УДК 007.52

*DOI*:https://doi.org/10.20535/0203-3771492025334100

**А. С. Довгополий**[1]**,** *д.т.н., професор,* **А. В. Загірський**[2]**,** *магістр*

# АЛГОРИТМ СТРУКТУРУВАНЯ КООРДИНОВАНОГО РУХУ ГРУПИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**Ua** Запропонований аналітичний алгоритм формування структури групи рухомих роботизованих транспортних засобів рівня зграї та рою для забезпечення координованого руху в просторі в горизонтальній площині. Розглядається довільна за формою лінія контуру групи та алгоритм визначення і забезпечення положення на ньому агентів групи при русі з лідером та без нього. Визначається та застосовується необхідна для реалізації структурованого координованого руху навігаційна інформація та аналітичне забезпечення. Запропонована узагальнена структура системи керування лідером для можливості дистанційного керування та автономного руху по заданій траєкторії. Розроблені моделі руху та отримані залежності для визначення взаємного положення лідера і агентів та забезпечення координованого руху зграї. Запропонована система автономного керування координованим рухом агентів по заданій траєкторії постійним курсом та під час зміни курсу руху.

**En** An analytical algorithm for forming the structure of a group of mobile robotic vehicles at the flock and swarm level to ensure coordinated movement in space in the horizontal plane is proposed. An arbitrary shape of the group contour line and an algorithm for determining and ensuring the position of the group agents on it when moving with and without a leader are considered. The navigation information and analytical support necessary for the implementation of structured coordinated movement are determined and applied. A generalized structure of the leader control system is proposed for the possibility of remote control and autonomous movement along a given trajectory. Motion models are developed and dependencies are obtained to determine the mutual position of the leader and agents and ensure coordinated movement of the flock. A system for autonomous control of the coordinated movement of agents along a given trajectory with a constant course and when changing the course of movement is proposed.

## Вступ

Координація руху групи наземних роботизованих транспортних засобів є важливою задачею при виконанні останніми колективних дій: пошукові та рятувальні операції, ліквідація наслідків техногенних аварій та ін., при яких необхідне одночасне, чи сплановане прибуття в визначене місце декількох апаратів. Така задача розв’язувалась у [1], як декомпозиція

[1] *ЦНДІОВТ*
[2] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*

на дві: 1 - формулювання мети та програми місії, і 2 - реалізація виконання заданої програми. Їх зміст полягає у розробці програми переміщення елементів групи, формуванні необхідної конфігурації групи та програми групового руху і під час переміщення. При цьому передбачається наявність системи передачі та прийому інформації, необхідної для реалізації програми руху. Показано, що використання лише програмного керування за наявності неконтрольованих збурень та відмінності параметрів роботів від їх розрахункових значень не дозволяє виконати вимоги до рухів роботів у складі групи. Інтенсивно розвивається задачі групового застосування автоматизованих (робототехнічних) транспортних засобів – «*Collective Cognitive Robots*» (*CoCoRo*, колективні когнітивні роботи) [1, 2, 3], які включають розробку члена групи – агента як об’єкта керування, та методів керування груповим рухом. За рівнем організації групового руху розрізняють рій, зграю та колектив [4]. Автоматизація керування морським без екіпажним комплексом із групою пошукових підводних апаратів та синтез системи автоматичного керування веденим підводним апаратом як «агентом» групи розглянуті у [4].

Найпростіші математичні моделі рою представляють окремих агентів, рух яких має зони відштовхування – уникати зіткнень, вирівнювання – рухатися в одному напрямку sз сусідами, та тяжіння – не віддалятись від сусіда [5]. Розповсюджений мурашиний алгоритм оптимізації руху зграї, в тому числі завдань маршрутизації транспорту, може давати кращі результати, ніж при використанні генетичних алгоритмів і нейронних мереж [6, 7]. Зграя птахів являє собою так звану критичну систему і рухається як єдина мережа пов'язаних між собою об'єктів. Під час польоту в зграї з’являється лідер. При цьому діє принцип гнучкої ієрархії — лідер може змінюватись [8, 9].

