

Л.М. Артющин¹, О.А. Кононов¹, А.Ю. Кир'янов², А.В. Воєвода¹

¹Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

²Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ДАНИХ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГРУПОВИМ ЗАСТОСУВАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті розглядається проблематика реалізації бойового потенціалу застосування груп безпілотних літальних апаратів (БпЛА). Розглядається оптимізація автоматичного керування БпЛА групи в умовах суттєвої нелінійності, нестационарності та апріорної невизначеності процесів на етапі розроблення концептуальної моделі даних системи управління. Розглядається розроблення концептуальної моделі даних з позицій методології синтезу сепарабельного оптимального (субоптимального) керування складними об'єктами як теоретичної основи. Як предметна галузь розглядається макросистема “група БпЛА — об'єкти противника — зовнішнє середовище — цільові установки бойового застосування”. Обґрунтовується застосування рангових і графових форм критеріїв повної спостережуваності та керованості автоматичних систем для оцінки інформаційної достатності (повноти) сформованої концептуальної моделі даних.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, група безпілотних літальних апаратів, бойове застосування, системи управління, автоматичне керування, бази даних, концептуальна модель даних.

Вступ

Постановка проблеми. Спільне застосування декількох БпЛА, можливо з різними льотно-технічними характеристиками, спеціалізацією, траєкторіями руху, але чітко скоординоване у просторі та часі відносно цілі – групове застосування, потенційно дає змогу здійснювати гарантоване дистанційне виявлення та високоточне ураження добре захищених протиповітряними засобами цілей противника (у тому числі мобільних) без ризику втрат свого особового складу. Ця потенційна можливість є головним стимулом інтересу до реалізації ідеї бойового групового застосування БпЛА. Природно, що без розвинених автоматичних систем реалізувати скоординоване спільне застосування великої кількості безпілотних літальних апаратів не є можливим.

Рівень сучасної технологічної бази (рівень розвитку безпілотних авіаційних платформ, засобів зв'язку, передачі, отримання та обробки інформації) принципово дає змогу втілити на практиці ідею групового застосування БпЛА. На сьогодні відомо багато прикладів сумісного скоординованого польоту великої кількості БпЛА як у цивільній галузі, так і військового призначення. При цьому групове застосування відбувається фактично в умовах, наближених до “ідеальних”, які характеризуються лінійністю,

стационарністю, детермінованістю та відсутністю апріорної невизначеності процесів. У таких умовах необхідну якість керування можливо забезпечити в рамках існуючих технологій побудови автоматичних та автоматизованих систем.

Ситуація кардинально змінюється при намаганні здійснити групове застосування БпЛА в умовах, наближених до реальності бою, в умовах суттєвої нелінійності, нестационарності, апріорної невизначеності процесів. У цих умовах не вдається забезпечити необхідну якість автоматичного керування апаратами групи для реалізації потенціальних бойових можливостей групового застосування БпЛА. Намагання врахувати вплив нелінійності, нестационарності, апріорної невизначеності при синтезі керування в рамках існуючих технологій побудови автоматичних систем призводить в кінцевому рахунку до неприпустимого зменшення якості керування і, як наслідок, до неприпустимого погіршення функціональності групи.

На сьогодні це є значним обмеженням одержання повного спектра переваг від реалізації на практиці ідеї бойового застосування груп БпЛА. Наявний досвід його подолання вказує на необхідність пошуку не тільки нових інженерно-технічних рішень, а й нових підходів до побудови систем керування такими об'єктами, як групи БпЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження наукової проблеми створення системи управління, здатної реалізувати потенціал бойового застосування груп БпЛА, займають важливе місце в загальному переліку робіт, що присвячені тематиці безпілотної авіації.

При цьому можна виділити такі характерні особливості нинішнього етапу досліджень:

по-перше, у цій галузі досліджень ще не сформувалась стала термінологія. Під груповим застосуванням часто різні автори розуміють різні сутності, доволі часто замість поняття “група БпЛА” (group UAV) використовують поняття “рій” (goy), “зграя” (swarm) або “стрій” (order);

по-друге, спільним є розуміння, що без запровадження нових наукових, конструктивно-технологічних та інженерних рішень неможливо реалізувати потенціал груп БпЛА як виду озброєння.

Зараз дослідження групового застосування БпЛА проводяться на різних рівнях і напрямках.

У роботах [1, 2] наведено актуальну бібліографію стосовно системно-методологічних питань сумісного застосування БпЛА воєнного призначення, у тому числі групового застосування.

Актуальну англomовну бібліографію досліджень інженерно-технічних питань спільного застосування БпЛА наведено в роботах [3, 4].

Значна кількість досліджень присвячена методичному рівню проблематики спільного застосування БпЛА. Актуальні результати робіт, пов’язаних із вдосконаленням існуючих методів теорії автоматичного керування під вимоги застосування груп БпЛА, наведено в посиланнях статей [5...8].

Значні методичні результати одержано в напрямі синтезу автоматизованого управління спільними авіаційними групами [9...11], застосування ігрових методів керування апаратами групи [12, 13], застосування мультиагентних алгоритмів керування [14...18].

Важливим напрямом досліджень є намагання імплементувати досягнення сучасних інформаційних технологій до вирішення проблем керування апаратами групи в умовах суттєвої нелінійності, нестаціонарності, апріорної невизначеності.

У [19...21] наведено бібліографію робіт щодо запровадження методів штучного інтелекту до керування групою, а в [22, 23] — застосування сучасних технологій мережових обчислень.

Окремі питання створення архітектури програмного забезпечення для ефективного керування групою БпЛА в умовах сучасних технологічних можливостей розглянуто в [24]. У цій роботі наведено обґрунтування необхідності

створення спеціалізованої бази даних, необхідної для досягнення бажаної якості керування групою БпЛА воєнного призначення, обґрунтовані її основні функції та вимоги до неї. На жаль, ця стаття не охоплює базові теоретичні питання створення такої бази даних.

Тому **мета** даної **статті** полягає в оприлюдненні результатів досліджень авторів теоретичних основ створення бази даних системи керування групами БпЛА, яка буде здатна реалізувати бойовий потенціал цього формату застосування, у тому числі в умовах суттєвої нелінійності, нестаціонарності, апріорної невизначеності.

