

УДК 623.4.018



І. Є. Ряполов



А. В. Тристан

МЕТОД ВИБОРУ ФОРМИ І МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЇХ ПОТРІБНОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ПОМІТНОСТІ

У статті запропонований метод вибору форми і матеріалів елементів конструкції безпілотних літальних апаратів, який дозволяє вибирати їх потрібну радіолокаційну помітність на етапі проєктування нових та модернізації існуючих безпілотних літальних апаратів. Метод заснований на послідовному оцінюванні радіолокаційної помітності окремих елементів їх конструкції для різних форм і матеріалів та виборі такого елемента конструкції, ефективна поверхня розсіювання якого задовольняє вимоги до поставленого завдання.

Застосування цього методу передбачає використання інтегральних представлень, отриманих за допомогою леми Лоренца та рівняння Поклінгтона. У статті наведена блок-схема алгоритму розробленого методу.

К л ю ч о в і с л о в а: безпілотний літальний апарат, високочастотний метод, діелектрична оболонка, ефективна поверхня розсіювання, рівняння Поклінгтона, характеристики вторинного випромінювання.

Постановка проблеми. Безпілотні літальні апарати (БпЛА) в ході російсько-українській війні стали одним із вирішальних факторів, що кардинально змінив стратегію і тактику ведення бойових дій. Вони перетворили конфлікт на «безпілотну війну», де боротьба за інформаційну перевагу та контроль над повітряним простором виходить на перший план.

Серед завдань, які покладаються на підрозділи, що озброєні БпЛА є: забезпечення в реальному часі даними про позиції та переміщення ворога; коригування вогню та формування єдиного розвідувально-бойового простору; завдання високоточних ударів по техніці, укріпленнях та живій силі противника. Запорукою успішного виконання таких завдань є прихованість дій від засобів розвідки противника. Одним з демаскуючих ознак для радіолокаційних засобів противника є радіолокаційна помітність (РЛП) БпЛА. Тому пошук шляхів щодо зниження рівня РЛП БпЛА є актуальним науковим завданням

Крім того, БпЛА активно застосовуються як альтернатива штатним засобам протиповітряної оборони у протидії малопомітним тихохідним БпЛА противника. Радіолокаційне супроводження БпЛА перехоплювачів є одним з поширених способів їх наведення на БпЛА противника. Але компактні габарити переважної кількості БпЛА перехоплювачів з використанням радіопрозорих матеріалів призводять до їх низької РЛП. Підвищення стійкості супроводження можливо досягти завдяки збільшенню ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) БпЛА перехоплювача до певного рівня.

Збільшення РЛП БпЛА також корисне при їх використанні як імітаторів інших літальних апаратів для введення противника в оману щодо тактики дій наших військ та як повітряних мішеней для підготовки льотних екіпажів винищувальної авіації і бойових обслуг зенітних ракетних військ.

Отже, формування потрібної радіолокаційної помітності БпЛА є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. До найбільш ефективних методів формування потрібної РЛП відносять:

- оптимізацію геометрії поверхні;
- застосування радіопоглинаючих матеріалів і покриттів;
- застосування пасивних відбивачів, які дозволяють збільшувати ЕПР радіолокаційного об'єкта (РЛО);
- управління вторинним випромінюванням [1].

Оптимізація геометрії поверхні РЛО дозволяє змінювати РЛП всього об'єкта. Для цього для

зменшення РЛП необхідно вибирати елементи конструкції БпЛА з найменшим значенням ЕПР, а для збільшення РЛП – з найбільшим його значенням.

Крім того, суттєвого підвищення значень ЕПР БпЛА можливо досягти завдяки використанню в конструкції БпЛА пасивних відбивачів, як-от: тригранних кутових відбивачів або їх групи [2–5], лінзи Люнеберга [2, 3], а також решітки Ван Атта [6].

Зниження вторинного випромінювання елементів поверхні РЛО до потрібного рівня також можливе шляхом застосування радіопоглинаючих матеріалів і покриттів [1, 2].

Перспективним напрямом є формування потрібної РЛП завдяки керуванню розсіюванням електромагнітних хвиль, яке поділяють на активне і пасивне.

До активних методів управління розсіюванням електромагнітних хвиль відносять створення випромінювання, амплітуду і фазу якого підлаштовують таким чином, щоб компенсувати, у випадку зниження РЛП та підсилення у випадку збільшення РЛП, розсіяний від об'єкта у бік радіолокаційної станції сигнал. Пасивні методи управління розсіюванням електромагнітних хвиль можливо застосовувати лише для зниження РЛП. До цих методів слід віднести використання бінарних покриттів, модульованих імпедансних структур і анізотропних покриттів з керованою поляризаційною матрицею розсіювання [1, 7].

Отже, наявні методи формування потрібної РЛП дають можливість вибору того чи іншого заходу з метою зміни рівня вторинного випромінювання РЛО.