Побудова маршруту руху рою розглянута у [10] шляхом формування графа-сітки в просторі руху, який враховує розмір рою та наявні перешкод руху. Розроблені алгоритми планування маршруту рою [11, 12]. Упровадження різних методів управління залежить від конкретних вимог та умов завдання. Централізовані методи ефективні для завдань, де важливі точність і координація, децентралізовані – для завдань, де необхідні гнучкість та стійкість, а розподілені – для завдань, що потребують автономності та адаптивності. У [13] проаналізовані централізовані, децентралізовані та розподілені методи керування траєкторіями руху рою та зазначено, що застосування конкретного методу керування залежить від вимог та умов виконуваного завдання.

Однак, у літературі недостатньо розглянуті питання розробки алгоритмів автоматизованої побудови траєкторій руху агентів групи для забезпечення їх координованого руху для спільного виконання місії.

**Постановка задачі**

Метою роботи є дослідження та розробка комбінованої централізовано – децентралізованої структури керування координованим рухом групи роботизованих транспортних засобів, як зграї у складі лідера та агентів – членів зграї та рою, які повинні здійснювати погоджений спільний рух в положення з заданими географічними координатами.

Координованим будемо вважати рух по визначеній траєкторії зі збереженням заданого взаємного розташування агентів та лідера.

**Викладення основного матеріалу**

Будемо розглядати плоский горизонтальний рух зграї в просторі, що дозволяє розробити алгоритми керування рухом як наземних, так і повітряних транспортних засобів. Нехай група складається з n транспортних засобів (агентів групи та лідера). Приймемо наступні припущення**.** Будемо вважати, що всі агенти групи мають засоби прийому та передачі інформації про своє положення для прийняття рішень про визначення та забезпечення параметрів руху. Навігаційні системи агентів забезпечують визначення параметрів руху, віднесених до площини горизонту, що дозволяє задачу побудови траєкторії руху розглядати на цій площині [14 ], а система керування рухом забезпечує реалізацію цієї траєкторії також при русі по пересіченій місцевості [15 ] та в умовах перешкод [16 7].

Введемо нерухому (абсолютну) географічну систему координат *XOY*, яка є площиною горизонту, орієнтованою на північ віссю *OY*, та зв'язану з лідером групи рухому систему координат *xCy* з початком в центрі мас, вісь *Cy* якої направлені вздовж платформи агента в напрямку руху. Конфігурацію групи в системі координат лідера задамо рівнянням $f(x,y)=0$. Це можуть бути функції, що найближче описують конфігурацію групи, наприклад:

$$\begin{aligned}
&f(x, y) = x^2+y^2 = R^2 \text{ – коло}, && f(x, y)=(x/a)^2+(y/b)^2=1 \text{ – еліпс},\\
&f(x, y) =y - x^2 - a \text{ – парабола}, && f(x, y)= y = \text{const},\\
& && f(x, y)= x = \text{const},\\
&f(x, y) = y - kx \text{ – прямі лінії, тощо}
\end{aligned} \qquad (1)$$

Зв'язок між координатами ($X$, $Y$) агента групи в нерухомій системі координат з його координатами у ($x$, $y$) у рухомій системі координат (рис. 1) визначимо матричним рівнянням [18]

$$[X\ Y]^T=[X_C\ Y_C]^T+A(\mathrm{K})[x\ y]^T, \quad A(\mathrm{K})=\begin{bmatrix} \cos\mathrm{K} & \sin\mathrm{K} \\ -\sin\mathrm{K} & \mathrm{K} \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

де $X_C$, $Y_C$ – координати центра мас лідера, $A$ – матриця переходу між системами координат, K – кут курсу руху групи транспортних засобів, $M$ – $i$-й

агент групи, – напрямок швидкості руху лідера групи, $A$(K) – матриця повороту.