Розглядається перший, але найбільш визначальний етап створення бази даних — етап концептуального (інфологічного) проєктування та головна вимога — забезпечення інформаційної достатності (повноти) для здійснення цілеспрямованого керування апаратами групи.

Виклад основного матеріалу

Інженерно-технічні рішення щодо реалізації застосування одиночних БпЛА, коли цільове управління здійснює оператор, а рух по програмних траєкторіях і стабілізацію здійснюють автоматичні пристрої, не дають змогу повною мірою розкрити бойовий потенціал їх групового застосування.

Якщо для одиночних БпЛА негативний вплив нелінійності, нестаціонарності, апріорної невизначеності вдається компенсувати діями оператора, то для групи апаратів (складного розподіленого об’єкту) такі можливості вкрай обмежені. Досвід показує, що збільшення кількості операторів не є доцільним напрямом усунення зазначеного недоліку.

З іншого боку, зменшення вимог до якості керування, введення жорстких обмежень застосування для усунення негативного впливу нелінійності, нестаціонарності, апріорної невизначеності нівелюють принципи переваги бойового застосування груп БпЛА. Застосування груп БпЛА по жорстких апріорно заданих програмах руху зменшує ефект несподіванки дій для противника, залишаючи тільки перевагу за рахунок кількості.

Слід зазначити, що проблема реалізації бойового потенціалу групового застосування БпЛА є комплексною проблемою, подолання якої потребує прикладання зусиль у різних напрямках. При цьому вдосконалення системи управління, розширення її функціональності та можливостей займає центральне місце.

Важливим результатом попередніх досліджень є з’ясування того факту, що тільки екстенсивне

технічне вдосконалення апаратної частини системи управління не є системним розв'язанням зазначеної проблеми. Збільшення працездатності мікроконтролерів, покращення можливостей засобів зв'язку, датчиків, само по собі, не здатне забезпечити ефективне керування складним об'єктом у реальних бойових умовах (умовах суттєвої нелінійності, нестационарності, апріорної невизначеності процесів). Крім цього, необхідні адекватні системотехнічні та алгоритмічні рішення, які повинні базуватися на фундаментальних закономірностях і принципових властивостях даної предметної галузі.

Нині швидко розвиваються декілька теоретичних напрямів пошуку нових системотехнічних та алгоритмічних рішень щодо реалізації бойового потенціалу групового застосування БПЛА, наприклад, синтез автоматизованого управління спільними авіаційними групами [9...11], застосування ігрових методів керування апаратами групи [12, 13], застосування мультиагентних алгоритмів керування [14...18], запровадження методів штучного інтелекту до керування групою [19...21], застосування сучасних технологій мережевих обчислень [22, 23] тощо. Кожен з них має власні переваги та недоліки, але найбільшу адаптованість до існуючих конструктивно-технологічних реалій має підхід, пов'язаний із вдосконаленням існуючих методів теорії автоматичного керування під вимоги групового застосування.

У цьому випадку немає потреби внесення кардинальних змін до конструктивно-елементної бази систем управління, зміни принципів їх розробки та побудови. Його можна розглядати як логічне продовження процесу еволюції існуючих систем управління, тільки на новому теоретичному базисі, який гарантував би одержання бажаного результату.

Як такий теоретичний фундамент пропонується розглянути методологію синтезу сепарабельного оптимального (субоптимального) керування складними об'єктами в умовах суттєвої нелінійності, нестационарності та апріорної невизначеності, яка є одним із головних результатів сучасної теорії автоматичного керування.

У її рамках закон оптимального сепарабельного керування нелінійними нестационарними недетермінованими об'єктами $\bar{U}(t)$ визначається як суперпозиція умовних варіантів управління лінійними стаціонарними детермінованими об'єктами $\bar{U}_i(t)$:

$$\bar{U}(t) = \sum_{i=1}^r \Psi_i(\bar{X}, t) \cdot \bar{U}_i(t), \quad (1)$$

де $\Psi_i(\bar{X}, t)$ – логічні оператори, для яких виконуються умови одиничності й повноти ($\Psi_i(\bar{X}, t) \in \{0, 1\}$ для усіх $i = 1, \dots, r$; $\sum_{i=1}^r \Psi_i(\bar{X}, t) = 1$). Значення логічного оператора $\Psi_i(\bar{X}, t)$ залежить від фазового стану об'єкта керування $\bar{X}(t)$, тобто

$$\Psi_i(\bar{X}, t) = \begin{cases} 1 & \text{при } \bar{X}(t) \in \Omega_{\bar{X}} \\ 0 & \text{при } \bar{X}(t) \notin \Omega_{\bar{X}} \end{cases}, \quad (2)$$

де $\Omega_{\bar{X}}$ – множина фазових станів, де систему можна, припустимо, вважати лінійною, стаціонарною та детермінованою.

Вектори керування $\bar{U}_i(t)$ для лінійних стаціонарних детермінованих об'єктів, які представляються рівняннями зміни фазового стану та вимірювань у формі Ланжевена:

$$\begin{cases} \dot{\bar{X}}(t) = A \cdot \bar{X}(t) + B \cdot \bar{U}(t) \\ \bar{Y}(t) = H \cdot \bar{X}(t) \end{cases}, \quad (3)$$

де $\bar{Y}(t)$ – вектор вимірювань, A – динамічна матриця системи, B – матриця керування, H – матриця спостережень, знаходяться як рішення диференційного рівняння Беллмана (Гамильтона – Якобі – Беллмана):

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \min_{\bar{U}} \left[Q(\bar{X}, \bar{U}, t) + \frac{\partial Z}{\partial \bar{X}} \cdot (A \cdot \bar{X}(t) + B \cdot \bar{U}(t)) \right] = 0 \quad (4)$$

при кінцевій умові $Z(t = t_1) = Z(\bar{X}(t_1))$ для мінімуму критерію Больца:

$$J(\bar{X}, \bar{U}, t) = Z(\bar{X}(t_1)) + \int_{t_0}^{t_1} Q(\bar{X}(\theta), \bar{U}(\theta), \theta) d\theta, \quad (5)$$

де $Z(\dots)$ – функція термінальної складової критерію, $Q(\dots)$ – функція інтегральної складової критерію, $Z(\bar{X}(t_1)) \neq 0$, $Q(\bar{X}(\theta), \bar{U}(\theta), \theta) \neq 0$.

