

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ МАЛИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В УМОВАХ НЕОБХІДНОСТІ СТРУКТУРНОЇ ДИНАМІКИ

*У роботі показано, що за умови необхідності структурної динаміки автоматизованої системи управління (АСУ) групою малих безпілотних літальних апаратів (МБЛА) доцільно виділити такі типи структур: технічну, функціональну, топологічну, інформаційну, організаційну. Запропоновано за рахунок використання мультиагентних технологій уніфікувати технічну, функціональну та інформаційну структури, а шляхом застосування мережових технологій варіювати топологічну. Тоді оптимізація структури АСУ зведеться до оптимізації організаційної та підбору для неї топологічної структури. Проведено декомпозицію технічної структури АСУ групи МБЛА на функціональні складові, серед яких виділено інформаційну, навігаційну, телеметричну системи та бортову цифрову обчислювальну систему (БЦОС). Запропоновано тривірневу структуру БЦОС, що реалізує стратегічний, тактичний та виконавчий рівень управління. Наведено формальний математичний апарат для оптимізації управління груповими діями МБЛА.*

**Ключові слова:** *автоматизована система управління, групове управління, малі безпілотні літальні апарати, структурна динаміка.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** На сьогоднішній день у провідних країнах світу спостерігається підвищення зацікавленості розвитком МБЛА як військового, так і народногосподарського призначення. За своїми функціональними ознаками МБЛА належить до досить великого класу керованих об'єктів – активних рухомих об'єктів, відмінною рисою яких є переміщення в просторі, функціонування встановленої на них апаратури й у результаті активна взаємодія з навколишнім середовищем. Взаємодія виражається в інформаційному, енергетичному або речовинному обміні об'єкта із середовищем. У переважній більшості випадків функція обміну є основною, її зміст відображає цільове призначення об'єкта. Спільне взаємообумовлене виконання всіх трьох функцій (переміщення в просторі, зміна стану апаратури й обмін із середовищем) визначає загальні якості об'єктів даного класу як об'єктів управління, а основні специфічні властивості окремих видів об'єктів визначаються можливостями й особливостями реалізації зазначених функцій. Це обумовлює головні аспекти розгляду питань функціонування МБЛА й управління ними.

Поряд з використанням поодиноких МБЛА в даний час широкого застосування набули системи МБЛА. Особливість управління системою однотипних об'єктів визначена тим, що нормальне її функціонування можливе лише при нормальній роботі всіх МБЛА, що входять до неї, і тим, що на початковому етапі необхідно створити задану конфігурацію системи, а потім її підтримувати. У зв'язку з цим на етапі створення системи

об'єктом управління є кожний МБЛА окремо, а на етапі її використання – уся система в цілому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні роки розв'язанню задач групового управління присвячено досить велику кількість наукових праць як в Україні [1–6], так і за її межами [7–15]. Їх аналіз показує, що можна виділити два основні напрями щодо постановки та вирішення проблем групового управління: авіаційний та робототехнічний. Більшого розповсюдження набув робототехнічний підхід, у якому МБЛА розглядають як інтелектуальні літальні роботи з «шістьма степенями свободи», що здатні доставляти корисне навантаження до віддаленого чи небезпечного об'єкта, де можуть виконуватися різні цільові завдання, такі як: розвідка, спостереження, біохімічний сенсоринг тощо [8, 11]. Це більш загальний підхід, при якому аеродинамічні властивості МБЛА в основному переводять у розряд обмежень та допущень, а питання управління розглядають як проблеми групового управління мобільними (літальними) роботами. У рамках даного підходу вирішено низку проблем управління МБЛА в стаціонарних і нестационарних середовищах [1, 3, 8] та розроблено основні стратегії управління. Однак проблемі побудови систем управління МБЛА в умовах, коли необхідно об'єднати декілька різнотипних груп чи, навпаки, оптимально розділити велику групу на малі для виконання різних завдань, увага фактично не приділялася.

**Формулювання завдання дослідження.** Відсутність загальної методології вирішення завдань, що виникають під час групового управління МБЛА в умовах необхідності структурної динаміки, зумовлює важливість розробки ефективних принципів, методів і структур групового управління. Однією з таких наукових проблем є синтез структури АСУ МБЛА, вирішенню якої і присвячена дана робота.

**Виклад основного матеріалу.** Розробка будь-яких технічних систем тісно пов'язана з необхідністю розв'язку задач аналізу та синтезу. Як і решту технічних систем, АСУ групою малих літальних апаратів можна подати у такому вигляді:

$$W = \langle \Sigma, X \rangle, \quad (1)$$

де  $\Sigma$  – структура АСУ;

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – параметри системи управління.

Критерій якості функціонування АСУ можна задати у вигляді функціонала  $\Phi = \Phi(W, Q)$ , де  $Q$  – умови експлуатації системи.

Тоді завдання синтезу зводиться до розв'язку задачі оптимізації:

$$\Phi(W, Q) \rightarrow \underset{W \in \Omega_W}{extr} W_Q^0, \quad (2)$$

де  $\Omega_W$  – припустима множина, у рамках якої може варіюватися об'єкт;

$W_Q^0$  – система, оптимальна для умов  $Q$ .