Положення $i$-го агента $M(x, y)$ групи із числа $n$ агентів у рухомій системі координат визначає вектор $r = CM$ (рис. 1) ss кутом

$$\varphi = \frac{i-1}{n-1}\varphi_n + \varphi_0 \qquad (3)$$

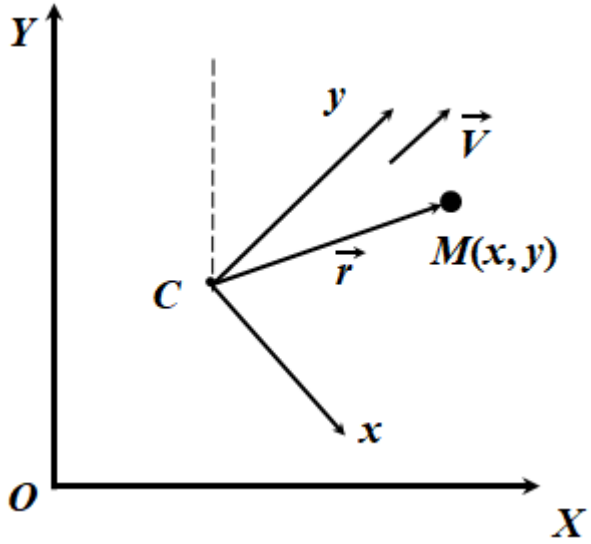



Рис. 1. Системи координат та положення агента групи

на лінії конфігурації групи, в якому кути $\varphi_0$ та $\varphi_n$визначають довжину лінії контуру конфігурації групи (рис. 2).

Кут (3) визначає рівномірне розташування агентів на лінії конфігурації групи (цей кут може бути заданий довільно).

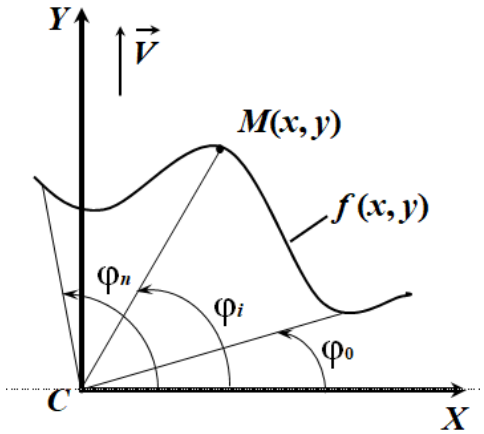



Рис. 2. Лінія контуру групи

Тоді координати $i$-го агента е рухомій системі координат визначаються як розв’язки рівнянь

$$f(x) = kx, \qquad k = \mathrm{tg}\varphi. \qquad (4)$$

Для неоднозначних функцій (2) крені рівняння (4) вибираються у відповідності взаємному положенню агента і лідера. Витримування кожним

агентом координат (4) відносно інших агентів та лідера під час руху буде забезпечувати координований рух групи. Для цього агент повинен мати інформацію про своє положення ($X$, $Y$), відносне розраховане положення на лінії контуру групи $(\hat{x},\ \hat{y})$, положення лідера ($X_C$, $Y_C$) та кут курсу К. Поточні значення координат агента відносно лідера зайдемо із (2)

$$[x\ y]^T = A^{-1}(\mathrm{K})([X\ Y]^T - [X_C\ Y_C]),\ A^{-1}(\mathrm{K}) = A^T(\mathrm{K}). \qquad (5)$$