Вектори керування $\bar{U}_i(t)$ для лінійних стаціонарних детермінованих об'єктів представляються як добуток матричного коефіцієнта підсилення автоматичного регулятора $\Lambda_i(\bar{X}, t)$ і різниці $\bar{X}^*(t)$ – вектора бажаної (заданої) фазової траєкторії та $\hat{\bar{X}}(t)$ – вектора оцінки фазового стану:

$$\bar{U}_i(t) = \Lambda_i(\bar{X}, t) \cdot (\bar{X}^*(t) - \hat{\bar{X}}(t)). \quad (6)$$

Це визначає те, що для керування нелінійними

нестационарними недетермінованими об'єктами $\bar{U}(t)$ в рамках зазначеної методології необхідно апіорно задати множину логічних умов (умовних операторів) $\{\Psi_i(\bar{X}, t)\}$, множину матричних коефіцієнтів підсилення автоматичних регуляторів $\{\Lambda_i(\bar{X}, t)\}$ та відповідну їм множину $\{\bar{X}^*(t)\}$ векторів бажаних (заданих) фазових траєкторій:

$$\bar{U}(t) = \sum_{i=1}^r \Psi_i(\bar{X}, t) \cdot \Lambda_i(\bar{X}, t) \cdot (\bar{X}^*(t) - \hat{\bar{X}}(t)). \quad (7)$$

Матричний коефіцієнт підсилення автоматичних регуляторів $\Lambda_i(\bar{X}, t)$, вектор бажаних (заданих) фазових траєкторій $\bar{X}^*(t)$ та відповідний їм умовний оператор $\Psi_i(\bar{X}, t)$ визначають програмний режим функціонування.

Випадку $r=1$ відповідає формування закону керування для лінійної стаціонарної системи в умовах повної апіорної визначеності. Збільшення кількості програмних режимів свідчить про можливість системи управління забезпечити цілеспрямоване застосування для реальних бойових умов (умов суттєвої нелінійності, нестационарності та апіорної невизначеності процесів).

Слід зауважити, що залежність (1) є припущенням, але свідчення її справедливості у багатьох практичних прикладах застосування є ваговим аргументом її використання і для випадку синтезу керування групою БпЛА.

Вказана процедура синтезу сепарабельного оптимального (субоптимального) керування складними об'єктами в умовах суттєвої нелінійності, нестационарності та апіорної

невизначеності (1...7) має загальний характер, є інваріантною до фізичного вигляду об'єктів керування та кількості компонент векторів. При цьому вона потребує початкового визначення меж загальної системи формування автоматичного керування. Правильно обгрунтоване обмеження системи є принциповою умовою успішної реалізації описаної процедури синтезу керування.

У [7] обгрунтовано, що для управління з бажаною якістю груповим застосуванням БпЛА необхідно розглядати процеси в загальній макросистемі “група БпЛА – об'єкти противника – зовнішнє середовище – цільові установки бойового застосування”. Склад цієї системи визначається фундаментальними енергоінформаційними закономірностями процесу бойового застосування. Включення додаткових об'єктів не вплине позитивно на якість керування, але виключення зі складу будь-якої із зазначених складових погіршить якість керування та результативність застосування групи.

Саме тому в подальшому формування моделі даних буде розглядатися відносно процесів у загальній макросистемі “група БпЛА – об'єкти противника – зовнішнє середовище – цільові установки бойового застосування”.

Таке обмеження кола об'єктів дає змогу сформувати замкнений контур автоматичного керування груповим застосуванням БпЛА (рис. 1) у складі: БпЛА групи, об'єкти противника, зовнішнього середовища, система датчиків, інформаційно-вимірювальна система, безпосередньо, система автоматичного керування з базою даних.

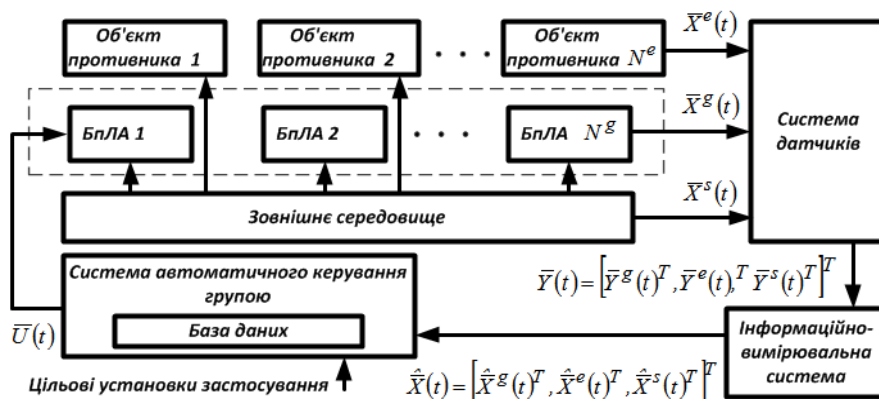


Рис. 1. Схема замкнутого контуру автоматичного керування групою БпЛА
Джерело: розроблено авторами

Замкнений контур керування описується рівняннями (1), де вектор фазового стану $\bar{X}(t)$ складається з векторів фазового стану БпЛА $\bar{X}^g(t)$, об'єктів противника $\bar{X}^e(t)$ та об'єктів зовнішнього

середовища $\bar{X}^s(t)$: $\bar{X}(t) = [\bar{X}^g(t)^T, \bar{X}^e(t)^T, \bar{X}^s(t)^T]^T$ (у цьому місці та далі, верхній індекс g відповідає позначенням, що пов'язані із БпЛА групи; верхній індекс e відповідає позначенням, що пов'язані з об'єктами противника; верхній індекс s

відповідає позначенням, що пов'язані з об'єктами зовнішнього середовища).

Тоді вектор фазового стану $\bar{X}(t)$ буде мати розмірність $(n^g N^g + n^e N^e + n^s N^s)$, де n^g – це розмірність вектора $\bar{X}^g(t)$, N^g – кількість БпЛА у групі, n^e – це розмірність вектора $\bar{X}^e(t)$, N^e – кількість об'єктів противника, n^s – це розмірність вектора $\bar{X}^s(t)$, N^s – кількість об'єктів зовнішнього середовища, що розглядаються.