Завдання синтезу допускає декомпозицію на параметричну й структурну складові:

$$\Phi(\Sigma, X, Q) \rightarrow \underset{S \in \Omega_S}{extr} \underset{X \in \Omega_X}{extr} S_Q^0 X_Q^0, \quad (3)$$

де  $\Omega_X$  – множина припустимих параметрів;

$\Omega_S$  – множина припустимих структур.

Таким чином, синтез технічної системи управління містить у собі дві основні частини: формування структури системи (структурний синтез) і вибір значень внутрішніх параметрів (параметричний синтез) [5].

Розробка системи починається з формування структури. Для обраного варіанта структури будується математична модель системи управління і вибираються вхідні (початкові) значення параметрів, при яких перевіряються умови працездатності. У разі їх невиконання значення внутрішніх параметрів коректуються; при цьому природно спробувати знайти такі їхні значення, за яких умови працездатності виконуються з найбільшою ймовірністю.

Нехай  $\mathfrak{R}$  – група, яка включає  $N$  МБЛА, функціонує у деякому певному середовищі  $E$ . Введемо вектор-функції від часу  $S(t)$ , що буде описувати стан цієї групи, а  $E(t)$  – стан середовища. Щоб досягнути визначеної групової мети групі МБЛА слід виконати певні дії, які мають бути оптимально узгоджені чи скоординовані. Тому група МБЛА повинна мати деяку систему групового управління (СГУ), призначену для формування таких керівних впливів, кожен з яких спонукає до якоїсь конкретної дії окремого апарата групи, що в сукупності забезпечить оптимальне досягнення групової мети за деяким груповим критерієм. Вектор керівних впливів (дій МБЛА) назвемо  $A(t)$ .

У найбільш загальному виді процес управління можна подати у вигляді рис. 1.

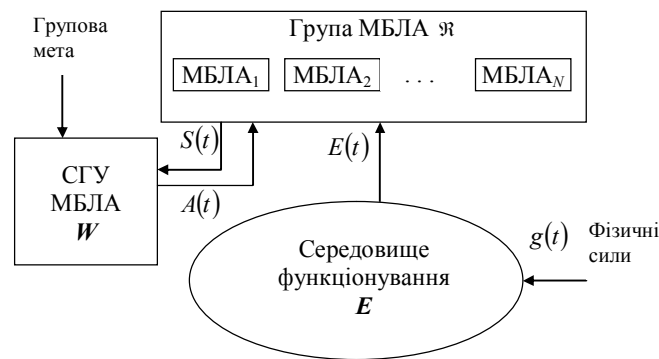


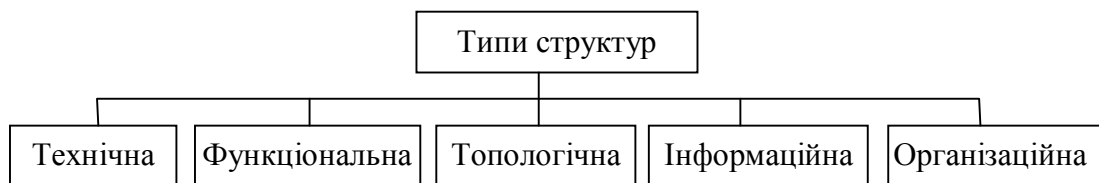
Рис. 1. Узагальнена схема управління групою МБЛА

Тоді відповідно до (3) задача структурного синтезу системи полягає в оптимізації її структури та функціональних зв'язків між елементами  $\Sigma$ ,  $E$ ,  $\mathfrak{R}$  за якимось обраним критерієм.

Однією з основних особливостей сучасних групових систем МБЛА є те, що їх параметри та структури можуть змінюватися під дією об'єктивних і суб'єктивних причин. Наприклад, до складу групи можуть входити різні типи апаратів з різноманітними можливостями (гетерогенна група), чи для виконання поточного завдання достатньо 2-3 МБЛА, а не все угруповання тощо. Інакше кажучи, на практиці ми постійно будемо зустрічатися із структурною динамікою АСУ групи МБЛА. Під структурною динамікою

будемо розуміти процес переходу структури (чи елементів) АСУ з одного заданого стану в інший під дією різноманітних причин (внутрішніх, зовнішніх, об'єктивних, суб'єктивних тощо) [14]. За цих умов для підвищення (збереження) рівня працездатності й можливостей АСУ або забезпечення найкращих умов функціонування зазначених систем необхідно здійснювати керування їх структурами.

Під структурою системи будемо розуміти характеристику стійких зв'язків і способів взаємодії елементів системи, що визначає її цілісність, будову, основи її організації [1]. Щодо АСУ групи МБЛА будемо, у першу чергу, розрізняти такі основні типи структур: структуру цілей, функцій і завдань; організаційну; технічну; топологічну; структуру інформаційного забезпечення АСУ (рис. 2).



*Рис. 2. Типи структур в АСУ*

Технічна структура розкриває основні технічні елементи, необхідні для здійснення управління.

Функціональна структура відображає функціональні зв'язки і взаємодію між елементами при досягненні цілей і виконанні завдань.

Інформаційна структура розкриває шляхи потоків інформації та взаємозв'язок елементів системи, які збирають, обробляють, передають і використовують інформацію. Від неї вимагається забезпечити інформаційну єдність системи.

Топологічна структура визначає розташування елементів системи в просторі, необхідне для виконання її функцій. Оскільки МБЛА в ході виконання завдань рознесені й рухаються в просторі, то топологічна структура буде постійно змінюватися.