Рух будемо вважати координованим, якщо поточні координати агента ($x$, $y$) не будуть виходити за окіл наперед заданого радіуса ρ навколо його розрахункового положення з координатами $(\hat{x},\ \hat{y})$:

$$(\hat{x}-x)^2 + (\hat{y}-y)^2 \le \rho^2 \qquad (6)$$

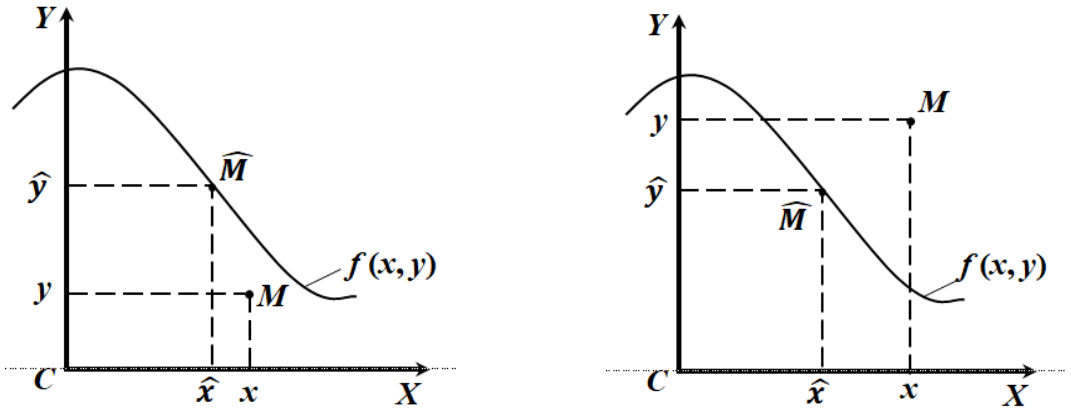
або

$$|\hat{x}-x| \le \rho, \quad |\hat{y}-y| \le \rho.$$

Алгоритм керування рухом агента формується в залежності від його поточного положення ($x$, $y$) по відношенню до розрахункового $(\hat{x},\ \hat{y})$ (рис. 3):

$$\hat{x}-x \underset{>}{\overset{<}{=}} 0, \quad \hat{y}-y \underset{>}{\overset{<}{=}} 0.$$

При цьому доцільно зміною кута курсу $\Delta\mathrm{K} \underset{<}{\overset{>}{=}} 0$ досягати положення, в якому $x \to \hat{x}$, та забезпечити виконання умови $y \to \hat{y}$ зміною швидкості руху.




***а)*** $\hat{x}-x<0, \quad \hat{y}-y>0$ ***б)*** $\hat{x}-x<0, \quad \hat{y}-y>0$

Рис. 3. Розрахункові та поточні положення агента

В кінці інтервалу руху групи курсом $\mathrm{K}_P$ координати агентів групи відносно лідера визначаються рівняннями (4), а абсолютні координати ($X_P$, $Y_P$) визначаються навігаційною системою агента, або обчислюються рівнянням (2) при відомих координатах ($X_{CP}$, $Y_{CP}$) лідера та курсі $\mathrm{K}_P$.

Змінна кута курсу руху групи на новий кут $К_n$ повинна включати попереднє переміщення агентів в нове положення із координатами ($X_n$ ,$Y_n$) для збереження структури групи. Нові координати агентів розрахуємо рівнянням (2)

$$[X_n\, Y_n]^T = [X_{CP}\, Y_{CP}]^T + A(К_n)[x\ y]^T . \qquad (7)$$

Переміщення агентів $[X_P\ \ Y_P]^T \rightarrow [X_n\ \ Y_n]^T$ е нове положення (рис. 4) здійснимо проміжним курсом $К_a$,

$$\mathrm{tg}К_a = \frac{X_n - X_p}{Y_n - Y_p} . \qquad (8)$$

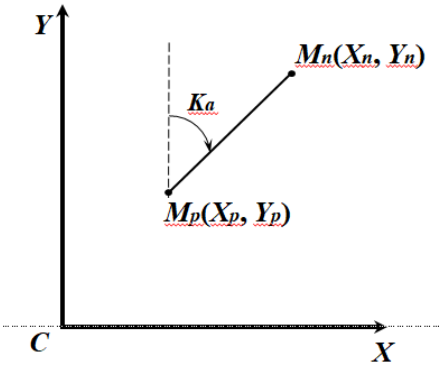



Рис. 4. Переміщення агентів

Після розташування у новому положенні [$X_n$ $Y_n$], [$X_{Cn}$=$X_{CP}$ $Y_{Cn}$=$Y_{CP}$] всієї групи подальший рух відбувається за курсом $К_n$. Підтримання координації руху відбувається відповідно умовам (6) до нової зміни курсу руху.