Відповідно до цього вектор вимірювань $\bar{Y}(t) = [\bar{Y}^g(t)^T, \bar{Y}^e(t)^T, \bar{Y}^s(t)^T]^T$ буде мати розмірність $(l^g N^g + l^e N^e + l^s N^s)$, де l^g – це розмірність вектора вимірювань стану БпЛА $\bar{Y}^g(t)$, l^e – це розмірність вектора вимірювань стану об'єктів противника $\bar{Y}^e(t)$, l^s – це розмірність вектора вимірювань стану об'єктів середовища $\bar{Y}^s(t)$.

Розмірність вектора оцінки фазового стану БпЛА, об'єктів противника та об'єктів середовища $\hat{X}(t) = [\hat{X}^g(t)^T, \hat{X}^e(t)^T, \hat{X}^s(t)^T]^T$ буде дорівнювати розмірності вектора $\bar{X}(t)$.

Під об'єктами противника розуміються усі засоби противника, які характеризуються зміною фазових станів, мають певні динамічні властивості й використовуються для протидії бойовому застосуванню групи. Це, наприклад, стаціонарні або рухомі засоби протиповітряної оборони, засоби виявлення, наведення, радіоелектронної протидії тощо.

До об'єктів середовища відносяться інші об'єкти (сутності), які не протидіють, але впливають на процес застосування. Наприклад, властивості повітряного простору, нейтральні навігаційні об'єкти тощо.

Процедура агрегації – виділення зі складної макросистеми окремих об'єктів, встановлення зв'язків між ними, є ефективною але тривіальною процедурою в теорії автоматичного керування. Саме вона дає змогу навести певний лад у складних процесах, виділити важливі для формування управління об'єкти та абстрагуватися від впливу другорядних і неважливих взаємозв'язків.

У замкненому контурі автоматичного керування групою (рис. 1) фазовий стан БпЛА, об'єктів противника, зовнішнього середовища $\bar{X}(t)$ вимірюється системою датчиків, вектор вимірювань $\bar{Y}(t)$ опрацьовується в інформаційно-

вимірювальній системі та формується вектор оцінок стану $\hat{X}(t)$, який разом із цільовими установками дає змогу сформувати m -мірний вектор керування $\bar{U}(t)$ відповідно до рівняння (7).

Замкненість запропонованого контуру формування керування апаратами групи (рис. 1) полягає в тому, що для забезпечення його функціонування необхідна тільки інформація про БпЛА групи, про об'єкти противника, зовнішнього середовища (їх фазові стани та динамічні властивості) та про цільові установки застосування групи БпЛА. Немає необхідності в залученні додаткових відомостей для формування керування апаратами групи, яке буде мінімізувати заданий критерій виду (5).

Ця важлива властивість запропонованого замкненого контуру формування управління обмежує коло джерел інформації, яка необхідна для автоматичного керування групою БпЛА та фактично визначає зміст бази даних системи управління груповим застосуванням БпЛА.

Побудова замкненого контуру управління групою (рис. 1) в рамках методології синтезу сепарабельного оптимального (субоптимального) керування складними об'єктами потенційно дає змогу формувати автоматичне керування апаратами групи із заданою якістю, навіть в умовах суттєвої нелінійності, нестаціонарності та апіорної невизначеності процесів.

Відповідно до цього для здійснення цілеспрямованого керування апаратами групи в реальних бойових умовах (умовах суттєвої нелінійності, нестаціонарності та апіорної невизначеності процесів) база даних системи управління обов'язково повинна містити інформацію чотирьох видів, а саме:

- інформацію про БпЛА групи;
- інформацію про об'єкти противника;
- інформацію про об'єкти зовнішнього середовища;
- інформацію про цільові установки застосування групи.

Відповідно до цього пропонується концептуальна (інфологічна) модель даних для управління груповим застосуванням БпЛА у вигляді чотирьох основних блоків даних: БпЛА групи, об'єкти противника, об'єкти зовнішнього середовища, цільові установки застосування групи (рис 2.).

Кожний із зазначених блоків, у свою чергу, розподіляє дані за конкретними об'єктами – БпЛА, об'єктами противника, середовища та цільовими установками.

Для формування керування (7) за умови мінімізації критерію якості (5) необхідна

інформація про оцінку фазового стану БпЛА групи $\hat{X}^g(t)$, об'єктів противника $\hat{X}^e(t)$, об'єктів середовища $\hat{X}^s(t)$, динамічних параметрів БпЛА, об'єктів противника та об'єктів середовища, які в моделі визначені як “властивості”. Також для формування керування $\bar{U}(t)$ необхідні дані про бажаний програмний режим функціонування (матричний коефіцієнт підсилення автоматичних регуляторів $\Lambda_i(\bar{X}, t)$, вектор бажаних (заданих) фазових траєкторій $\bar{X}^*(t)$ та відповідний їм

умовний оператор $\Psi_i(\bar{X}, t)$), які становлять зміст блоку інформації про цільові установки застосування.

Концептуальна модель даних, що пропонується, має власні важливі особливості.

По-перше, вона дасть змогу формувати керування апаратами групи як у режимі централізованого керування, так і у випадку автономного функціонування окремих апаратів (режим децентралізованого керування).

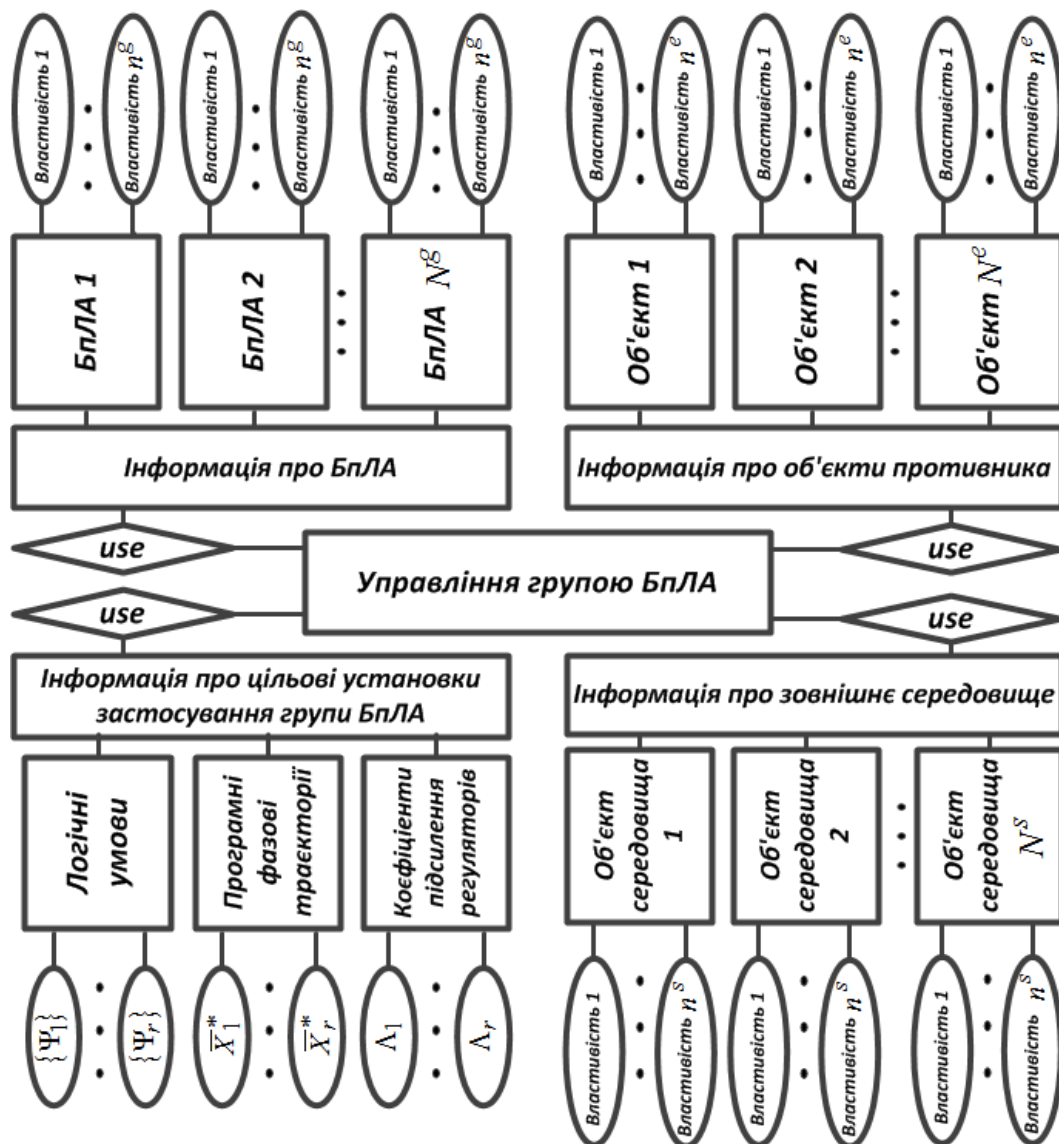


Рис. 2. Схема концептуальної моделі даних для управління груповим застосуванням БпЛА у нотації Чена
Джерело: розроблено авторами

Ця властивість є наслідком принципу формування сепарабельного керування (7), у якому процеси формування оцінки вектора фазового стану $\hat{X}(t)$, матричного коефіцієнту підсилення автоматичних регуляторів $\Lambda_i(\bar{X}, t)$ та умовного оператора

$\Psi_i(\bar{X}, t)$ є непов'язаними (сепарованими) і, принципово, припускають реалізацію в різних місцях (“на борту” БпЛА, у наземному пункті управління).

По-друге, у ній усі властивості “прив’язані” до

об'єктів, тобто існує можливість однозначного звернення до всіх відомостей без необхідності введення додаткових адрес або покажчиків. Ця особливість є наслідком реалізації принципу агрегації об'єкту керування.

По-третє, універсальним ідентифікатором усіх записів даних є час, який може розглядатися як первинний ключ. Рішення диференційного рівняння Беллмана (4) для отримання вектора керування $\bar{U}_i(t)$ потребує обробки відомостей тільки для часу t (без використання передісторії процесів). Але формування сепарабельного керування нелінійними нестационарними недетермінованими об'єктами $\bar{U}(t)$ у вигляді суперпозиції умовних варіантів управління лінійними стаціонарними детермінованими об'єктами $\bar{U}_i(t)$ у загальному випадку може потребувати знання передісторії

процесів (даних для часу $t - \Delta t$). Це підтверджує універсальність часу як ідентифікатора всіх записів даних у моделі, що пропонується (рис. 2).

Зазначені особливості запропонованої концептуальної моделі даних (рис. 2) не обмежують варіанти її реалізації. Не існує принципів заперечень проти можливості її реалізації у форматі мережевої (ієрархічної) або об'єктно-орієнтованої організації бази даних.

При цьому найбільш доцільним і природним є реляційний принцип організації даних, де властивості об'єктів (відомості про їх фазовий стан та параметри) можна розглядати як атрибути реляційної організації даних, повний набір атрибутів для певного часу – як кортеж даних, а сукупність усіх кортежів для всіх атрибутів як відношення реляційної організації даних (рис. 3).

Час	Інформація про БпЛА				Інформація про противника				Інформація про зовнішнє середовище				Інформація про цільові установки застосування групи БпЛА			
	Властивість	Властивість	•	Властивість	Властивість	Властивість	•	Властивість	Властивість	Властивість	•	Властивість	Логічні умови	Програмні фазові траєкторії	Коефіцієнти підсилення регуляторів	
t-Δt																
t																
t+Δt																

Рис. 3. Схема взаємозв'язків даних у рамках запропонованої моделі

Джерело: розроблено авторами

Природні взаємозв'язки даних у рамках запропонованої моделі, логічність визначення атрибутів, кортежів і відношень даних вказують на доцільність її реалізації у форматі реляційної бази даних.