Характерними для радіолокації БпЛА є ситуації, коли розміри розсіювача значно більші за довжину хвилі зондування. Тому, з огляду на співвідношення довжини хвилі зондувального сигналу і геометричні розміри літального апарата, особливо цікавими є методи розрахунку характеристик розсіювання саме для квазіоптичної області [8–15]. Зазначені методи дозволяють оцінювати характеристики вторинного випромінювання БпЛА з достатньою точністю, яка підтверджується збігом результатів дослідження з експериментальними даними та з результатами розрахунку, що отримані за допомогою сертифікованих програмних продуктів обчислення [9, 16]. Однак застосування цих методів з метою вибору форми і матеріалів елементів конструкції БпЛА для формування їх потрібної радіолокаційної помітності на етапі модернізації існуючих та проектуванні нових БпЛА у відомій науковій літературі відсутне.

Метою статті є розроблення методу вибору форми і матеріалів елементів конструкції безпілотних літальних апаратів для формування їх потрібної радіолокаційної помітності.

Виклад основного матеріалу. Метод вибору форми і матеріалів елементів конструкції БпЛА для формування їх потрібної РЛП передбачає оптимізацію геометрії його поверхні. Виходячи з цього, першим етапом формування потрібної РЛП таких складних об'єктів, як БпЛА, є розрахунок їх характеристик вторинного випромінювання (ХВВ).

Другим етапом є вибір показників та критеріїв для формування потрібної РЛП і розв'язування задачі відповідно до їх вибору. Для такої постановки задачі за показник РЛП доцільно взяти ЕПР, а за критерій – потрібне (мінімальне / максимальне) значення ЕПР конструкції БпЛА.

Для розрахунку ЕПР БпЛА скористаємось виразом [1, 3, 9–10]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{p}^{\text{нр}} \cdot \vec{E}^{\text{нр}}(R\vec{r}^0)|^2}{\vec{p} \cdot \vec{E}(\vec{R}^0)}, \quad (1)$$

де $\vec{E}(\vec{R}^0)$ – вектор напруженості електричного поля плоскої електромагнітної хвилі, що поширюється у напрямку орта \vec{R}^0 ;

$\vec{E}^{\text{нр}}(R\vec{r}^0)$ – вектор напруженості електричного поля електромагнітної хвилі, розсіяної об'єктом в напрямку орта \vec{r}^0 і прийнятої радіолокаційною станцією, що розташована на відстані R від досліджуваного об'єкта;

$\vec{p}^{\text{нр}}$, \vec{p} – орти поляризації відповідно приймальної і передавальної антен.

Аеродинамічні об'єкти озброєння та військової техніки є об'єктами складної форми, що, як у випадку БпЛА, мають багаточарові діелектричні оболонки і деталі, повністю або частково виконані з діелектрика. Розміри БпЛА зазвичай набагато більші за довжину хвилі зондування, як і радіуси кривизни гладких ділянок поверхні. При цьому необхідно враховувати електродинамічну взаємодію багаточарової діелектричної оболонки фюзеляжу з внутрішнім обладнанням і агрегатами, між них і тонкими проводами, що прокладені всередині діелектричного крила.

Здебільшого планер БпЛА має змішану конструкцію різної геометричної форми. Центральна

частина крила (центроплан) і хвостові балки виготовлені зазвичай з металу, інші частини можуть бути виготовлені як з металу, так і з діелектричних матеріалів. Приклад моделі БПЛА зображений на рис. 1.

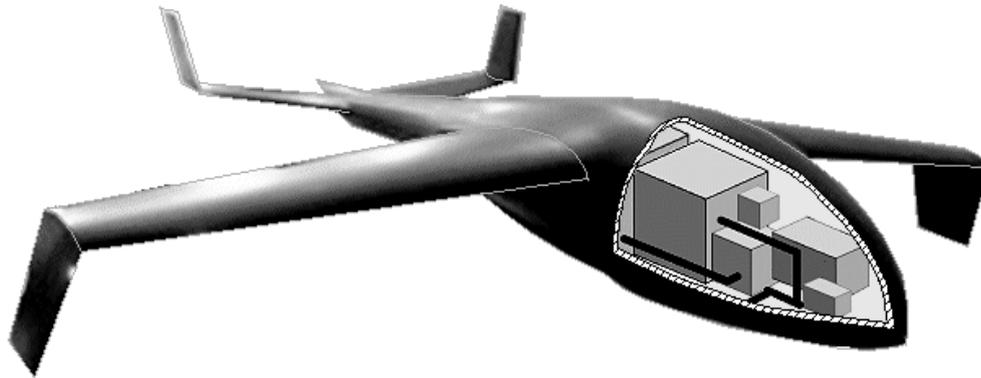


Рисунок 1 – Модель БПЛА

У середній частині фюзеляжу знаходиться обладнання (бортове і цільове), яке може бути змодельоване металевими (ідеально провідними) ящиками різної форми. Основними розсіюючими елементами фюзеляжу БПЛА є ідеально провідні об'ємні об'єкти, що знаходяться під діелектричною оболонкою [9–10].