Розглянемо координований рух групи під час гуртування – спільне переміщення у задане кінцеве положення $G(X_G\ Y_G)$ із поточного положення

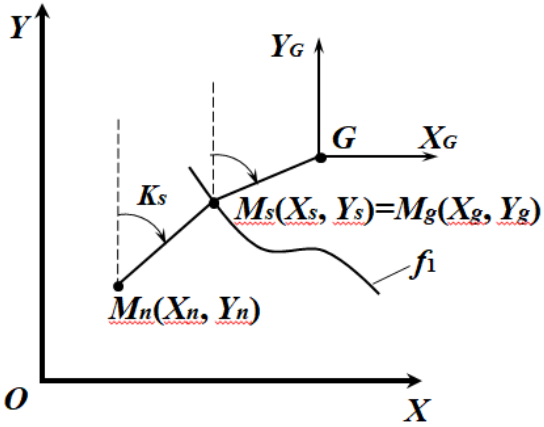



Рис. 5. Переміщення агентів під час гуртування

($Xn$, $Yn$) агентів (рис. 5). В залежності від складу групи та динамічних характеристик агентів, розташуємо останні в необхідних точках лінії $f1$ групи, положення яких визначимо аналогічно виразу (3) (рис. 2) відносно центра гуртування $G$ (рис. 5). Приймаючи т. $G$ за центр нерухомої системи координат $X_G G Y_G$, визначимо в ній модель лінії групи (2)

$$f_1(X_G,Y_G)=f\,(X-X_G,\quad Y-Y_G) \tag{9}$$

та положення ($X_g$, $Y_g$) на ній кожного агента відповідно (3). Це вихідне положення гуртування. Координати вихідного положення гуртування агента ($X_S$ $Y_S$) в абсолютній системі координат $XOY$ (рис. 1) знаходяться із координат ($X_g$ $Y_g$) із співвідношень

$$X_S=X_G+X_g,\quad Y_S = Y_G + Y_g. \tag{10}$$

Перехід агента у вихідне положення ($X_S$, $Y_S$) (10) гуртування ss поточного положення ($X_n$ $Y_n$) (7) здійснимо як рух курсом $K_S$, який визначається за координатами його поточного положення ($X_S$ $Y_S$) та положення ($X_g$ $Y_g$) на лінії контуру групи за виразом

$$\mathrm{tg}K_S = \frac{X_S - X_n}{Y_S - Y_n}. \tag{11}$$

Контроль виходу в вихідне положення гуртування здійснюється відповідно вимогам (6).

Етап руху із вихідного положення гуртування $S$ у центр гуртування $G$ відбувається курсом $K_g$, який обчислюється кожним агентом відповідно його положенню з координатами ($X_S$ $Y_S$):

$$\mathrm{tg}\ K_g = \frac{X_G - X_S}{Y_G - Y_S}\ . \tag{12}$$

Координація руху на етапі гуртування забезпечується витримуванням курсу (12) та необхідної швидкості руху для одночасного прибуття всіх агентів в центр $G$ у залежності від їх початкового положення $S$ на лінії контуру $f_1$ (9) групи. Забезпечення координації руху здійснюється контролем поточного положення агентів на траєкторії відповідно виразам (9) … (12) та (6) формуванням необхідного керування.

Як координований рух із лідером (зграї), так і координований рух у разі гуртування (як рій) повинен бути забезпечений наступною навігаційною інформацією:

– лідер зграї: поточними значеннями координат та курсу, координатами кінцевого положення;
– агент зграї: значеннями координат та курсу лідера, поточними значеннями координат, координатами кінцевого положення, модель лінії контуру групи.