Запропонована концептуальна модель даних системи управління груповим застосуванням БпЛА (рис. 2) враховує необхідну структуру відомостей для формування керування БпЛА групи, але не визначає їх необхідний обсяг. Питання обмеження необхідної кількості об'єктів, насамперед, N^e та N^s , кількості властивостей n^g , n^e , n^s є визначальними для подальших етапів розробки бази даних. Саме ці параметри визначають інформаційну достатність (повноту) бази даних у випадку, що розглядається.

Для оцінки інформаційної достатності (повноти) моделі даних на етапі концептуального проектування пропонується застосувати критерії спостережуваності та керованості, які сформовані для дослідження можливостей синтезу керування у сучасній теорії автоматичного керування.

Під керованістю замкнутого контуру розуміється здатність виробити такі впливи, які здатні забезпечити досягнення цілі управління в заданих умовах функціонування. Під спостережуваністю замкнутого контуру розуміється здатність оцінити фазовий стан об'єкта керування за наявними вимірюваннями в заданих умовах функціонування.

Для забезпечення повної керованості замкнутого контуру (рис. 1) необхідно, щоб виконувалась умова [7]:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} B: & A \cdot B: & A^2 \cdot B & \dots & A^{m-1} \cdot B \end{bmatrix} = m, \quad (8)$$

для забезпечення повної спостережуваності замкнутого контуру автоматичного керування необхідно, щоб виконувалась умова [7]:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} H^T: & A^T H^T: & (A^T)^2 H^T & \dots & (A^T)^{m-1} H^T \end{bmatrix} = m. \quad (9)$$

$$= n^g N^g + n^e N^e + n^s N^s$$

Виконання умов (8, 9) для певного набору

відомостей запропонованої концептуальної моделі даних свідчить про її достатність для формування керування із заданою якістю (5). Навпаки, порушення зазначених умов потребує внесення змін у зміст моделі, зміни кількості об'єктів, розгляду додаткових властивостей, що їх характеризують.

Як інший варіант оцінки інформаційної достатності (повноти) моделі даних пропонується розглянути застосування графової форми критеріїв (8, 9).

Розглянемо неорієнтований граф $\Gamma = \{V, E\}$, де $\{V\}$ – множина вершин графу, яка відповідає компонентам векторів стану $\bar{X}(t)$, вимірювань $\bar{Y}(t)$ та управлінь $\bar{U}(t)$ макросистеми “група БпЛА – об’єкти противника – зовнішнє середовище – цільові установки бойового застосування”; $\{E\}$ – множина дуг графа, які відповідають наявності функціонального зв’язку між компонентами векторів $\bar{X}(t)$, $\bar{Y}(t)$, $\bar{U}(t)$, тобто

$$\begin{cases} \{E\} = \{(X_i, Y_j), \dots, (Y_j, U_k), \dots, (U_k, X_i)\} \\ i = [1, \dots, n^g N^g + n^e N^e + n^s N^s] \\ j = [1, \dots, l^g N^g + l^e N^e + l^s N^s] \\ k = [1, \dots, m] \end{cases}$$

У цьому випадку наявність у графі шляху $\alpha = (X_1, \dots, X_i, Y_1, \dots, Y_j, U_1, \dots, U_k)$, який буде включати всі компоненти векторів $\bar{X}(t)$, $\bar{Y}(t)$, $\bar{U}(t)$, буде свідчити про інформаційну достатність (повноту) моделі даних для керування апаратами групи із заданою якістю. При цьому справедливим буде зворотне твердження — відсутність такого шляху буде вказувати на неповну інформаційну достатність (повноту) моделі даних і на необхідність внесення відповідних змін.

Приклад структури неорієнтованого графа інформаційно повної моделі даних представлений на рис. 4.

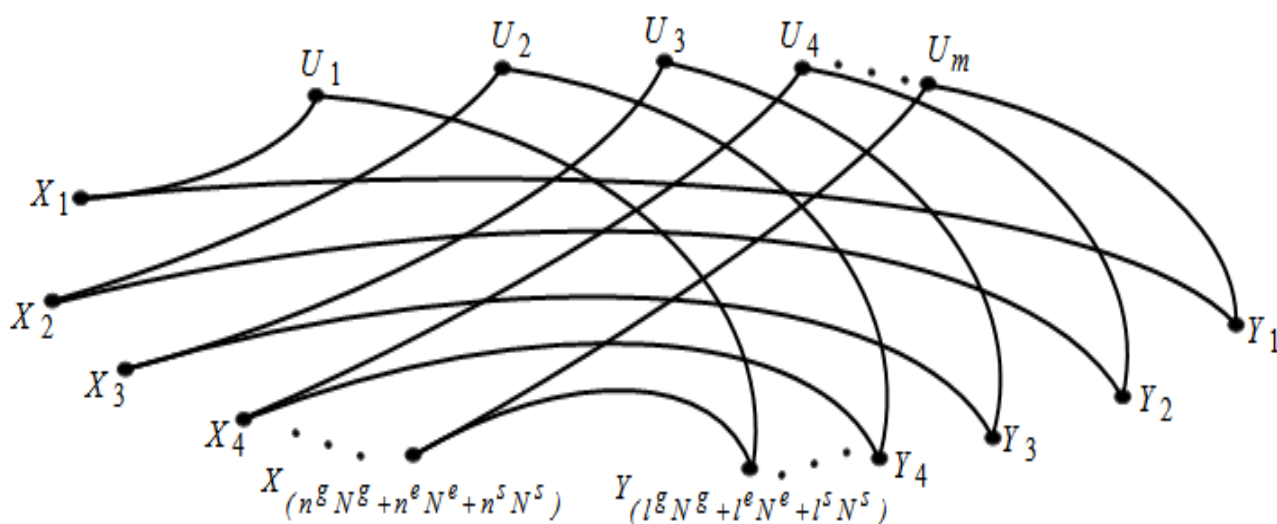


Рис. 4. Структура неорієнтованого графа зв’язків інформаційно повної моделі даних системи управління групою БпЛА

Джерело: розроблено авторами

Наявність шляху графа, який з’єднує всі вершини, свідчить про виконання умов повної спостережуваності та керованості системи, що розглядається. Фізичний зміст такого шляху полягає в тому, що він вказує на принципову можливість виміряти фазовий стан системи та сформувати таке керування, яке здатне вплинути на цей фазовий стан.