Аналіз конструкції моделі БПЛА (рис. 1) дозволив виявити фактори, що можуть впливати на рівень його РЛП, а саме:

- переріз фюзеляжу;
- форма, спосіб побудови та матеріал поверхні фюзеляжу;
- форма, спосіб побудови та матеріал поверхні крила;
- форма, спосіб побудови та матеріал поверхні обтічника для пристрою управління аеродинамічними поверхнями;
- форма прокладання електричних проводів всередині діелектричної оболонки;
- використання в конструкції БПЛА додаткового корисного навантаження у вигляді таких відбивачів: тригранного кутового відбивача або їх групи [2–5], лінзи Люнеберга [2–3], решітки Ван Атта [6].

Відповідно до монографії [9] розрахунок характеристик розсіювання РЛО складної форми за допомогою теоретичних методів включає:

- побудову математичної моделі поверхні досліджуваного об'єкта;
- вибір методів розрахунку залежно від параметрів математичної моделі поверхні;
- розрахунок ХВВ (ефективної поверхні розсіювання, діаграми зворотного вторинного випромінювання та ін.).

Скористаємося способом моделювання як діелектричних, так і ідеально провідних ділянок поверхні фюзеляжу. Методика апроксимації такої поверхні була запропонована у працях [9, 17].

Усі розсіюючі елементи металеві поверхні об'єкта поділяються на дві групи: гладка частина поверхні та крайкові ідеально провідні локальні ділянки розсіювання.

Гладка частина поверхні апроксимується ділянками тривісних еліпсоїдів. Кількість використовуваних еліпсоїдів для кожного досліджуваного об'єкта вибирається індивідуально залежно від складності поверхні об'єкта і необхідного ступеня деталізації, що визначається довжиною хвилі зондуючого сигналу при математичному моделюванні ХВВ РЛО.

Крайкові локальні ділянки досліджуваних об'єктів моделюються за допомогою опису лінії зламу поверхні. Передбачається, що лінія зламу поверхні – ділянка плоскої кривої. За такої умови ребро криволінійного зламу апроксимується ділянкою еліпса, а ребро прямолінійного зламу – відрізком прямої. Крім того, тонкий провід, що прокладений всередині діелектричної оболонки (крила БПЛА), являє собою також плоску криву.

У реалізації методу, що розробляється, пропонується застосовувати такі методи розрахунку ХВВ конструкції БПЛА:

– розрахунок характеристик розсіювання складних повітряних радіолокаційних об'єктів, а саме: метод розрахунку характеристик розсіювання гладкою поверхнею складного повітряного радіолокаційного об'єкта та метод розрахунку характеристик розсіювання крайковими локальними ділянками поверхні складного повітряного радіолокаційного об'єкта [14, 15];

– розрахунок вторинного випромінювання БпЛА, виконаних із застосуванням композиційних матеріалів, який враховує електродинамічну взаємодію елементів їх конструкції [10, 13, 15];

– розрахунок вторинного випромінювання діелектричних (одношарових і багатошарових) елементів конструкції БпЛА [10, 14];

– розрахунок характеристик розсіювання дзеркальної антени, що знаходиться під радіопрозорим обтічником, який враховує відбиття між апертурою антени та обтічником [10, 12];

– розрахунок характеристик вторинного випромінювання тонких провідників, що знаходяться під діелектричною оболонкою [10, 18–20].

Отже, для реалізації методу вибору форми і матеріалів елементів конструкції БпЛА для формування їх потрібної РЛП необхідно:

– провести формування вихідних даних;

– визначити вимоги до моделі конструкції БпЛА з потрібною РЛП;

– провести математичне моделювання моделі поверхні БпЛА;

– провести декомпозицію конструкції БпЛА на окремі елементи;

– визначити ЕПР кожного елемента конструкції;

– провести заходи щодо зміни форми, матеріалів та способу побудови елементів конструкції БпЛА з метою отримання його потрібною РЛП; в окремих випадках для збільшення РЛП БпЛА додатково можна використовувати як корисне навантаження відбивачі;

– провести формування моделі конструкції БпЛА з урахуванням вибраних елементів конструкції;

– провести оцінювання ХВВ вибраної моделі конструкції БпЛА та, якщо вимоги до конструкції БпЛА з потрібною РЛП виконані, вважати, що завдання виконане, а якщо вимоги не виконані – провести аналіз та корегування вимог щодо цієї конструкції; провести повторне формування конструкції БпЛА; оцінити його ХВВ.

Для реалізації методу вибору форми і матеріалів елементів конструкції БпЛА з метою формування потрібною РЛП розроблений алгоритм, наведений на рис. 2.

Вихідними даними алгоритму (блок 1) є:

– частота опромінення;

– поляризація зондувальної електромагнітної хвилі;

– кутове положення об'єкта дослідження відносно радіолокаційної станції.

У блоці 2 здійснюється визначення вимог до моделі конструкції БпЛА з потрібною РЛП. До цього слід віднести:

– призначення та льотно-технічні характеристики, які мають бути у БпЛА, конструкція якого розробляється;

– аеродинамічну компоновку;

– вагові, габаритні та міцнісні характеристики;

– схему та опис складових елементів конструкції;

– специфікацію матеріалів і компонентів розміщення внутрішнього обладнання з урахуванням кількості тонких провідів, що знаходяться всередині крила;

– вартісні характеристики;

– критерій радіолокаційної помітності.

У блоках 3.1–3.9, враховуючи визначений критерій РЛП, вибирається форма, матеріал та спосіб побудови елементів конструкції БпЛА. Для кожного з цих блоків вибираються варіанти параметрів конструкційного елемента БпЛА, проводиться розрахунок ЕПР j -го варіанта цих параметрів та вибирається той варіант параметра, який є найсприятливішим за вибраним критерієм. Алгоритм вибору варіанта параметра конструкційного елемента БпЛА за вибраним критерієм наведений на рис. 3.



Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму реалізації методу вибору форми і матеріалів елементів конструкції БПЛА для формування їх потрібної РЛП

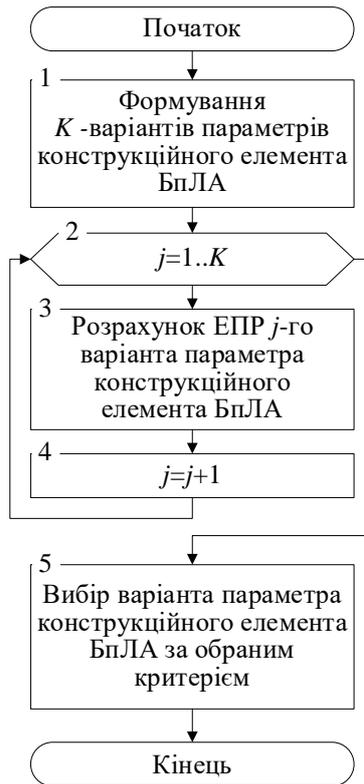


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму вибору варіанта параметра конструкційного елемента БпЛА за вибраним критерієм

У блоці 3.1 (рис. 2) елементом конструкції є перетин ідеально провідного фіюзеляжу довжиною один метр, а параметрами, при яких оцінюється його РЛП, є радіус закруглення гострих крайок перетину фіюзеляжу $\rho_{пф}$, показник, що характеризує форму перетину фіюзеляжу $\phi_{пф}$, показник, що характеризує розмір перетину фіюзеляжу $\kappa_{пф}$.

Функціональна залежність ЕПР цього елемента, що розраховується відповідно до методу, викладеному у працях [10, 15], матиме такий вигляд:

$$\sigma = f_1(\rho_{пф}, \phi_{пф}, \kappa_{пф}), \quad (2)$$

де $\rho_{пф}$ – радіус закруглення гострих крайок перетину фіюзеляжу;
 $\phi_{пф}$ – показник, що характеризує форму перетину фіюзеляжу;
 $\kappa_{пф}$ – показник, що характеризує розмір перетину фіюзеляжу.

У блоці 3.2 елементом конструкції є ідеально провідна поверхня фіюзеляжу, а параметрами – форма поверхні фіюзеляжу $\phi_{ф}$ та її розмір $\kappa_{ф}$. Функціональна залежність ЕПР цього елемента, що розраховується відповідно до методу, викладеному у працях [10, 13, 15], матиме такий вигляд:

$$\sigma = f_2(\phi_{ф}, \kappa_{ф}), \quad (3)$$

де $\phi_{ф}$ – показник, що характеризує форму поверхні фіюзеляжу;
 $\kappa_{ф}$ – показник, що характеризує розмір поверхні фіюзеляжу.

У блоці 3.3 елементом конструкції є фіюзеляж, а параметрами – матеріал, що характеризується його діелектричною $\epsilon_{ф}$ та магнітною $\mu_{ф}$ проникністю, товщина $\delta_{ф}$ фіюзеляжу та спосіб побудови, що характеризується кількістю шарів $n_{ф}$ фіюзеляжу. Функціональна залежність ЕПР цього елемента, що розраховується відповідно до методу, викладеному у працях [10, 14, 15], матиме такий вигляд:

$$\sigma = f_3(\epsilon_{ф}, \mu_{ф}, \delta_{ф}, n_{ф}), \quad (4)$$

де ε_{ϕ} – діелектрична проникність i -го шару фізеляжу;
 μ_{ϕ} – магнітна проникність i -го шару фізеляжу;
 δ_{ϕ} – товщина i -го шару фізеляжу;
 n_{ϕ} – кількість шарів фізеляжу.

У блоці 3.4 елементом конструкції є крило, а параметрами – форма поверхні крила $\phi_{кр}$ та її розмір $\kappa_{кр}$. Функціональна залежність ЕПР цього елемента, що розраховується відповідно до методу, викладеному у працях [10, 15], матиме такий вигляд:

$$\sigma = f_4(\phi_{кр}, \kappa_{кр}), \quad (5)$$

де $\phi_{кр}$ – показник, що характеризує форму поверхні крила;
 $\kappa_{кр}$ – показник, що характеризує розмір поверхні крила.

У блоці 3.5 елементом конструкції є крило, а параметрами – матеріал, що характеризується його діелектричною $\varepsilon_{кр}$ та магнітною $\mu_{кр}$ проникністю, а також товщина крила $\delta_{кр}$ та спосіб побудови, що характеризується кількістю шарів крила $n_{кр}$. Функціональна залежність ЕПР цього елемента, що розраховується відповідно до методу, викладеному у працях [10, 14, 15], матиме такий вигляд:

$$\sigma = f_5(\varepsilon_{кр}, \mu_{кр}, \delta_{кр}, n_{кр}), \quad (6)$$

де $\varepsilon_{кр}$ – діелектрична проникність i -го шару крила;
 $\mu_{кр}$ – магнітна проникність i -го шару крила;
 $\delta_{кр}$ – товщина i -го шару крила;
 $n_{кр}$ – кількість шарів крила.

У блоці 3.6 елементом конструкції є поверхня обтічника для пристрою управління аеродинамічними поверхнями, а параметрами – форма поверхні $\phi_{обт}$ та розмір $\kappa_{обт}$ поверхні обтічника для пристрою управління аеродинамічними поверхнями. Функціональна залежність ЕПР цього елемента, що розраховується відповідно до методу, викладеному у працях [10, 15], матиме такий вигляд:

$$\sigma = f_6(\phi_{обт}, \kappa_{обт}), \quad (7)$$

де $\phi_{обт}$ – показник, що характеризує форму поверхні обтічника для пристрою управління аеродинамічними поверхнями;
 $\kappa_{обт}$ – показник, що характеризує розмір поверхні обтічника для пристрою управління аеродинамічними поверхнями.

У блоці 3.7 елементом конструкції є обтічник для пристрою управління аеродинамічними поверхнями (ОПУАП), а параметрами – матеріал, що характеризується його діелектричною $\varepsilon_{обт}$ та магнітною $\mu_{обт}$ проникністю, товщина ОПУАП $\delta_{обт}$ та спосіб побудови, що характеризується кількістю шарів ОПУАП $n_{обт}$. Функціональна залежність ЕПР цього елемента, що розраховується відповідно до методу, викладеному у працях [10, 14, 15], матиме такий вигляд:

$$\sigma = f_7(\varepsilon_{обт}, \mu_{обт}, \delta_{обт}, n_{обт}), \quad (8)$$

де $\varepsilon_{обт}$ – діелектрична проникність i -го шару ОПУАП;
 $\mu_{обт}$ – магнітна проникність i -го шару ОПУАП;
 $\delta_{обт}$ – товщина i -го шару ОПУАП;
 $n_{обт}$ – кількість шарів ОПУАП.

У блоці 3.8 елементом конструкції є електричний провід (ЕП) всередині діелектричної оболонки, а параметрами – діаметр $d_{пр}$, розмір $l_{пр}$, форма прокладання $\phi_{пр}$, кількість $n_{пр}$ та відстань між ЕП $\tau_{пр}$. Функціональна залежність ЕПР цього елемента, що розраховується відповідно до методу, викладеному у працях [10, 15, 18–20], матиме такий вигляд:

$$\sigma = f_8(d_{\text{пр}}, l_{\text{пр}}, \phi_{\text{пр}}, n_{\text{пр}}, \tau_{\text{пр}}), \quad (9)$$

де $d_{\text{пр}}$ – діаметр i -го ЕП;
 $l_{\text{пр}}$ – розмір i -го ЕП;
 $\phi_{\text{пр}}$ – показник, що характеризує форму прокладання i -го ЕП;
 $n_{\text{пр}}$ – кількість ЕП;
 $\tau_{\text{пр}}$ – відстань між ЕП.

У блоці 3.9 елементом конструкції є відбивач, що дозволяє збільшувати ЕПР БпЛА, а параметрами – показник, що характеризує форму поверхні відбивача $\phi_{\text{відб}}$; показник, що характеризує розмір поверхні відбивача $\kappa_{\text{відб}}$; діелектрична проникність відбивача $\varepsilon_{\text{відб}}$; магнітна проникність відбивача $\mu_{\text{відб}}$; товщина складових частин відбивача $\delta_{\text{відб}}$; показник, що характеризує кутову орієнтацію відбивача $\vec{\nu}_{\text{відб}}$; показник, що характеризує просторове положення відбивача $\vec{\xi}_{\text{відб}}$; кількість відбивачів $n_{\text{відб}}$. Функціональна залежність ЕПР цього елемента, що розраховується відповідно до методу, викладеному у працях [2–5], матиме такий вигляд:

$$\sigma = f_9(\phi_{\text{відб}}, \kappa_{\text{відб}}, \varepsilon_{\text{відб}}, \mu_{\text{відб}}, \delta_{\text{відб}}, \vec{\nu}_{\text{відб}}, \vec{\xi}_{\text{відб}}, n_{\text{відб}}), \quad (10)$$

де $\phi_{\text{відб}}$ – показник, що характеризує форму поверхні i -го відбивача;
 $\kappa_{\text{відб}}$ – показник, що характеризує розмір поверхні i -го відбивача;
 $\varepsilon_{\text{відб}}$ – діелектрична проникність i -го відбивача;
 $\mu_{\text{відб}}$ – магнітна проникність i -го відбивача;
 $\delta_{\text{відб}}$ – товщина складових частин i -го відбивача;
 $\vec{\nu}_{\text{відб}}$ – показник, що характеризує кутову орієнтацію i -го відбивача;
 $\vec{\xi}_{\text{відб}}$ – показник, що характеризує просторове положення i -го відбивача;
 $n_{\text{відб}}$ – кількість відбивачів.

У блоці 4 (рис. 2) здійснюється формування моделі конструкції БпЛА з урахуванням вибраних елементів конструкції та вимог до моделі конструкції БпЛА з потрібною РЛП.

У блоці 5 здійснюється оцінювання ХВВ вибраної моделі конструкції БпЛА з урахуванням вимог до моделі конструкції БпЛА з потрібною РЛП.

Отже, для отримання моделі конструкції БпЛА з найменшим значенням РЛП необхідно оцінити ХВВ вибраної моделі літального апарата із застосуванням необхідних методів розрахунку, що відповідають такій функційній моделі:

$$\sigma = f \left(\begin{array}{l} f_1(\rho_{\text{пф}}, \phi_{\text{пф}}, \kappa_{\text{пф}}); f_2(\phi_{\text{ф}}, \kappa_{\text{ф}}); \\ f_3(\varepsilon_{\text{ф}}, \mu_{\text{ф}}, \delta_{\text{ф}}, n_{\text{ф}}); f_4(\phi_{\text{кр}}, \kappa_{\text{кр}}); \\ f_5(\varepsilon_{\text{кр}}, \mu_{\text{кр}}, \delta_{\text{кр}}, n_{\text{кр}}); f_6(\phi_{\text{обт}}, \kappa_{\text{обт}}); \\ f_7(\varepsilon_{\text{обт}}, \mu_{\text{обт}}, \delta_{\text{обт}}, n_{\text{обт}}); f_8(d_{\text{пр}}, l_{\text{пр}}, \phi_{\text{пр}}, n_{\text{пр}}, \tau_{\text{пр}}) \end{array} \right) \rightarrow \min. \quad (11)$$

Для отримання моделі конструкції БпЛА з найбільшим значенням РЛП необхідно оцінити ХВВ вибраної моделі літального апарата із застосуванням необхідних методів розрахунку, що відповідають такій функційній моделі:

$$\sigma = f \left(\begin{array}{l} f_1(\rho_{\text{пф}}, \phi_{\text{пф}}, \kappa_{\text{пф}}); f_2(\phi_{\text{ф}}, \kappa_{\text{ф}}); \\ f_3(\varepsilon_{\text{ф}}, \mu_{\text{ф}}, \delta_{\text{ф}}, n_{\text{ф}}); f_4(\phi_{\text{кр}}, \kappa_{\text{кр}}); \\ f_5(\varepsilon_{\text{кр}}, \mu_{\text{кр}}, \delta_{\text{кр}}, n_{\text{кр}}); f_6(\phi_{\text{обт}}, \kappa_{\text{обт}}); \\ f_7(\varepsilon_{\text{обт}}, \mu_{\text{обт}}, \delta_{\text{обт}}, n_{\text{обт}}); f_8(d_{\text{пр}}, l_{\text{пр}}, \phi_{\text{пр}}, n_{\text{пр}}, \tau_{\text{пр}}); \\ f_9(\phi_{\text{відб}}, \kappa_{\text{відб}}, \varepsilon_{\text{відб}}, \mu_{\text{відб}}, \delta_{\text{відб}}, \vec{\nu}_{\text{відб}}, \vec{\xi}_{\text{відб}}, n_{\text{відб}}) \end{array} \right) \rightarrow \max. \quad (12)$$

У блоці 6 здійснюється перевірка отриманої моделі на виконання вимог до конструкції БпЛА з потрібною РЛП. Якщо вимоги виконані, то вважаємо, що завдання виконане, і переходимо до блока 7 виведення інформації з отриманою моделлю конструкції БпЛА з потрібною РЛП. Якщо вимоги не виконані, то переходимо до блока 2 і виконуємо такі дії:

- аналізуємо та корегуємо вимоги до цієї конструкції;
- формуємо нову конструкцію моделі БпЛА;
- оцінюємо ХВВ нової отриманої конструкції моделі БпЛА.