Організаційна структура визначає адміністративний поділ і підпорядкованість у системі. Для організації систем управління групами МБЛА доцільно використовувати деякі загальні стратегії, застосовувані у всіх технічних, соціальних і природних групах, такі як: централізоване, децентралізоване та змішане управління.

Стратегії централізованого управління поділяють на єдиноначальні та ієрархічні [9].

Єдиноначальне управління передбачає наявність у групі командира або центрального пристрою управління (ЦПУ), які виконують функції планування й управління групою. Його перевагою є простота організації й алгоритмізації. До недоліків слід віднести тривалий час ухвалення рішення через розв'язок одним ЦПУ завдання оптимізації всіх членів групи для досягнення групової мети та низьку живучість.

Ієрархічне управління передбачає наявність ЦПУ або командира, які керують невеликою кількістю підлеглих, у підпорядкуванні кожного з них знаходиться своя група об'єктів управління. При цьому, порівняно з єдиноначальним, суттєво спрощується завдання, що вирішується окремим командиром або ЦПУ, однак ускладнення структури управління може призвести до затримок або збоїв у передачі команд від верхнього до нижнього рівня.

Стратегії децентралізованого управління поділяють на колективне та зграйне [8].

Коллективне управління передбачає, що в системі немає командира або ЦПУ, усі апарати рівноцінні й кожний член групи самостійно ухвалює рішення, намагаючись зробити максимально можливий внесок у досягнення групової мети, при цьому усі обмінюються інформацією про обрані дії один з одним. За рахунок того, що кожний апарат вирішує завдання оптимізації тільки для себе, а не намагається скоординувати дії всієї групи, оптимізація суттєво спрощується, тому завдання може виконуватися швидко, у реальному часі. Але це дуже ускладнює алгоритмізацію й вимагає від апаратів високого «інтелектуального рівня», тому що вони повинні чітко розуміти групове завдання й уміти обирати такі дії, які приводять до найкращого його виконання з погляду всієї групи.

При зграйному управлінні в системі немає командира або ЦПУ, усі одиниці рівноцінні й кожний апарат самостійно ухвалює рішення, намагаючись зробити максимально можливий внесок у досягнення групової мети, однак при цьому обміні інформації між членами групи немає і кожний об'єкт координує свої дії на підставі непрямой інформації, слідкуючи за діяльністю інших.

При розробці оптимального методу групового управління необхідно визначитися з критерієм ефективності. Відповідно до обраного критерію можливий різний характер динаміки ефективності АСУ залежно від кількості об'єктів управління. Дослідження [3, 9] показують, що в загальному випадку ефективність (розглянута як час на прийняття групового рішення) змінюється в такий спосіб (рис. 3).

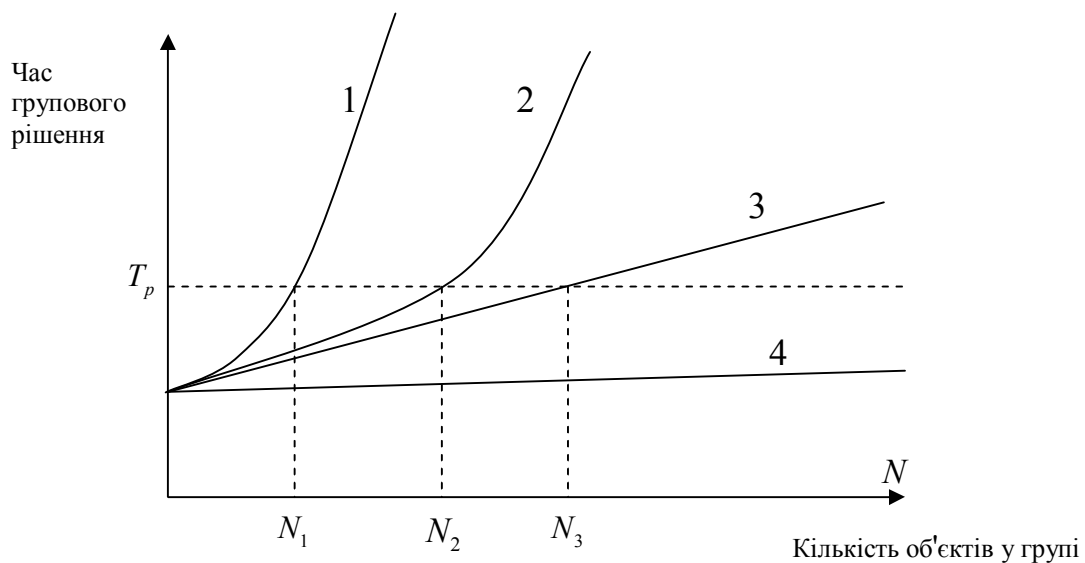


Рис. 3. Час групового рішення при різних стратегіях управління:

- 1 – стратегія єдиноначального управління; 2 – стратегія ієрархічного управління;  
3 – стратегія колективного управління; 4 – стратегія зграйного управління

При централізованій єдиноначальній стратегії ЦПУ приймає оптимальне рішення і час на його прийняття експоненційно залежить від кількості  $N$  об'єктів у групі. У цьому разі можливо отримати найкраще рішення, оскільки ЦПУ виконує оптимізацію усіх групових дій у цілому.

