № 2 – С.141 – 146.

7. Анализ и выбор комбинированной схемы скоростного беспилотного летательного аппарата / А.Г. Гребенников, В.В. Парфенюк, О.И. Парфенюк, С.В. Удовиченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2010. – Вып. 48. – С.51 – 63.

8. Клочков В.В. Методы прогнозирования спроса на беспилотные летательные аппараты и работы по воздушному патрулированию / В.В. Клочков, А.К. Никитова. // Проблемы прогнозирования. – 2007. – № 6. – С. 144 – 151.

9. Бетин А.В. Критерии оценки эксплуатационной технологичности беспилотных воздушных судов / А.В. Бетин, В.А. Тутубалин, Н.В. Бондарева // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 1. – С. 26 – 35.

10. Формирование облика многофункционального беспилотного авиационного комплекса гражданского назначения / В.Д. Белый, А.К. Мялица, А.Г. Гребеников и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2001. – Вып. 9. – С. 3 – 16.

*Поступила до редакції 04.10.2016 р.  
Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.В. Лупкін  
Національний аерокосмічний університет  
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків*