

УДК 354.404.4+355.40:629.783

Л.М. Артюшин

## МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ВІДМОВОСТІЙКОГО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОВИМ ПОЛЬОТОМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Запропонована система, яка базується на використанні трилатераційного методу вимірювання параметрів. Сформульована задача синтезу відмовостійкого оптимального керування груповим польотом безпілотних літальних апаратів (БПЛА).*

За сучасних умов інтенсивний розвиток безпілотної авіації є пріоритетним напрямком для провідних авіаційних держав світу. Безпілотна авіація в цей час переживає бум, однією із причин якого є високі результати застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у недавніх військових конфліктах під час операцій „Буря в пустелі” у зоні Перської протоки в 1990 – 1991 рр., „Рішуча сила” у небі Югославії в 1991 – 1992 рр., „Незламна сила” в Афганістані в 2001 – 2002 рр. і, нарешті, у ході останніх бойових дій в Іраці в 2003 році [1 – 8].

Так, наприклад, у війні в Югославії коаліційні війська застосовували сім типів БПЛА, у тому числі [4 – 7]:

середнього радіуса дій (до 500 км) – „Предатор” ВПС США;

малого радіуса дій (до 200 км) – „Хантер” сухопутних військ США, „Піонер” ВМС США, „CL-289” сухопутних військ ФРН і Франції, „Міраж-26” сухопутних військ Італії;

надмалого радіуса дії (до 50 км) – „Спектр” системи „Кресерель” сухопутних військ Франції, „Фенікс” сухопутних військ Великобританії.

Тактико-технічні дані цих БЛА наведені в таблиці [9, 10].

Усього за операцію в Югославії БПЛА виконали близько 500 вильотів загальною тривалістю 3800 годин. На додаток епізодичної розвідувальної інформації від супутників і пілотованих літаків-розвідників, перебування яких над спостережуваною територією було обмеженим, БПЛА забезпечили безперервне надходження оперативної інформації про супротивника.

Основними завданнями, які були вирішені БПЛА в ході операції, стали такі:

розвідка угруповань військ у районах Косова й на маршрутах їх пересування;

виявлення мобільних зенітно-ракетних комплексів і радіолокаційних станцій протиповітряної оборони;

розвідка результатів ударів авіації по об'єктах.

Високу ефективність застосування в сучасних

бойових діях показав БПЛА типу „Предатор” (США) [4, 6]. Закладені в ньому оперативно-тактичні можливості дозволили забезпечити його застосування як удень, так і вночі, при цьому оперативно передавати дані на наземні пункти збору й обробки даних, а також на борт літаків управління й спостереження системи JSTARS.

Результати застосування БПЛА підтверджують думку експертів, що безпілотні ЛА в бойовій обстановці можуть більш ефективно, оперативно та з найменшими витратами, ніж пілотовані ЛА, вирішувати завдання тактичної розвідки й радіолокаційної боротьби, коректування вогню, бойового управління й зв'язку, метеорологічної, радіаційної, хімічної й біологічної розвідок в інтересах командування видів збройних сил без ризику для особового складу. При цьому значно скорочуються терміни доведення отримуваної розвідувальної інформації до відповідної ланки управління. Крім того, порівняно з пілотованими літаками БПЛА притаманні такі якості, як простота та дешевизна розробки, виробництва й експлуатації; відсутність бойових втрат льотного складу; зниження вимог до безпеки експлуатації; можливість довготривалого польоту із значним перевантаженнями та інше.

Найбільш поширеними серед БПЛА військового призначення залишаються розвідувальні, але в останній час до них приєднуються бойові (ударні) БПЛА.

Аналіз досвіду застосування сучасних БПЛА, тенденцій їх розвитку, даних про тактико-технічні характеристики БПЛА та поглядів експертів щодо подальшого їх розвитку дозволяє виділити глобальні напрямки розвитку БПЛА.

До них можна віднести такі напрямки щодо вдосконалення:

конструктивних і тактико-технічних характеристик (ТТХ) БПЛА (аеродинамічних характеристик планера, ТТХ обладнання й озброєння);

форм і способів застосування;

процесів керування БПЛА.

## Безпілотні літальні апарати

Найменування (рік прийняття на озброєння, вид збройних сил, у якому БПЛА перебуває на озброєнні)	Маса, кг		Швидкість польоту, км/год		Практична стеля, м	Максимальний радіус дії, км	Тривалість польоту, год	Корисне навантаження (примітки)
	максимальна літна	корисне навантаження	максимальна	крейсерська				
Великобританія								
"Фенікс" (1987, СВ)	175	50	170	100	2800	70	5	ІЧ-станція (інфра-червона)
Італія								
"Міраж-26" (1994, СВ)	210	50	220	170	3500	100	6	ТВ-камера (телевізійна), ІЧ-станція
Росія								
"Бджола-1Т" (1991, СВ)	140	*	150	110	2500	50	2	*
Спільне виробництво								
RQ-2 "Піонер" (Ізраїль, США, 1986, СВ)	200	45	175	100	4500	185	6	ТВ-камера, ІЧ-станція перед- нього огляду
BQM-155A "Хан- тер" (Ізраїль, США, 1995, СВ, ВМС (військово- морські сили))	730	До 100	200	150	4500	275	12	ТВ-камера, ІЧ-станція перед- нього огляду, даль- номір-цілеуказчик, апаратура РЕП
CL-289 (AN/USD-502) (Канада, ФРН, Франція, 1990-1991, СВ)	240	30 21	750	740 70...120	3000	200	0,6	АФА (аерофотоапа- рат), ІЧ-станція
США								
FQM-151A "Пой- нтер" (1990, СВ)	4,55	0,9	80	35	300	8	До 2	ТВ- або тепловізій- на камера
RQ-1A "Предатор" (1996, ВПС (вій- ськово-повітряні сили))	1100	200	240	200	7600	4000	До 48	ТВ-камера, ІЧ-стан- ція, РЛС із синтезо- ваною апертурою, лазерний дально- мір-цілеуказчик
Франція								
"Кресерель" (1994, СВ)	150	35	250	120	3500	90	5	ТВ- і тепловізійна камери

У їх рамках формуються часткові напрямки і завдання.

*Розвідувальні БПЛА розвиваються насамперед у таких напрямках [11]:*

включення до традиційних споживачів розвідувальної інформації невеликих підрозділів і навіть окремих бійців на полі бою за рахунок створення досконалих мікро-БПЛА, оснащених надсучасною мініатюрною цифровою відеоапаратурою та іншими засобами розвідки;

створення й розширення кількості зразків нового виду БПЛА підвищеної тривалості польоту, час базування яких у районі розвідки на глибині до 4000...5000 км може складати від 24 до 40 годин;

розширення діапазону завдань, які вирішуються, шляхом виконання не лише розвідки заданих об'єктів, а й подальшого тривалого спостереження за ними, а також наведення наземних і повітряних вогневих засобів;

підвищення оперативності виконання бойових

завдань за рахунок спрощення способів зльоту та посадки, а також високої бойової готовності до термінового пуску (старту);

забезпечення можливості використання БПЛА цілодобово та за будь-яких метеоумов тощо.

*Для розвитку бойових БПЛА характерні такі напрямки [11]:*

оснащення їх переважно керованими високоточними авіаційними засобами ураження (АЗУ), призначеними для дії по широкому діапазону наземних і морських об'єктів;

забезпечення автономного (за програмою) виконання бойового завдання з ураження заданих об'єктів у випадку втрати зв'язку з пунктами управління;

збільшення радіуса дії деяких БПЛА за рахунок реалізації дозаправлення паливом у польоті;

реалізація можливості ведення повітряного бою.

*Іншими загальними тенденціями розвитку перспективних БПЛА будь-якого призначення є:*

пошук нових технологій та універсалізація бортової й наземної апаратури різних класів БПЛА;

поширення використання нетрадиційних аеродинамічних схем;

зменшення візуальної, радіолокаційної, інфрачервоної й акустичної помітності з метою підвищення їх живучості;

розширення діапазону основних ТТХ БПЛА (збільшення корисного навантаження, розширення діапазонів швидкостей і висот польоту, збільшення радіуса дії й тривалості польоту).

Наявні тенденції розвитку БПЛА підтверджують прогнози експертів відносно того, що майбутня війна скоріше за все стане війною, де вирішальну роль будуть відігравати саме авіаційні безпілотні засоби різного призначення. У зв'язку з чим напрямок розвитку БПЛА в Україні є актуальним, його завдання потребують пріоритетного вирішення та мають реальні можливості (на наш погляд, військово-економічному потенціалу України під силу реалізувати деякі перспективні проекти в даній галузі).

Розробка власних БПЛА військового призначення та прийняття їх на озброєння спроможні у відносно короткий термін суттєво підвищити бойові можливості військової авіації України.

При реалізації відмічених глобальних напрямків вирішується велика кількість завдань, яким присвячено чимало досліджень [1 – 4, 6] у рамках першого глобального напрямку.

У роботах другого напрямку вирішуються завдання підвищення ефективності застосування БПЛА за рахунок удосконалення форм і способів [2 – 4, 7, 8, 12].

У напрямку вдосконалення управління БПЛА розглядається комплекс завдань щодо забезпечення їх групового застосування.

Одним з важливих завдань у цьому комплексі є завдання автоматизованого керування груповим польотом БПЛА [12, 13].

Група БПЛА створює бойовий порядок, який забезпечує ефективне подолання системи ППО супротивника з мінімальними втратами і виконання БПЛА завдань, що поставлені перед ними.

Порядок БПЛА буде являти собою "пошуковий трал", який дозволить збирати інформацію з великої площі (для розвідувальних БПЛА) [12].

Така концепція використана в різних системах за вартістю та спорядженням БПЛА. При реалізації принципів автоматичного керування порядками можна суттєво підвищити ефективність виконання завдань пошуку й розвідки на великих територіях та істотно зменшити витрати на їх виконання.

Однак можливості ефективного одночасного керування великою кількістю БПЛА в бойових умовах принципово обмежені. Для вирішення протиріччя між необхідністю масового застосування безпілотних засобів та об'єктивними обмеженнями на можливість організації керування було запропоновано сформувати групу з БПЛА та керувати нею як одним цілим об'єктом [12, 13].

Проблеми реалізації автоматичного керування груповим польотом ЛА, витримування заданого місця знаходження в бойовому порядку, контролю конфігурації складу бойового порядку на всіх етапах групового польоту вперше були висвітлені в роботах видатних вітчизняних учених В.А. Боднера, О.А. Красовського, Б.Г. Тарасова. Починаючи з 50-х років минулого сторіччя, були отримані важливі результати щодо реалізації групового застосування БПЛА та вирішені деякі комплексні науково-технічні проблеми автоматичного керування груповим польотом БПЛА, а саме:

синтезовані закони керування групою БПЛА як автономно функціонуючою системою з обмеженими ресурсами з урахуванням жорстких специфічних обмежень;

обґрунтовані умови ефективного бойового групового застосування БПЛА;

визначені схеми вимірювальних систем, що дозволяють реалізувати ефективне застосування груп БПЛА;

сформульовані загальні вимоги до систем автоматичного керування групою ЛА;

обґрунтовані можливості роздільного дослідження каналів керування: дистанцією, інтервалом і перевищенням;

запропоновані різні схеми систем керування.

Своєрідність групового руху ЛА як динамічної системи полягає в тому, що він без регуляторів принципово є не стійким на всіх режимах польоту.

У зв'язку з цим, тільки удосконалення засобів вимірювання й контролю місця розташування ЛА в групі не вирішує проблему забезпечення групового польоту в зімкнутих бойових порядках. Необхідно забезпечити автоматизацію обробки інформації про положення літальних апаратів у бойовому порядку з метою керування окремими БПЛА.

Відмінною рисою польоту БПЛА в складі групи є те, що він має проходити в повністю автоматичному режимі (участь оператора необхідна лише для контролю й оперативного втручання в програму польоту). Це вносить додаткові труднощі в розробку систем керування груповим польотом БПЛА на відміну від систем керування груповим польотом ЛА пілотованої авіації, де можливим є напівавтоматичне керування бойовим порядком.

У теперішній час проводяться інтенсивні дослідження із застосуванням різних фізичних принципів для створення вимірювачів положення ЛА в порядку. Як вимірювачі параметрів для майбутніх ЛА пропонуються акустичні, ультразвукові, лазерні, радіоактивні, радіотехнічні й інші системи [13].

У результаті досліджень [13] запропонована система, яка базується на використанні трилатераційного методу вимірювання параметрів. Її перевагами є зменшення вартості й ваги бортового обладнання БПЛА, можливість виконувати групові польоти в зімкнутих бойових порядках з мінімальним складом бортового обладнання, висока точність доставки засобів ураження й достатня гнучкість при вирішенні завдань оперативного управління групою.

Обрана система дозволяє з високим рівнем точності виконати обчислення координат повітряного об'єкта за певним значенням базису та вимірними дальностями до БПЛА.

На відміну від відомих радіодалекомірних способів навігації ЛА особливістю трилатераційного методу вимірювання координат є те, що визначення місця розташування повітряного об'єкта здійснюється

не на самому повітряному об'єкті, а на одному з наземних пунктів, і вимірювання дальності здійснюється зі значно більшою точністю, що характеризується середньоквадратичною помилкою до 4 м [13].

Послідовність вимірювання координат БПЛА зазначеним методом включає наступне (рис. 1). На землі розташовуються наземний пункт дистанційного управління (НПДУ) та відома станція, пов'язані між собою за допомогою інформаційного каналу. Ці наземні пункти розташовані у певних топоприв'язаних точках і відстань між ними точно визначена. Для вимірювання дальності до БПЛА з НПДУ випромінюється ширококутовий сигнал з модуляцією за фазою псевдовипадковою послідовністю. Цей сигнал випромінюється в напрямку можливого знаходження всіх БПЛА, що роблять груповий політ. Крім того, частина сигналу випромінюється в напрямку відомої станції. Приймач-передавач БПЛА перевипромінює прийнятий сигнал, який приймається як на НПДУ, так і на відомій станції, причому передавач кожного БЛА перевипромінює прийнятий сигнал із зсувом за частотою. Прийнятий на НПДУ сигнал коригується копією випроміненого сигналу (опорним сигналом), який знаходиться у приймачі, з метою визначення відносної фази між ними. Фазовий зсув між прийнятим і опорним сигналами пропорційний подвоєній відстані до БПЛА.

Сигнал, прийнятий від БПЛА на відому станцію, порівнюється з сигналом, який приймається від НПДУ, й таким чином визначається дальність  $R_1 + R_2$  (рис. 1). Дальності до кожного БПЛА, які вимірюються на відомій станції, передаються на НПДУ й заводяться в наземну цифрову обчислювальну машину (ЦОМ). У ту ж ЦОМ надходить і дальність  $R_1$ , що виміряна на НПДУ. Виміряні значення  $R_1$  і  $R_1 + R_2$  та відомий базис  $R$  (рис. 1) однозначно визначають координати БПЛА.



Рис. 1. Схема організації інформаційно-вимірювальної системи групи БПЛА за трилатераційним принципом

Для збільшення дальності дії системи необхідно застосовувати додаткові повітряні пункти (наприклад, безпілотні ЛА), що працюють як ретранслятори.

Точність визначення місця розташування БПЛА відносно НПДУ становить на відстані 50 км –  $15 \pm 20$  м, на відстані 80 км –  $25 \pm 30$  м. Висока точність визначення координат БПЛА дозволяє робити їх групові польоти в зімкнутих бойових порядках.

Сучасні методи й засоби радіоелектронної протидії супротивника можуть впливати на роботу трилатераційної системи, що приведе до втрати спостережуваності та керованості групи БПЛА і, як наслідок, до зниження ефективності бойового використання групи та зіткнення апаратів.

З метою запобігання цьому необхідно забезпечити можливість керування груповим польотом БПЛА в умовах можливих відмов інформаційного каналу, тобто забезпечити функціональну стійкість комплексу.

Під функціональною стійкістю комплексу керування розуміється його властивість забезпечувати за певний час виконання певної множини функцій з якістю, не гіршою за задану, за умов можливості виникнення регламентованої множини відмов в об'єкті або комплексі керування [14].

**Мета статті** – викладення методичного підходу для вирішення завдань оптимізації системи автоматичного керування груповим польотом БПЛА в умовах відмов інформаційного каналу.

Тому наукове завдання синтезу відмовостійкого оптимального керування груповим рухом БПЛА формулюється наступним чином.

Необхідно визначити оптимальне керування  $U^*(t)$  за умови мінімуму математичного сподівання квадратичного критерію якості  $I(X(t), U(t)/H_i(t))$  для обраної моделі відмов інформаційного каналу  $H_i(t) \in \{H\}$ ,  $i = [0, 1]$  з урахуванням обмежень на область припустимих станів  $X(t) \in \Omega_X$  і керувань  $U(t) \in \Omega_U$ :

$$\begin{cases} U^*(t): \min I(X(t), U(t)/H_i(t)); \\ |I(X(t_0), U(t_0)/H_0(t_0)) - \\ - I(X(t_0), U(t_0)/H_i(t_0))| < \varepsilon; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |I(X(t), U(t)/H_0(t)) - \\ - I(X(t), U(t)/H_i(t))| < \delta(\varepsilon). \end{cases} \quad (1)$$

Нерівності в системі (1) характеризують умови функціонально стійкого керування: якщо в початковий момент часу  $t_0$  відмова призведе до погіршення якості стабілізації не більше деякого позитивного

значення  $\varepsilon$ , то функціонально стійке керування дозволить забезпечити зміну якості стабілізації не більше деякого значення  $\delta$ , що залежить від  $\varepsilon$  [13, 14].

Групу БПЛА будемо розглядати у вигляді замкнутої стохастичної динамічної системи, яка описується рівняннями стану й спостережень [14]:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(X, t)X(t) + B(X, t)U(t) + \xi(t); \\ Y(t) = H_i(t)X(t) + \eta(t) \text{ при } i = [1, \dots, n]. \end{cases} \quad (2)$$

Тут  $X(t)$  –  $n$ -вимірний вектор стану групи БПЛА;

$U(t)$  –  $m$ -вимірний вектор керування;

$Y(t)$  –  $l$ -вимірний вектор вимірювань;

$A(X, t)$  – динамічна матриця системи розмірністю  $n \times n$ ;

$H_i(t)$  – матриця вимірювань системи розмірністю  $l \times n$ ;

$B(X, t)$  – перехідна матриця керування розмірністю  $n \times m$ ;

$\xi(t)$  – випадковий  $n$ -вимірний вектор гауссівських збурень стану системи з нульовим математичним сподіванням і кореляційною матрицею

$$\xi(t) \in \Omega_\xi : M[\xi(t)] = 0; M[\xi(t)\xi^T(t')] = Q(t)\delta(t - t');$$

$\eta(t)$  – випадковий  $l$ -вимірний вектор гауссівських перешкод вимірювань з нульовим математичним сподіванням і кореляційною матрицею

$$\eta(t) \in \Omega_\eta : M[\eta(t)] = 0; M[\eta(t)\eta^T(t')] = R(t)\delta(t - t'),$$

де  $\delta(t - t')$  – функція Дирака.

Під інформаційним каналом комплексу керування групою БПЛА розуміється сукупність пристроїв (радіокомунікаційної апаратури, пристроїв кодування й декодування, пристроїв сполучення), яка є необхідною для вимірювання компонентів вектора стану. Відмови інформаційного каналу розглядаються як стрибкоподібні зміни його властивостей у вигляді збільшення понадприпустимої тривалості періоду поновлення інформації між наземними компонентами та БПЛА, які представляються у вигляді варіації значень елементів матриці вимірювань  $H_i$  у рівнянні вимірювань (2) (рис. 2):

$$H_i(t) = \begin{cases} H_0 \text{ при } T_d \leq T_d^{\text{lim}}; \\ H_1 \text{ при } \tilde{T}_d > T_d > T_d^{\text{lim}}. \end{cases}$$

Статистичні характеристики відмов вважаємо невідомими.

Характерною рисою відмов даного виду є порушення умови повної спостережуваності системи за Калманом при дотриманні умов повної керованості й стійкості динамічної системи (2).

Розглядається режим автоматичної стабілізації польоту групи БПЛА із квадратичним критерієм якості вигляду

$$I(X(t), U(t) / H_i(t)) = M \left( \int_{t_0}^{t_k} X^T(t) \beta X(t) dt \right). \quad (3)$$

Представлена задача розв'язана на основі принципу декомпозиції, який застосовується для синтезу оптимального та субоптимального сепарабельного керування для стаціонарних лінійних динамічних систем і квадратичних критеріїв якості керування. Його застосування розширюється на випадок стохастичних систем, де властивості об'єкта керування можуть змінюватися випадково після виникнення відмов.

Специфіка розглянутого об'єкта керування, динамічні властивості групи БПЛА дозволяють розділити керування рухом групи на три незалежні канали: керування дистанцією, перевищенням і інтервалом між БПЛА [13].

Порядок вирішення поставленого завдання полягає в тому, що спочатку визначається структура функціонально стійкого комплексу керування, потім форму-

ється оптимальне керування для стаціонарної системи, визначається необхідна структура регулятора комплексу керування та алгоритму виявлення й парирування наслідків відмов інформаційного каналу, а далі розглядається робота синтезованого комплексу в умовах нестационарної стохастичної системи.

Для забезпечення функціональної стійкості керування груповим польотом БПЛА з урахуванням відмов інформаційного каналу пропонується така структура комплексу (рис. 3), в якій функції виявлення й парирування наслідків відмов інформаційного каналу виконує прогнозуюча модель у вигляді алгоритму екстраполяції геометричних параметрів строю БПЛА, а для реалізації керування строєм використовується оптимальний регулятор, синтезований для розглянутого об'єкта керування.

Для синтезу пропонується використати модель похибки у вигляді

$$\dot{E} = AE + U, \quad (4)$$

де  $E = [\epsilon, \dot{\epsilon}, \ddot{\epsilon}]^T$  – вектор помилок стабілізації дистанції;

$A$  – матриця, яка характеризує властивості групи БПЛА;

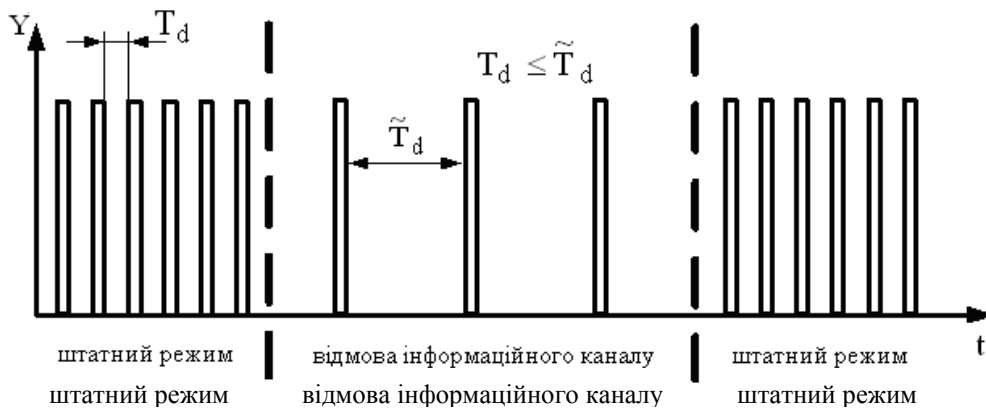


Рис. 2. Формування моделі відмов у вигляді зміни періоду поновлення інформації

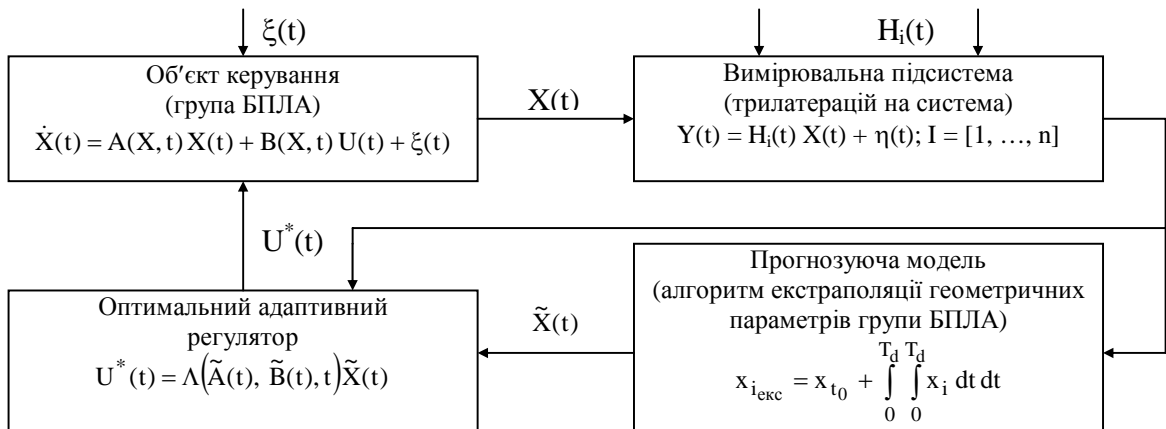


Рис. 3. Структура оптимального функціонально стійкого комплексу керування груповим польотом БПЛА з урахуванням можливості відмов інформаційного каналу

$U = [0, 0, u_0]^T$  – вектор керування.

Застосування такого виду моделі дозволяє використати для синтезу оптимального регулятора другий метод Ляпунова в традиційній постановці [14]. При цьому, для розглянутої моделі (4) елементи матриці Р функції Ляпунова

$$V = E^T P E \quad (5)$$

можна виразити через елементи матриці А (4). Отриманий закон оптимального керування для систем (1) і (2) має вигляд

$$U = \{B_0|d| + B_1|\dot{d}| + B_2|\ddot{d}| + C_0|\delta|\} \times \text{sign}\{(p_{31}\varepsilon + p_{32}\dot{\varepsilon} + p_{33}\ddot{\varepsilon})\} \quad (6)$$

з параметрами, що залежать від властивостей об'єкта керування.

Важливим етапом методики є вибір структури регулятора. Для забезпечення функціонально стійкого керування груповим польотом БПЛА запропоновано застосування регулятора з еталонною моделлю й комбінованим настроюванням (рис. 4).

Для забезпечення виконання (1) керування апаратами в умовах відмов інформаційного каналу пропонується використання алгоритму екстраполяції геометричного положення БПЛА у групі:

$$d(t + \Delta t) = d(t) + v_d(t)\Delta t + \frac{a_d(t)\Delta t^2}{2} + \frac{k_u u(t)\Delta t^2}{2}. \quad (7)$$

У разі несправності інформаційного каналу, коли сигнал дистанції неможливо сформувати, пропонується використати рівняння (7), де дані про швидкість та прискорення є апріорно відомими.

Таким чином, представлена структура комплексу з регулятором вигляду (6) та алгоритмом екстраполяції (7) є рішенням поставленої задачі синтезу функціонально стійкого комплексу керування груповим польотом БПЛА.

Дослідження залежності середньоквадратичної похибки дистанції між БПЛА на різних режимах польоту для випадку розходження й сходження групи при різних періодах поновлення інформаційних сигналів показало, що при збільшенні періоду поновлення інформації понад 0,1 с у випадку комплексу керування, який не є функціонально стійким, середньоквадратична похибка стабілізації дистанції збільшується практично за експоненціальним законом (рис. 5, крива 1). У випадку використання функціонально стійкого комплексу керування, синтезованого за запропонованою методикою, навіть при збільшенні періоду поновлення інформаційних сигналів до 9 с (рис. 5, крива 2) зберігається достатній рівень керованості групи (середньоквадратична похибка дистанції  $\sigma_\varepsilon$  не перевищує 25 м).

Таким чином, функціонально стійкий комплекс керування взаємним положенням БПЛА у групі в умовах нормального функціонування інформаційного каналу не погіршує якість стабілізації дистанції групи, однак, у випадку виникнення розглянутих

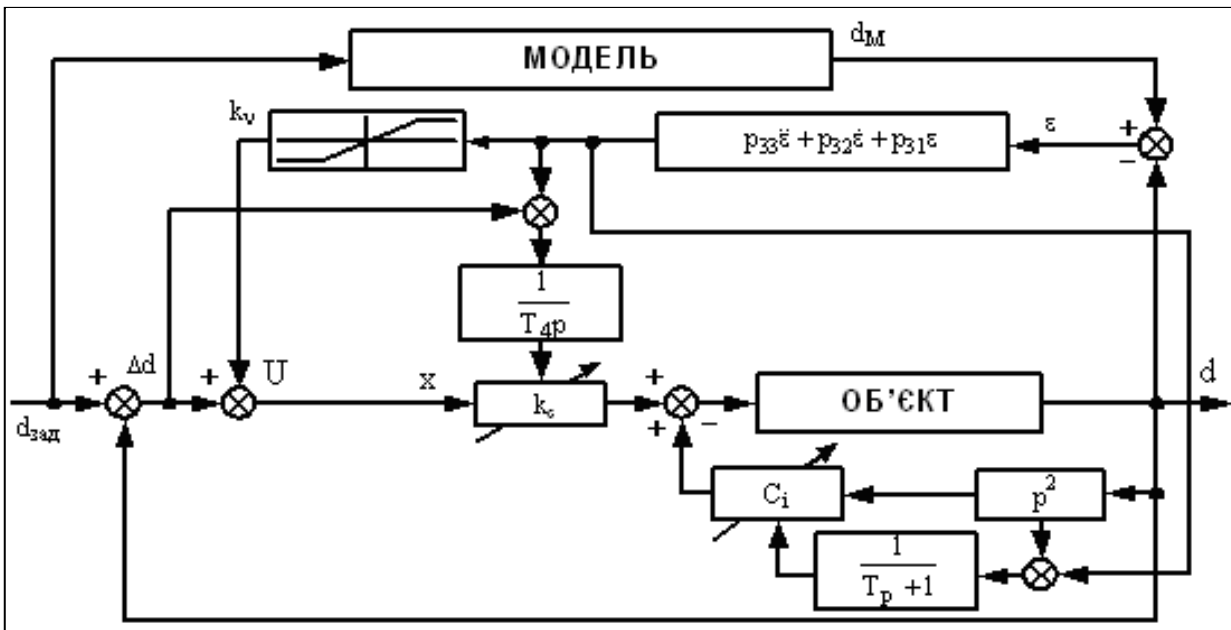


Рис. 4. Структурна схема регулятора з еталонною моделлю та комбінованим настроюванням



Рис. 5. Залежність середньоквадратичної похибки дистанції від тривалості періоду поновлення інформації для різних комплексів керування

відмов дозволяє забезпечити кращу якість стабілізації, ніж при нефункціонально стійкому керуванні.

Таким чином, у результаті вирішення поставленого завдання можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено методичний підхід, що дозволяє вирішити завдання забезпечення використання БПЛА в складі групи.

2. Запропонована структура оптимального функціонально стійкого комплексу керування груповим польотом БПЛА з урахуванням можливості відмов інформаційного каналу забезпечує керування в реальному масштабі часу та складається з блоку екстраполяції геометричних параметрів групи БПЛА і регулятора, що реалізує функціонально стійке керування.

3. Використання другого методу Ляпунова дозволяє синтезувати оптимальний регулятор з еталонною моделлю й комбінованою настройкою функціонально стійкого комплексу керування груповим польотом БПЛА, який можна реалізувати на існуючій елементній базі.

4. Функціонально стійкий комплекс керування груповим польотом БПЛА дозволяє розширити діапазон припустимих значень періоду поновлення інформації про положення апаратів у групі. Наприклад, для польоту на дозвуковій швидкості групи з десятих БПЛА при використанні синтезованого комплексу керування період поновлення інформації можна збільшити більш ніж у десять разів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аерокосмічна розвідка в локальних війнах сучасності / Л.М. Артющин, С.П. Мосов, Д.В. П'яковський, В.Б. Толубко. – К.: НАОУ, 2002. – 208 с.

2. Новичков Н. Чего не хватает войскам // Военный парад. – 2000, январь-февраль. – С. 46 – 47.

3. Куликов Л. Беспилотные средства разведки ОКБ А.Н. Туполева // Военный парад. – 1995, май-июнь. – С. 127 – 128.

4. Стрелецкий А. Средства электронной войны сухопутных войск США // Зарубежное военное обозрение. – 1999. – № 8. – С. 24 – 28.

5. Михеев С. Фирма «КАМОВ»: от винтокрылых штурмовиков до беспилотников // Военный парад. – 2001, январь-февраль. – С. 66 – 67.

6. Технические средства разведки Вооруженных Сил США. Серия: Технические средства разведки // ЕИБ ВИНТИ. – 2000. – № 12. – С. 3 – 10.

7. Использование разведывательных БПЛА ФРГ при проведении операции «Союзническая сила». Серия: Технические средства разведки // ЕИБ ВИНТИ. – 2000. – № 4. – С. 12 – 13.

8. Jane's International Defense Review. – 2000, February. – P. 14.

9. Беспилотные летательные аппараты // Зарубежное военное обозрение. – 2001. – № 9. – С. 41 – 44.

10. Беспилотные летательные аппараты // Зарубежное военное обозрение. – 2001. – № 10. – С. 30 – 40.

11. Харченко О.В. Тенденции розвитку військової авіації на початку 21 століття // Наука і оборона. – 2003. – № 3. – С. 12 – 16.

12. Шувалов А.А., Таврик В.А. Концепция совместного использования одного среднего и нескольких легких БПЛА // Тези доповідей та виступів учасників конференції 25–26.11.2004. – К.: НЦ ПС ЗС України. – С. 46.

13. Довжук Д.В., Ільїн О.Ю. Перспективні схеми організації систем керування груповим польотом БПЛА военного назначения // Зб. наук. пр. – К.: КІ ВПС. – 1997. – Вип. 7. – С. 63 – 68.

14. Артющин Л.М., Машков О.А. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.

Надійшла 28.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук професор Ю.В. Стасев, Харківський університет Повітряних Сил.