Висновки

У статті розроблений метод вибору форми і матеріалів елементів конструкції безпілотних літальних апаратів для формування їх потрібної радіолокаційної помітності з використанням асимптотичних високочастотних методів розрахунку, а в окремих випадках (при оцінюванні характеристик вторинного випромінювання тонких проводів всередині діелектричної оболонки) – і додаткового застосування рівняння Поклінгтона.

Реалізація цього методу заснована на послідовному оцінюванні радіолокаційної помітності окремих елементів конструкції безпілотних літальних апаратів різних форм і матеріалів елементів їх конструкції та виборі такого елемента конструкції, ефективна поверхня розсіювання якого задовольняє вимоги до поставленого завдання щодо їхньої радіолокаційної помітності.

Розроблено алгоритм, який дозволяє реалізувати запропонований метод, та наведені функційні моделі, що дозволять отримати конструкцію БпЛА з потрібною радіолокаційною помітністю.

Результати дослідження можуть будуть корисними для модернізації існуючих та проектування нових БпЛА військового призначення і дозволять підвищити ефективність виконання бойових завдань.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розроблення методів формування конструкції БпЛА з потрібною радіолокаційною помітністю, використовуючи комплексні методи оптимізації поверхні, та застосування радіопоглинаючих матеріалів та покриттів.

Перелік джерел посилання

1. Sweetman B. Northrop B-2 Stealth Bomber: The Complete History, Technology, and Operational Development of the Stealth Bomber (Mil-Tech Series). Softcover. Motorbooks Intl. USA, 1992. 96 p.
2. Анипко О. Б., Башинский В. Г., Украинец Е. А. Аэродинамический облик, радиолокационная и инфракрасная заметность самолетов военного назначения при их обнаружении : монография. Запорожье : АО «Мотор Сич», 2013. 250 с.
3. Хричов В. С. Радіолокаційна помітність об'єктів складної форми із покриттям та без нього : дис. ... д-ра філософії : 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» (Галузь знань 10 – Природничі науки). Харків, 2023. 166 с.
4. Оцінка використання кутових відбивачів для імітації літаків тактичної авіації / Сухаревський О. І., Василюк В. О., Ряполов І. Є., Ряполов Є. І. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 2 (31). С. 73–78. DOI:<https://doi.org/10.30748/nitps.2018.31.09>.
5. The use of corner reflectors to simulate tactical aircraft / Sukharevsky O. I., Ryapolov I. E., Vasilets V. A., Nechitaylo S. V. *IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv. 2022. 14–18 November. Pp. 289–292. DOI:<https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037097>.
6. Корнієнко Л. Г., Коломійцев О. В. Антенна решітка Ван Атта для імітації радіолокаційних цілей. *Системи обробки інформації*. 2015. Вип. 3 (128). С. 17–21. URL:<https://surl.li/mqoczt> (дата звернення: 02.08.2025).
7. Orlenko V., Ryapolov I. Review of contemporary systems for aircraft self-protection using towed decoys. *Системи обробки інформації*. 2017. № 5 (151). С. 26–31. URL:<https://surl.li/hxfjzc> (дата звернення: 19.08.2025).
8. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects / Nechitaylo S. V., Orlenko V. M., Sukharevsky O. I., Vasilets V. A. Boca Raton, USA : SRC Press Taylor & Francis Group, 2014. 334 p.
9. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами : монография / О. И. Сухаревский и др. Харьков : ХУПС, 2009. 468 с.
10. Вторинне випромінювання безпілотних літальних апаратів (математичне моделювання) : монографія / О. І. Сухаревський та ін. Харків : ХАІ, 2022. 270 с.

11. Ряполов І. Є., Ряполов Є. І., Боднар С. І. Високочастотні методи розрахунку характеристик розсіювання складних повітряних радіолокаційних об'єктів. *Випробування та сертифікація*. 2024. № 1 (3). С. 85–95. DOI:<https://doi.org/10.37701/ts.03.2024.12>.
12. Ряполов І. Є., Нечитайло С. В., Костріков О. Л. Метод розрахунку характеристик розсіювання дзеркальної антени, що знаходиться під радіопрозорим обтічником. *Випробування та сертифікація*. 2024. № 4 (6). С. 97–102. DOI:<https://doi.org/10.37701/ts.06.2024.12>.
13. Высоочастотный метод расчета вторичного излучения модели фюзеляжа беспилотного летательного аппарата / Ряполов И. Е., Василец В. А., Сухаревский О. И., Ткачук К. И. *Системы озброєння і військова техніка*. 2014. Вип. 1 (37). С. 222–225. URL:<https://surl.li/xjnkfh> (дата звернення: 19.08.2025).
14. Ряполов И. Е., Василец В. А., Сухаревский О. И. Высоочастотный метод расчета рассеяния вторичного излучения диэлектрических частей модели беспилотного летательного аппарата. *Системы обработки информации*. 2014. Вип. 2 (118). С. 58–62. URL:<https://surl.lt/litaem> (дата звернення: 19.08.2025).
15. Ряполов І. Є. Високочастотний асимптотичний метод розрахунку вторинного випромінювання моделі безпілотного літального апарата. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 3 (24). С. 86–89. URL:<https://surl.li/fgkjzz> (дата звернення: 19.08.2025).
16. Scattering characteristics of Mi-8MT helicopter based on measurements of object scale model in an anechoic chamber / Sukharevsky O., Vasilets V., Ryapolov I., Brechka M. *Системы обработки информации*. 2017. Вип. 1 (147). С. 109–114. DOI:<https://doi.org/10.30748/soi.2017.147.20>.
17. Моделювання геометрії поверхні безпілотних літальних апаратів, конструкція яких містить елементи з різними електрофізичними властивостями / Ряполов І. Є., Василець В. О., Кукобко С. В., Боднар С. І. *Випробування та сертифікація*. 2024. № 2 (4). С. 101–110. DOI:<https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.13>.
18. Scattering characteristics of thin-wire conductors embedded inside dielectric shell / Sukharevsky O., Vasylets V., Nechitaylo S., Ryapolov I. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77 (8). Pp. 671–687. DOI:<https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v77.i8.20>.
19. Ряполов І. Є. Метод розрахунку характеристик вторинного випромінювання тонких провідників, що знаходяться під діелектричною оболонкою. *Випробування та сертифікація*. 2025. № 1 (7). С. 88–93. DOI:<https://doi.org/10.37701/ts.07.2025.10>.
20. Ряполов І. Є. Оцінка впливу варіантів форми прокладання тонкого проводу у вільному просторі та всередині діелектричної оболонки (крила безпілотного літального апарата) на радіолокаційну помітність. *Випробування та сертифікація*. 2025. № 3 (9). С. 72–78. DOI:<https://doi.org/10.37701/ts.09.2025.09>.

Стаття надійшла до редакції 25.08.2025 р.

UDC 623.4.018

I. Riapolov, A. Trystan

**METHOD FOR SELECTING THE SHAPE AND MATERIALS
OF UNMANNED AERIAL VEHICLE STRUCTURAL ELEMENTS
TO FORM THEIR REQUIRED RADAR SIGNATURE**

During the execution of combat missions involving the use of unmanned aerial vehicles, situations may arise where the successful completion of the mission critically depends on their level of radar signature. The most effective methods for achieving the required radar signature include optimizing surface geometry; applying radar-absorbent materials and coatings; using passive reflectors, which allow for increasing the radar cross-section of an object, as well as managing secondary radiation.

Unmanned aerial vehicles performing, for example, reconnaissance operations or used as strike assets during a combat mission, should possess a reduced radar signature. A lower radar signature will allow enemy radar means to detect unmanned aerial vehicles at a shorter range, and, as a result, the probability of successful completion of the combat mission will be increased. However, there are cases when the radar signature of unmanned aerial vehicles needs to be increased to a certain level. These should include cases where unmanned aerial vehicles are used as targets or for simulating other types of aircraft. Furthermore,

increasing the radar signature of unmanned aerial vehicles is necessary for their stable detection and tracking when they are used as interceptors. Consequently, the task arises of finding ways to implement the required radar signature for unmanned aerial vehicles.

The article proposes a method for selecting the shape and materials of the structural elements of unmanned aerial vehicles, which allows for choosing their required radar signature both at the stage of designing new ones and modernizing existing unmanned aerial vehicles. The method is based on the sequential evaluation of the radar signature of individual structural elements of unmanned aerial vehicles for different shapes and materials of the structural elements and on selecting the structural element whose radar cross-section meets the requirements of the assigned task.

The application of this method involves the use of integral representations obtained with the help of the Lorentz lemma, as well as the Pocklington equation. A block diagram of the algorithm of the developed method is provided.

K e y w o r d s: unmanned aerial vehicle, high-frequency method, dielectric shell, radar cross-section, Pocklington equation, secondary radiation characteristics.

Ряполов Іван Євгенович – кандидат технічних наук, старший дослідник, докторант штатний Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки.
<https://orcid.org/0000-0002-3139-1644>

Тристан Андрій Вікторович – доктор технічних наук, професор, начальник Центрального управління військової освіти і науки ГШ ЗС України.
<https://orcid.org/0000-0002-2137-5712>