При ієрархічній – час на прийняття рішення зменшується за рахунок розбиття завдання на підзавдання, які вирішують окремі підгрупи.

При децентралізованій колективній – кожен об'єкт групи приймає рішення самостійно та інформує інших про свої наміри для оптимізації спільних дій, тому час на прийняття рішення лінійно зростає залежно від  $N$ .

У зграйній стратегії досягається найменший час прийняття рішення, оскільки кожен МБЛА групи самостійно його приймає, базуючись лише на непрямих ознаках, тому цей час слабо залежить від  $N$ . Однак зрозуміло, що виграш у часі досягається за рахунок погіршення якості виконання завдання [9]. Відповідно, найвищу якість отримуємо при використанні єдиноначального управління.

Спираючись на рис. 3, можна визначити той тип стратегії, який є найбільш оптимальним у конкретному випадку. Для цього треба знати необхідний час групового розв'язку  $T_p$  і кількість об'єктів у групі. Наприклад, якщо відомо  $T_p$ , а кількість об'єктів у групі менше  $N_1$ , то краще використовувати централізовану стратегію, оскільки вона забезпечує найбільш якісний результат. Якщо (при відомому  $T_p$ ) кількість об'єктів у групі в межах від  $N_1$  до  $N_2$ , то доцільно використовувати ієрархічну систему управління. При  $N_2 - N_3$  застосування колективної стратегії суттєво зменшить часові витрати порівняно із централізованими системами управління.

У випадку, коли кількість об'єктів у групі більше  $N_3$ , а час  $T_p$  обмежений, то доцільним буде використання зграйної системи управління, тому що в цьому разі час прийняття рішення практично не залежить від кількості МБЛА. У свою чергу, значення  $T_p$  залежить від умов  $Q$ , у яких повинна функціонувати група. Якщо вони детерміновані й у групі практично не накладається обмеження на час вирішення завдання, то можна заздалегідь скласти програму й закласти її у пам'ять кожного об'єкта групи.

За умови, що ситуація змінюється повільно, наприклад, при складанні карти місцевості, більш прийнятним буде використання ієрархічної стратегії, коли із ЦПУ надходять команди (завдання) для окремих груп МБЛА, кожна з яких має свого локального командира, що здійснює управління всередині групи. Якщо ситуація змінюється дуже швидко, як у випадку бойових дій, то рішення про групові дії необхідно ухвалювати миттєво, найчастіше не звертаючи уваги на якість, у цьому разі підходить одна зі стратегій децентралізованого управління: колективна або зграйна.

Практична реалізація розглянутих вище стратегій групового управління зумовлює необхідність реалізації на одній функціональній базі за різних умов і різної організаційної структури АСУ (єдиноначальної, ієрархічної, колективної чи зграйної).

Таким чином, з проведеного аналізу випливає, що при синтезі АСУ МБЛА необхідно на основі інформаційної та функціональної єдності структури АСУ забезпечити можливість реалізації оптимальних організаційних та топологічних структур для гетерогенних груп МБЛА. У даному разі «гетерогенність» означає наявність у групі різних за технічною структурою та можливостями (платформами) МБЛА.

Для вирішення цього завдання пропонується розробити АСУ як мережеву мультиагентну систему. При такому підході її основні структурні елементи є «програмною сутністю» – мультиагентами. Це дозволить стандартизувати ієрархію управління та забезпечить швидку адаптацію системи до умов функціонування шляхом зміни топологічної та організаційної структури.

Розробимо функціональну структуру АСУ групи МБЛА, для цього проведемо декомпозицію узагальненої схеми управління на підсистеми та виділимо бортову і наземну частини.

Під управлінням окремим МБЛА будемо розуміти процес цілеспрямованої зміни його стану з метою успішного виконання ним завдань за цільовим призначенням [2]. Стан МБЛА характеризується: місцезнаходженням, параметрами руху, поточним значенням показників працездатності та якістю розв'язання задач бортовою спеціальною апаратурою. Метою управління окремим МБЛА є досягнення необхідних інтегральних або локальних значень вихідного ефекту, обумовленого його призначенням.

Тоді в складі загальної функціональної структури МБЛА (рис. 4), функціональну структуру бортового комплексу управління ними доцільно розділити на бортовий цільовий та бортовий забезпечувальний комплекси.

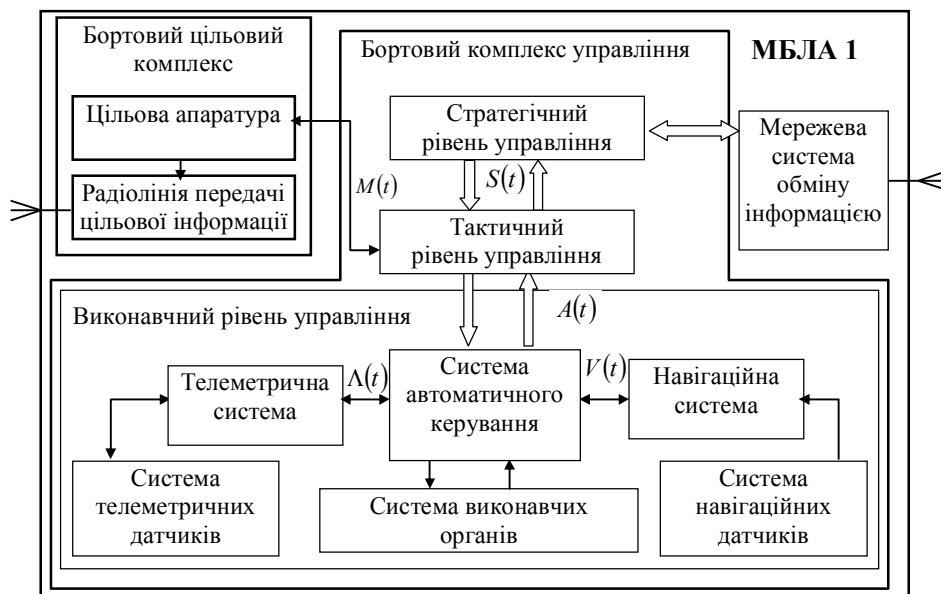


Рис. 4. Функціональна структура МБЛА

Апаратура цільового призначення (цільова апаратура) виконує головні завдання МБЛА. Її також називають основною або спеціальною апаратурою. При розв'язанні задач управління, як правило, усю цільову апаратуру об'єднують під загальною назвою «бортовий цільовий комплекс».

До забезпечувальної належить уся бортова апаратура, що не є цільовою. Її роль полягає в забезпеченні роботи цільової апаратури й у виконанні самостійних завдань, що супроводжують цільові задачі. За функціями вся службова апаратура поділяється на апаратуру загального призначення й ту, що забезпечує управління МБЛА. Остання, як правило, носить назву «бортовий комплекс управління» (БКУ). Такий розподіл зумовлений особливостями її функціонування й у зв'язку з цим особливостями управління.

Забезпечувальна апаратура загального призначення підтримує необхідні умови функціонування цільової апаратури і МБЛА в цілому, до неї належать, зокрема, системи електроживлення, терморегулювання та інші (на рис. 4 не відображено).

Апаратура БКУ виконує відносно самостійні функції. До її складу входять прилади і пристрої, що забезпечують: одержання інформації про стан МБЛА (наприклад, проведення траєкторних або телеметричних вимірів) та реалізацію управління ним. Складовими БКУ є системи: автоматичного керування, виконавчих органів (рушійні пристрої), навігації, а також телеметрична система.

Нехай поточний стан  $R$  одиночного МБЛА, відповідно до визначення процесу управління, описується векторами:

вектором навігаційних параметрів, що характеризують рух МБЛА,  $V(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)]^T$ , де  $v_i(t)$  ( $i = \overline{1, n}$ ) – координати його положення в просторі, складові вектора швидкості та кути крену, рискання і тангажа в момент часу  $t$ ;

вектором параметрів технічного стану бортової апаратури  $\Lambda(t) = [\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_h(t)]^T$ , де  $\lambda_i(t)$  ( $i = \overline{1, h}$ ) – телеметричні параметри, що характеризують працездатність апаратури та залишок ресурсів на борту в момент часу  $t$ ;

вектором, що характеризує управління цільовою апаратурою МБЛА,  $M(t) = [m_1(t), m_2(t), \dots, m_l(t)]^T$ , де  $m_i(t)$  ( $i = \overline{1, l}$ ) – наприклад, параметри, що характеризують можливості цільової знімальної апаратури МБЛА (ширина зони огляду, просторове розрізнення тощо) чи режими її роботи в момент часу  $t$ .

Для спрощення подальших викладок введемо складений вектор, що включає три попередні й має фізичний зміст загального стану МБЛА:

$$R(t) = \langle V(t), \Lambda(t), M(t) \rangle.$$

Припустимо, що МБЛА може виконувати набір дій, сукупність яких описується вектор-функцією  $A(t) = [a_1(t), a_2(t), \dots, a_v(t)]^T$ , де  $a_i(t)$  ( $i = \overline{1, v}$ ).

Оскільки МБЛА мають обмеження за масогабаритними й енергетичними показниками, це обмежує їх обчислювальні ресурси, і тому повне вирішення оптимізаційних задач на борту поки що ускладнене. Як наслідок, обчислювальні потужності БКУ доцільно розділити на три рівні: стратегічний (рівень планування загальної мети); тактичний (рівень формування траєкторії польоту); виконавчий.

Стратегічний рівень, або рівень ухвалення рішення про вибір поведінки, полягає в оперативному плануванні в реальному часі групових дій МБЛА з організацією їх взаємодії та подоланням конфліктів, що виникають, для оптимізації досягнення загальної мети. Обчислювальні ресурси стратегічного рівня у деяких випадках можуть бути задіяними для організації «хмарних» обчислень при вирішенні завдань усього угруповання.

Завданням тактичного рівня є оптимізація виконання поточної задачі для кожного з МБЛА з урахуванням обмежень і допущень, визначених на стратегічному рівні.

Виконавчий рівень системи керування самим МБЛА передбачає оптимізацію польоту та поточних завдань.

Таким чином, з'являється можливість для автономного планування траєкторії руху, реалізації позиційно-траєкторних законів управління, обробки інформації сенсорних систем та управління виконавчими пристроями.



Нехай група МБЛА  $\mathcal{R}$ , що складається з  $N$  МБЛА  $R_j$  ( $j = \overline{1, N}$ ), функціонує в деякому середовищі  $E$ . Стан кожного літального апарата  $R_j \in \mathcal{R}$  ( $j = \overline{1, N}$ ) у момент часу  $t$  описується векторною функцією  $R_j(t) = [r_{1,j}(t), r_{2,j}(t), \dots, r_{h,j}(t)]^T$ , де  $r_{i,j}(t)$  ( $i = \overline{1, h}$ ) – змінні стану  $j$ -го МБЛА. Стан усього угруповання  $\mathcal{R}$  задається вектором  $\mathcal{R}(t) = [R_1(t), R_2(t), \dots, R_N(t)]^T$ .

Кожен МБЛА  $R_j \in \mathcal{R}$  ( $j = \overline{1, N}$ ) може виконувати дії, що описуються вектором  $A_j(t) = [a_{1,j}(t), a_{2,j}(t), \dots, a_{m,j}(t)]^T$ , причому їх множина  $R_j \in \mathcal{R}$  є точкою  $m$ -мірного простору  $\{A\}_j$ .

Обмін інформацією між МБЛА забезпечується мережевою системою і може обмежуватися деякою відстанню радіусом  $D_1^3$ , його наявність чи відсутність буде визначатися цим параметром.

Наземна система (НС) управління може знаходитися на стаціонарному чи рухомому об'єкті, принципово вона відрізняється від системи управління на борту лише виконавчим рівнем управління (рис. 5). Оскільки жорстких масогабаритних і енергетичних обмежень для наземної системи управління немає, то можна реалізовувати великі обчислювальні потужності та складні оптимальні алгоритми управління. Системи аналізу можуть відслідковувати технічний стан і місцеположення кожного окремого МБЛА та, за необхідності, корегувати процес управління.

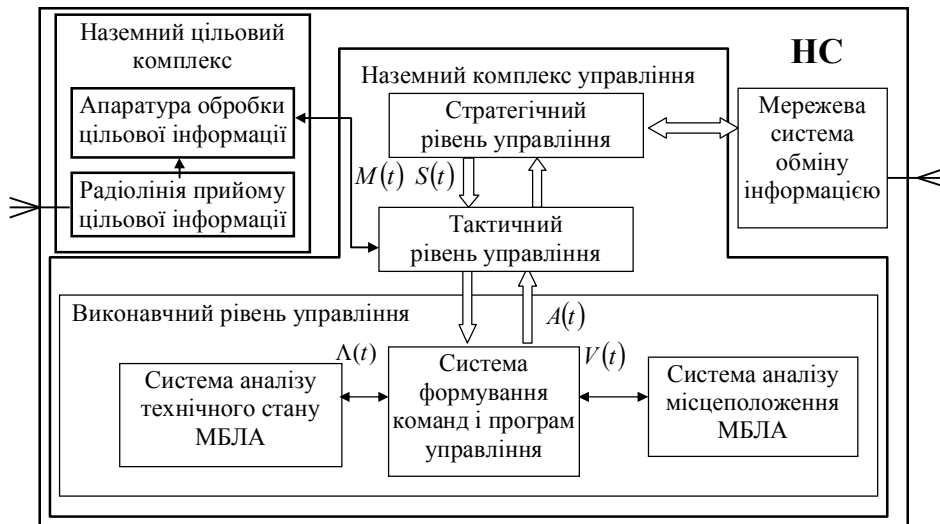


Рис. 5. Функціональна структура наземної системи управління групою МБЛА

Тривимірне зовнішнє середовище, у якому функціонує МБЛА, будемо описувати вектором  $E(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_u(t)]^T$ , де  $e_i(t)$  ( $i = \overline{1, u}$ ) – змінні параметри, що характеризують фізичні властивості середовища, наявність чи відсутність перешкод тощо. У зовнішньому середовищі знаходиться множина цілей  $G(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_M(t)]^T$ , яка характеризується певним станом кожної (виявлена – невиявлена, уражена – неуряжена, функціонує – не функціонує):  $X_G(t) = [x_{g_1}(t), x_{g_2}(t), \dots, x_{g_M}(t)]^T$ .

Стан середовища навколо  $j$ -го МБЛА  $e_j$  у момент часу  $t$  описується вектором-функцією  $E_j(t) = [e_{1,j}(t), e_{2,j}(t), \dots, e_{w,j}(t)]^T$ , де  $e_{l,j}(t)$  ( $l = \overline{1, w}$ ) – параметри ділянки середовища навколо  $j$ -го МБЛА. Тоді стан середовища, у якому функціонують МБЛА угруповання, за умови, що середовище стаціонарне, у момент часу  $t$  описується вектором  $E(t) = [E_1(t), E_2(t), \dots, E_N(t)]^T$ .

Якщо середовище нестационарне, то в ньому спостерігається вплив зовнішніх сил  $g(t)$ .

МБЛА, взаємодіючи із середовищем, утворюють систему «група МБЛА – середовище», стан якої в момент часу  $t$  описується парою  $S_c = \langle \mathcal{R}, E \rangle$ . Множина різних станів даної системи характеризується точками  $N \cdot (h + w)$ -мірного простору станів  $\{S_c\}$ . За аналогією з одиночним МБЛА під початковим і кінцевим (цільовим) станами системи «група МБЛА – середовище» розуміються

$$S_c^0 = \langle \mathcal{R}^0, E^0 \rangle, \quad S_c^K = \langle \mathcal{R}^K, E^K \rangle \quad (4)$$

відповідно.