Отримані залежності дозволяють побудувати наступні узагальнені структурні схеми керування лідером (рис. 6) та агентами зграї (рис. 7).

Узагальнена структура керування лідером (рис. 6) передбачає дистанційне керування оператором із пульту керування, та автономне керування від комплексної системи навігації (КСН). Найбільш повний склад КСН передбачає керування повітряним лідером та включає системи навігації (супутникову систему навігації (СНС), безплатформну інерціальну навігаційну систему (БІНС)), оптичну кореляційно-екстремальну систему (ОКЕС), систему технічного зору (СТЗ), систему орієнтації по магнітному полю Зе-

млі (магнітометри) та висотомір. Висотомір може бути як радіовисотомір, барометричний, лазерний чи ультразвуковий в залежності від призначення зграї. У наземній, морській зграях останні можуть бути відсутніми. КСН лідера передбачає систему обміну інформацією з агентами групи та пультом керування оператора.

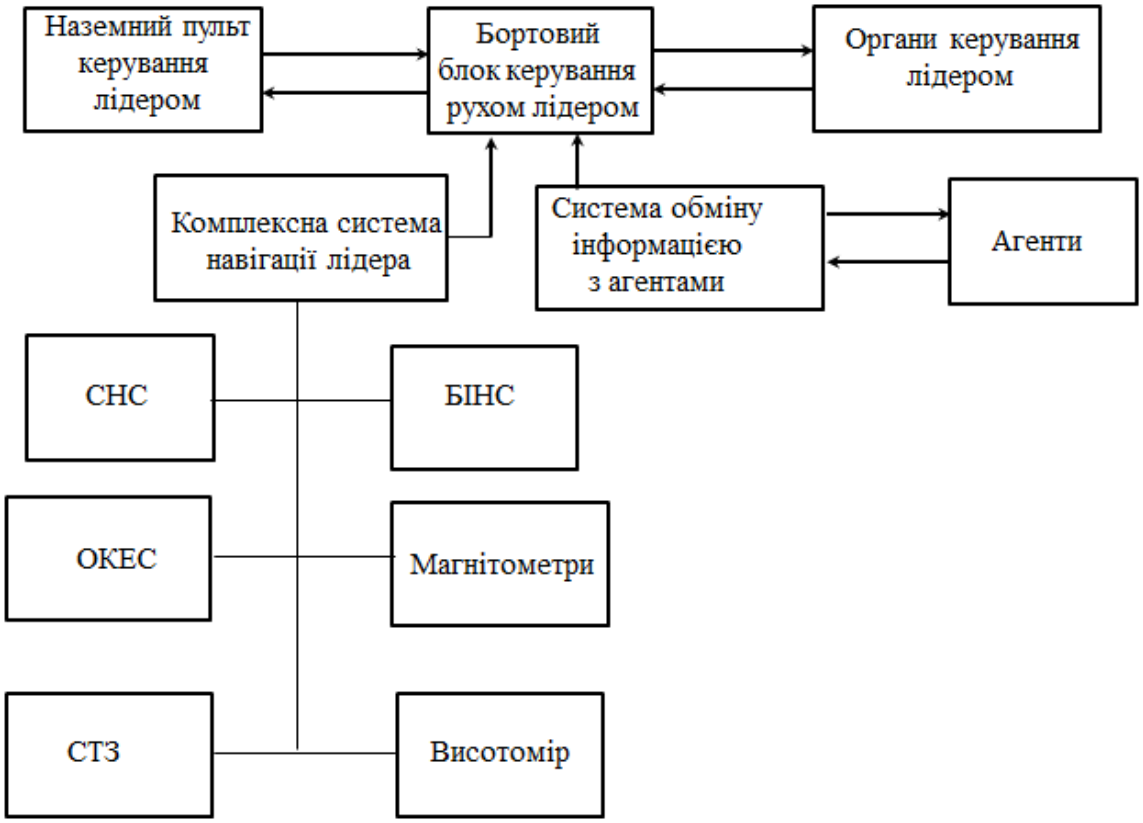



Рис. 6. Узагальнена структурна схема керування лідером

Бортовий блок керування агентом в узагальненій структурі системи керування агента (рис. 7) передбачає обмін інформацією із лідером та агентами. Автономне керування агентом забезпечується його комплексною системою навігації, основою якої є СНС, безплатформна інерціальна система орієнтації (БІСО) на МЕМС-сенсорах та магнітометрах, а для повітряних агентів – також із висотоміром.

Використання у системах керування лідера та агентів БІНС (БІСО), магнітометрів, висотоміра, оптичної кореляційно-екстремальної системи та системи технічного зору забезпечує керування в умовах дії радіоелектронних перешкод, коли інформація СНС та зв’язок недоступні.

**Висновки**

Досліджений підхід до структурування координованого групового руху роботизованих систем. Отримані моделі та відповідні їм рівняння руху, які визначають необхідне взаємне положення лідера та агентів для координованого руху зграї, чи рою.

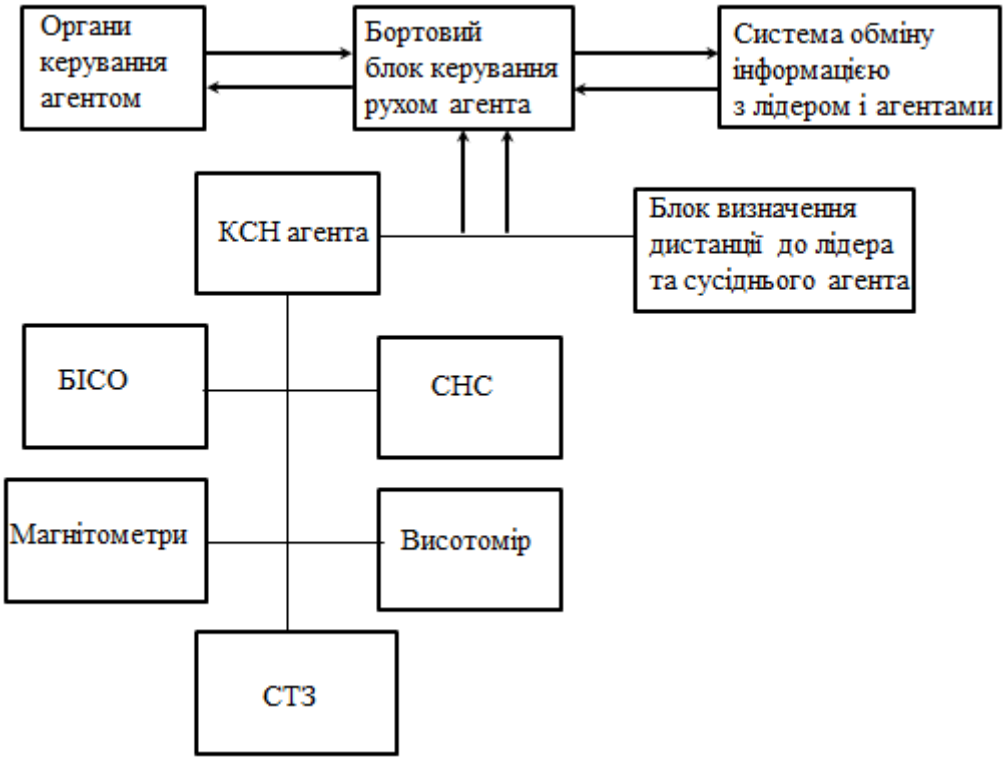



Рис. 7. Узагальнена структурна схема керування агентом

Запропонована узагальнена структура системи керування лідером для можливості дистанційного керування як оператором, так і для забезпечення автономного руху по заданій траєкторії в горизонтальній площині в просторі. Запропоновані підходи до створення систем автономного керування наземним, чи повітряними агентами по заданій траєкторії постійним та змінюваним курсами.