Наявність такого шляху в неорієнтованому графі еквівалентно присутності не менш ніж трьох одиниць (не менш ніж одна одиниця для вершин X_i , не менш ніж одна одиниця для вершин Y_j , не менш ніж одна одиниця для вершин U_k)

у кожному стовпці та рядку суміжної матриці графа. Це дасть змогу звести процедуру перевірки до формування матриці суміжності та обчислення кількості одиничних елементів в її рядках і стовпцях.

Слід зазначити, що процедури пошуку рангу складових матриць та аналізу суміжних матриць графів добре алгоритмізовані й на сьогодні ефективно реалізуються стандартними засобами.

Кількість елементів у суміжній матриці графа для випадку, що розглядається, буде складати $(n^g N^g + n^e N^e + n^s N^s + l^g N^g + l^e N^e + l^s N^s + m)^2$.

Складова матриця оцінки спостережуваності

замкненого контуру буде мати $(l^g N^g + l^e N^e + l^s N^s) \cdot (n^g N^g + n^e N^e + n^s N^s)^2$ елементів, складова матриця оцінки керованості буде мати $m(n^g N^g + n^e N^e + n^s N^s)^2$ елементів.

Поліноміальний характер залежності кількості елементів зазначених матриць від кількості компонентів векторів $\bar{X}(t)$, $\bar{Y}(t)$, $\bar{U}(t)$, кількості БпЛА N^g , кількості об'єктів противника N^e та середовища N^s , відсутність факторіальних та експоненціальних залежностей свідчать про можливість проведення практичної оцінки інформаційної достатності (повноти) стандартними розрахунковими засобами. Це дасть змогу на етапі проєктування забезпечити інформаційну достатність (повноту) бази даних для здійснення цілеспрямованого керування апаратами групи.

Відповідність запропонованої концептуальної моделі даних базовим положенням сучасної теорії автоматичного керування є головною передумовою її здатності здійснювати керування апаратами групи в реальних умовах бойового застосування (в умовах суттєвої нелінійності, нестаціонарності, апіорної невизначеності процесів).

Висновки

1. Теоретичним базисом розробки концептуальної моделі даних системи управління

груповим застосуванням БпЛА доцільно розглядати методологію оптимізації керування складними розподіленими суттєво нелінійними нестаціонарними об'єктами в умовах апіорної невизначеності.

2. Для забезпечення необхідної якості керування групою БпЛА в реальних умовах (умовах суттєвої нелінійності, нестаціонарності та апіорної невизначеності процесів) концептуальна модель даних системи управління повинна містити інформацію про оцінку параметрів і фазового стану БпЛА групи, об'єктів противника, зовнішнього середовища та про цільові установки бойового застосування групи.

3. Оцінку інформаційної достатності (повноти) концептуальної моделі даних системи управління груповим застосуванням БпЛА пропонується проводити з використанням критеріїв повної спостережуваності та керованості замкненого контуру управління у ранговій або графовій формі.

4. Запропонована концептуальна модель даних відповідає вимогам реляційної організації з часом як первинний ключ.

Наступним етапом подальших досліджень у цьому напрямі є реалізація логічного (дatalogічного) та фізичного проєктування бази даних системи управління групою БпЛА. При цьому підтвердження адекватності запропонованої концептуальної моделі доцільно провести методом імітаційного моделювання.

Список літератури

1. Мосов С.П. Роїння дронів військового призначення: реалії та перспективи // 36. наук. пр. Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ. – 2024. – № 1 (80). – С. 77–86.
2. Горбулін В.П., Мосов С.П. Рої дронів – кульмінація дронізації воєн. // Вісн. НАН України. – 2024. – № 3. – С. 3–11.
3. Wu Chen, Jiayi Zhu, Jiajia Liu, Hongzhi Guo. A fast coordination approach for large-scale drone swarm. // Journal of Network and Computer Applications. – 2024. – Vol. 221. URL: <http://surl.li/gsqkis>. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103769>
4. Muhammad Mubashir Iqbal, Zain Anwar Ali, Rehan Khan and Muhammad Shafiq. Motion Planning of UAV Swarm. // Recent Challenges and Approaches. – 2022. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/82985>. DOI: 10.5772/intechopen.106270.
5. Шовкошитний І.І., Василенко О.А. Розроблення логіко-часової моделі ройового застосування ударних безпілотних літальних апаратів з урахуванням типових способів їх групового застосування в сучасних умовах. // Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України. – 2024. – № 3(83). – С. 108–116.
6. Мартинюк О.Р. Модель узгодженого руху групи безпілотних літальних апаратів // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К: НУОУ, 2016. – № 1 (25). – С. 78–81.
7. Kharchenko O.V., Artushin L.M., Kononov O.A. Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles // 36. наук. праць ДНДІА. – 2022. – № 18(25). – С. 7–13. DOI: 10.54858/dndia.2022-18-1
8. Шовкошитний І.І., Василенко О.А. Проблемні питання ройового застосування ударних безпілотних літальних апаратів // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К: НУОУ, 2023. – № 3(48). – С. 27–34. DOI: <http://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-48-3-27-34>
9. Артюшин Л.М., Герасименко В.В., Коваль В.В. Метод формування спільної авіаційної групи // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К: НУОУ, 2021. – № 1(40). – С. 63–68.
10. Артюшин Л.М., Кононов О.А., Герасименко В.В., Наусенко Б.Ю. Метод вибору варіанта реалізації групового застосування безпілотних літальних апаратів // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К.: НУОУ, 2022. – № 2(44). – С. 10–20.
11. Артюшин Л.М., Герасименко В.В., Єрко В.Б., Наусенко Б.Ю. Дослідження процесів керування авіаційними бойовими порядками різних структур // Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”, Том 11, № 5 (2021). – С. 221–234.