Стан системи «група МБЛА – середовище»  $S_c^i = \langle \mathcal{R}^i, E^i \rangle$  у поточний момент часу  $\hat{t}$  назовемо поточним.

МБЛА групи  $\mathcal{R}$ , виконуючи свої дії, прагне перевести початкову ситуацію в кінцеву. Множина дій, які може виконати вся група МБЛА, є об'єднанням множин дій її окремих апаратів:  $\{A_c\} = \{A\}_1 \cup \{A\}_2 \cup \dots \cup \{A\}_N$ .

Сукупність необхідних дій  $A_j(t)$  для досягнення групової цілі і є груповим управлінням МБЛА групою  $\mathcal{R}$ . Саме ці дії  $A_j(t)$  повинні бути вироблені системою управління і виконатися  $R_j$  ( $j = \overline{1, N}$ ) МБЛА групи.

У деяких випадках для вирішення цільового завдання задіяння усієї групи може бути і не потрібне. Тоді з неї формується підгрупа МБЛА, що найбільш орієнтовані для виконання конкретних завдань. Також формування підгруп доцільне й у випадку декількох цільових завдань. Підкреслимо, що в цьому разі формування підгруп та вибір оптимальної системи управління є складовою частиною завдання групового управління, що вирішується на стратегічному рівні.

Таким чином, групу МБЛА можна ділити на підгрупи. Підгрупою будемо називати підмножину  $\Gamma$  з множини  $\mathcal{R}$ , що взаємодіє для досягнення деякої мети, а кластером – підгрупи МБЛА, об'єднані загальною метою і комунікаційними зв'язками.

Групу  $\Gamma$  МБЛА, у якій виконується умова

$$A_1 = A_2 = \dots = A_N, \quad (5)$$

будемо вважати гомогенною. Якщо хоча б один елемент рівності (5) не виконується, групу будемо вважати гетерогенною.

Дії, виконувані групою МБЛА у момент часу  $t$ , можуть бути описані за допомогою вектор-функції  $A_c(t) = [A_1(t), A_2(t), \dots, A_N(t)]^T$ .

Відповідно, зміни стану системи «група МБЛА – середовище» можна описати системою диференціальних рівнянь:

$$\dot{S}_c = f_c(S_c(t), A_c(t), g(t), t). \quad (6)$$

При цьому на ситуації, а також на дії МБЛА групи можуть накладатися деякі обмеження, аналогічні для одиночного МБЛА:

$$S_c(t) \in \{S_c^p(t)\} \subset \{S_c\} \quad (7)$$

та

$$A_c(t) \in \{A_c^p(t)\} \subset \{A_c\}, \quad (8)$$

де  $\{S_c^p(t)\}$  – множина допустимих у момент часу  $t$  станів системи «МБЛА – середовище»;

$\{A_c^p(t)\}$  – множина допустимих у момент часу  $t$  дій групи МБЛА.

Тоді з урахуванням введених вище позначень завдання групового управління застосуванням МБЛА полягає у визначенні на інтервалі  $[t_0, t_K]$  таких оптимальних дій  $\bar{A}_j(t)$  для кожного літального апарата  $R_j \in \mathcal{R}$ , які переводять систему «група МБЛА – середовище» з початкового стану в кінцеве (цільове) і за яких задовольняються система зв'язків (6), обмеження (7)–(8), а також забезпечується екстремум функціонала

$$Y_c = \Phi(S_c^K, t_K) + \int_{t_0}^{t_K} f(S_c(t), A_c(t), g(t), t) dt = \Phi(R_1^K, R_2^K, \dots, R_N^K, E^K, g(t), t_K) + \int_{t_0}^{t_K} f(R_1(t), R_2(t), \dots, R_N(t), E(t), A_1(t), A_2(t), \dots, A_N(t), g(t), t) dt. \quad (9)$$

Функціонал (9) задає мету застосування групи МБЛА та процесу управління й оцінює їх якість. Перший доданок у правій частині виразу (9) є функціоналом, що характеризує якість кінцевого стану системи «МБЛА – середовище». Другий доданок у правій частині виразу (9) оцінює якість процесу управління на усьому інтервалі часу  $[t_0, t_K]$ .

Сукупність дій  $\bar{A}_j(t)$  МБЛА, яка визначається за даних умов, є оптимальною для досягнення поставленої групової мети.

Побудова та розв'язання (9) для кожного конкретного випадку потребують уточнень наявних типів МБЛА, їх можливостей, умов функціонування та можуть бути приведені до виконання більш простих підзавдань: визначення та розподіл цілей, що стоять перед групою; формування структури групи; організація структури АСУ; управління рухом групи; оцінка результату.

**Висновки.** При синтезі АСУ групи МБЛА необхідно враховувати структурну динаміку системи, яку доцільно розділити на: технічну, функціональну, топологічну, інформаційну та організаційну. За рахунок використання мультиагентних технологій запропоновано уніфікувати технічну, функціональну та інформаційну структури. У цьому випадку оптимізація АСУ зведеться до оптимізації організаційної та підбору для неї топологічної структури. Проведено декомпозицію функціональної структури АСУ групи МБЛА на складові, що дозволяє застосовувати її для різних технічних апаратів (малі літаки, коптери та космічні апарати). Запропоновано реалізувати трирівневу структуру управління, що забезпечує стратегічний, тактичний та виконавчий рівні. Розроблено формальний математичний апарат для оптимізації управління груповими діями МБЛА.