**Список використаних джерел**

1. *Кунцевич В. М.* Деякі задачі керування груповим рухом рухомих роботів //Автоматика/Automatics – 2011. 28-30 вересня 2011. Львів. Україна.
2. *Hamann H.* Swarm Robotics: A Formal Approach. Springer. 2018. 221p. https://www.amazon.com/Swarm-Robotics-Approach-Heiko Hamann/dp/3319745263.
3. Collective Cognitive Robots (CoCoRo). https://www.up2europe.eu/european/ projects/collective-cognitive-robots_9980.html.
4. *Блінцов В. С.* (ред). Основи автоматичного керування групою автономних ненаселених підводних апаратів – Рига. Baltija Publishing. 2024. 182 с.

5. *Shi H., Xie G.* Collective Dynamics of Swarms with a New Attraction//Repulsion Function. Mathematical Problems in Engineering. 2011. pp. 1–13. https://doi.org/10.1155/2011/735248.
6. *Mladineo M., Veza I., Gjeldum N.* Solving partner selection problem in cyber-physical production networks using the HUMANT algorithm// International Journal of Production Research. 2017. T. 55. № 9. pp. 2506-2521. DOI: https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1234084. ISSN 0020-7543.
7. *Zaidman D., Wolfson H.* Pina Colada: peptide–inhibitor ant colony adhoc design algorithm// Bioinformatics. 2016. 32 (15). pp. 2289—2296. DOI: https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btw133. ISSN 1367-4803. PMID 27153578.
8. Бюлетень "Птах". №2. 2010. https://life.pravda.com.ua/society/2010/06/18/51506/ .
9. *Hai T. Do, Hoang Hua, Minh T.* Nguyen, Cuong V. Nguyen. Formation Control Algorithms for Multiple-UAVs: A Comprehensive Survey. EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems. DOI: https://doi.org/10.4108/eai.10-6-2021.170230.
10. *Sabziev E.* A control algorithm for joint flight of a group of drones. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 2021, 110, p.p.157–167. DOI: https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.110.13
11. *Duchon F., Babinec A., Kajan M., Beno P., Florek M., Fico T., Jurisica L.* Path Planning with Modified a Star Algorithm for a Mobile Robot// 2014. 96. 59–69. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.098 .
12. Wang H., *Yu Y., Yuan Q.* Application of Dijkstra algorithm in robot path-planning// In Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Hohhot. China. 15–17 July 2011. IEEE. Piscataway. NJ. USA. 2011. DOI: https://doi.org/10.1109/MACE.2011.5987118.
13. *Калашнікова В. І.* Аналіз та моделювання методів управління роєм безпілотних літальних апаратів// Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. № 4 (30). С. 67–84. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.067.
14. *Мелешко В. В., Тарнавський С. В., Загірський А. В.* Визначення орієнтації з використанням магнітного поля Землі// Механіка гіроскопічних систем. – №48.-2024.-С.44-55. DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317885.
15. *Довгополий А. С., Загірський А. В.* Концептуальні засади та метод створення високопрохідного автономного наземного роботизовного комплексу// Механіка гіроскопічних систем. – № 48. – 2024. – С. 5-12. DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317860.
16. *Довгополий А. С., Загірський А. В., Збруцький О. В.* Створення автономної системи керування рухом наземного роботизованого комплексу на

малих дистанціях// Механіка гіроскопічних систем. – № 47. – 2024. – С. 5-23. DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771472024307756.
17. *Збруцький О. В.*, *Яременко Т. В.*, *Краснопольський А. О.* Оцінка ефективності методів розпізнавання образів та сегментації зображень для систем технічного зору малих безпілотних апаратів// Механіка гіроскопічних систем. – № 47. – 2024. – С. 63-82. DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771472024307705.
18. Korn A., *Korn T*. Mathematical Handbook. New York, 1968, 831p.