12. Van Nguyen L., Phung M.D., Ha Q.P. Game Theory-Based Optimal Cooperative Path Planning for Multiple UAVs. // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 108034–108045. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3213035
13. Житецький Л.С. Методи управління і оцінювання в умовах невизначеності // Проблеми керування та інформатики. – 2023. – № 5. – С. 47–63.
14. Trystan A., Hurin I., Matiushchenko O. Multi-Agent group application model of unmanned aircrafts and unmanned ground vehicles during special mission execution. // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – P. 154–164.
15. Tongtong Chen, Fuyong Wang, Meiling Feng, Chengyi Xia, Zengqiang Chen Fully distributed consensus of linear multi-agent systems via dynamic event-triggered control // Neurocomputing. – Volume 569. – 2024. – 127129, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.127129> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231223012523>)
16. X. -A. Wang, G. -J. Zhang, B. Niu, D. Wang and X. -M. Wang Event-Triggered-Based Consensus Neural Network Tracking Control for Nonlinear Pure-Feedback Multiagent Systems With Delayed Full-State Constraints // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. doi: 10.1109/TASE.2023.3341845
17. Khudov H., Oleksenko O., Lukianchuk V., Herasymenko V., Yaroshenko Y., Ishchenko O., Ikaiev D., Golovchenko O., Volobuiev A., Drob Y., Solomonenko Y., Khizhnyak I. The determining the flight routes of unmanned aerial vehicles groups based on improved ant colony algorithms. The determining the flight routes of unmanned aerial vehicles groups based on improved ant colony algorithms // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2021. – Vol. 11, Issue 9. – P. 23– 32. https://doi.org/10.46338/ijetae0921_03
18. Гурін І., Матвеев Л. Мультиагентна модель пункту управління групою безпілотних літальних та наземних апаратів при виконанні спеціальних місій // Випробування та сертифікація. – 2023. – № 1(1). С. 39–47. <https://doi.org/10.37701/ts.01.2023.05>
19. Погудіна О.К. та ін. Методологія формування інтелектуальної складової агентної системи рою безпілотних літальних апаратів. – Моногр.: Харків. НАУ ім. М. Є. Жуковського “ХАІ”. – 2021. – 219 с.
20. Литвин В., Угрин Д. Методи ройового інтелекту вирішення прикладних задач в геоінформаційних системах // Інформаційні системи та мережі. Вісник нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – Львів. – 2020. – Вип. 7. – С. 87–106. DOI: <https://doi.org/10.23939/sisn2020.07>
21. Артюшин Л., Кононов О., Невзгляденко Ю. Аналіз перспектив реалізації групового застосування безпілотних літальних апаратів військового призначення // Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації. – 2023. – № 19(26). – С. 42–48. DOI: 10.54858/dndia.2023-19-5
22. Журавська І.М. Гетерогенні комп’ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА. – Моногр.: Миколаїв. Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили. – 2019. 192 с.
23. Журавська І.М. Синтез маршрутів суброїв безпілотних апаратів з використанням нейронної мережі Хопфілда для обстеження територій // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 3. – С. 86–94.
24. Артюшин Л., Кононов О., Кир’янов А. Архітектура програмного забезпечення для керування групою безпілотних літальних апаратів // Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації. – 2024. – № 20(27). – С. 37–44. DOI: 10.54858/dndia.2024-20-5

Надійшла до редколегії 10.10.2025

Схвалена до друку 18.11.2025

Відомості про авторів:

Артюшин Леонід Михайлович

доктор технічних наук
професор
головний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7488-7244>

Кононов Олексій Анатолійович

доктор технічних наук
доцент
заступник начальника
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2267-9109>

Information about the authors:

Leonid Artushin

Doctor of Technical Sciences
Professor
Chief Research
of State Research Institute of Aviation
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7488-7244>

Oleksiy Kononov

Doctor of Technical Sciences
Associate Professor
Deputy Chief
of State Research Institute of Aviation
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2267-9109>

Кир'янов Артемій Юрійович

доктор філософії
асистент кафедри
Національного технічного університету України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3116-0122>

Artemii Kyrianov

Doctor of Philosophy, Ph.D
Assistant Department
of the National Technical University
of Ukraine “Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute”,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3116-0122>

Восвода Андрій Васильович

начальник науково-дослідного управління
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0004-7936-4479>

Andrii Voievoda

Head of Research Management
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-7936-4479>

**CONCEPTUAL DATA MODEL OF THE GROUP APPLICATION CONTROL SYSTEM
OF UNMANNED AERIAL VEHICLES**

L. Artushin, O. Kononov, A. Kyrianov, A. Voievoda

The issues of implementing the combat potential of groups of unmanned aerial vehicles (UAVs) are considered in the article. The scientific task of developing a conceptual data model of the UAV group control system for implementing the combat potential of this application format (the possibility of application in conditions of significant nonlinearity, non-stationarity and a priori uncertainty of processes) is considered. The reasons for the existing limitations of implementing the combat potential of group UAV use are investigated. The impossibility of eliminating them only by engineering and technical means is substantiated. The development of a conceptual data model is considered from the standpoint of the methodology of synthesis of separable optimal (suboptimal) control of complex objects as a theoretical basis. The macrosystem “UAV group – enemy objects – external environment – target installations of combat use” is considered as a subject area. A closed loop of automatic control of a UAV group for the specified macrosystem is selected. A scheme of a conceptual (infological) data model for managing group UAV use in Chen’s notation is proposed. It is substantiated that to ensure the required quality of UAV group control in real combat conditions (conditions of significant nonlinearity, non-stationarity and a priori uncertainty of processes), the conceptual data model of the control system must necessarily contain information on the assessment of parameters and phase state of the UAV group, enemy objects, the external environment and on the target settings of the group’s combat use. The data relationships within the proposed model are considered. The feasibility of relational organization of data and time as a primary key for the developed conceptual model is proved. The use of rank and graph forms of observability and controllability criteria of automatic systems to assess the information sufficiency (completeness) of the formed conceptual data model is substantiated. The possibility of practical implementation of the proposed rank and graph forms of observability and controllability criteria for assessing the information sufficiency (completeness) of the conceptual data model is proved. The results of this study are necessary for the implementation of the stages of logical (datalogical) and physical design of the database of the UAV group control system. The creation of a UAV group control system, designed to function in conditions of significant nonlinearity, non-stationarity and a priori uncertainty of processes, is a necessary stage for solving the scientific task of implementing the combat potential of UAV groups.

Keywords: unmanned aerial vehicles, group of unmanned aerial vehicles, combat use, control systems, automatic control, data base, conceptual data model.