На жаль, в обмежених рамках однієї статті не можливо розкрити питання адаптації АСУ до умов функціонування шляхом зміни топологічної та організаційної структури. Ці питання планується розглянути в наступних роботах.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Белоглазов Д. А. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Д. А. Белоглазов, А. Р. Гайдук, Е. Ю. Косенко и др. ; под ред. В. Х. Пшихопова. – М. : Физматлит, 2015. – 305 с.
2. Кравченко Ю. В. Концептуальний підхід до синтезу складних технічних систем з динамічною структурою / Ю. В. Кравченко, Р. А. Миколайчук // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К. : НАОУ, 2012. – № 2(14). – С. 44–47.
3. Каляев И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М. : Физматлит, 2009. – 278 с.
4. Пулеко І. В. Проблеми управління угрупованням малих безпілотних літальних апаратів з позицій теорії робототехнічних систем / І. В. Пулеко / Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ ДУТ, 2015. – Вип. 11. – С. 106–114.
5. Катуюева Я. В. Новые возможности параметрического синтеза технических систем. Информатика, вычислительная техника и управление / Я. В. Катуюева // Вестник ТОГУ. – 2014. – № 2 (33). – С. 45–54.
6. Беспилотные авиационные комплексы: методика сравнительной оценки боевых возможностей / М. М. Митрахович, В. И. Силков, А. В. Самков и др. ; под ред. В. И. Силкова. – К. : ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. – 288 с.
7. Kenzo Nonami. Autonomous Flying Robots. Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles / Kenzo Nonami, Farid Kendoul, Satoshi Suzuki and other. – Springer Tokyo, New York, 2010. – 348 p.
8. Карпов В. Э. Коллективное поведение роботов. Желанное и действительное / В. Э. Карпов // Современная мехатроника : сб. научн. трудов Всерос. науч. школы (г. Орехово-Зуево, 22–23 сентября 2011 г.). – Орехово-Зуево, 2011. – С. 35–51.
9. Каляев И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М. : Высшая школа, 2013. – 278 с.

10. Моисеев В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами : монография / В. С. Моисеев. – Казань : ГБУ «Республ. центр мониторинга качества образования», 2013. – 768 с.
11. Интеллектуальные роботы : учеб. пособ. для вузов / И. А. Каляев, В. М. Лохин, И. М. Макаров и др. ; под. ред. Е. И. Юревича. – М. : Машиностроение, 2007. – 360 с.
12. Абросимов В. К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде : монография / В. К. Абросимов. – М. : Изд. дом «Наука», 2013. – 168 с.
13. Охтилев М. Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. – М. : Наука, 2006. – 410 с.
14. Аналитико-имитационное моделирование структурной надежности и живучести сложных технических объектов / А. Н. Павлов, М. В. Сорокин, С. А. Осипенко, Д. А. Иванов. – М. : ИММОД, 2009. – С. 199–203.
15. Xue Ruibin. Formation Flight Control of Multi-UAV System with Communication Constraints / Ruibin Xue, Gaohua Cai // J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos. – Apr. – Jun., 2016. – Vol. 8, No 2. – P. 203–210.

Подано 21.11.2017

**И. В. Пулеко**

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОБХОДИМОСТИ СТРУКТУРНОЙ ДИНАМИКИ**

*В работе показано, что при необходимости в структурной динамике автоматизированной системы управления (АСУ) группой малых беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) целесообразно выделить следующие типы структур: техническую, функциональную, топологическую, информационную, организационную. Предложено за счет использования мультиагентных технологий унифицировать техническую, функциональную и информационную структуры, а путем применения сетевых технологий варьировать топологическую. Тогда оптимизация структуры АСУ сведется к оптимизации организационной и подбора для нее топологической структуры. Проведена декомпозиция технической структуры АСУ группы МБЛА на функциональные составляющие, среди которых выделены информационная, навигационная, телеметрическая системы и бортовая цифровая вычислительная система (БЦВС). Предложена трехуровневая структура БЦВС, которая реализует стратегический, тактический и исполнительский уровни управления. Предложен формальный математический аппарат для оптимизации управления групповыми действиями МБЛА.*

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, групповое управление, малые беспилотные летательные аппараты, структурная динамика.

**I. V. Puleko**

**STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF THE GROUP MINI UNMANNED AERIAL VEHICLES**

*It is shown, that in conditions when it is necessary to dynamically change the structure an automated control system (ACS) by a group of mini unmanned aerial vehicles (mini-UAV), it is expedient to distinguish the following types of structures: technical, functional, topological, information, and organizational. It is proposed to unify the technical, functional and information structures through the use of multi-agent technologies, and to vary the topological structure by applying network technologies. Then the optimization of the structure of the ACS will be reduced to optimization of the organizational structure and the selection of a topological structure for it. Made out the decomposition of the technical structure of the automated control system of the mini-UAV group into functional components among which the information, navigation, telemetry systems and on-board digital computer system (BCS) are allocated. A three-level structure of the BCS is proposed, which implements the strategic, tactical and executive level of control. A formal mathematical apparatus for optimizing the management of group actions of mini-UAV is given.*

**Keywords:** *automated control system, management of group, mini unmanned aerial vehicles dynamically change the structure.*