

УДК 681.52

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771452023296664>Ю. В. Бобков¹, к.т.н., доцент, П. О. Піщела², PhD студент

АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ РУХОМ МУЛЬТИКОПТЕРА У СКЛАДІ ГРУПИ ЗА СИГНАЛАМИ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Ua

В роботі проаналізоване керування групою мультикоптерів при автономному польоті за довільною траєкторією яка визначається лідером. За такої постановки найбільш прийнятним є варіант керування за моделлю лідер-ведених. Визначення взаємного розташування лідера та веденого, а також визначення параметрів для керування рухом веденого пропонується здійснювати за допомогою системи технічного зору. Для цього лідер маркується спеціальною міткою.

Розроблено загальний алгоритм керування польотом, який включає всі його основні етапи від допольотної підготовки до посадки. Керування рухом веденого здійснюється шляхом регулювання за кутами ризику, крену, тангажу та зміни швидкості руху у залежності від відстані до лідера. У роботі запропоновано формули та алгоритм визначення цих параметрів за даними системи технічного зору та інерціальної навігаційної системи веденого.

Для перевірки запропонованих алгоритмів була створена модель у програмному середовищі *Simulink* системи *Matlab*. Проведені експериментальні дослідження із застосуванням камери з роздільною здатністю 1280x720 підтвердили правильність отриманих співвідношень та алгоритмів. Максимальні значення приведеної похибки визначення зміни параметрів для дальності, кутів тангажу та крену не перевищували 4 %, а для кута ризику - 6,1 %. Підвищення точності визначення параметрів можливо за рахунок застосування камери з більшою роздільною здатністю.

En

The paper analyzes the control of a group of multicopters during autonomous flight along an arbitrary trajectory determined by the leader. Under such a situation, the most acceptable option is the leader-follower model. Determining the relative location of the leader and the follower, as well as determining the parameters for controlling the movement of the follower, is proposed to be carried out using a technical vision system. For this, the leader is marked with a special label.

A general flight control algorithm has been developed, which includes all its main stages from pre-flight preparation to landing. Controlling the movement of the follower is carried out by adjusting the angles of yaw, roll, pitch and changing the movement speed depending on the distance to the leader. The paper proposes formulas and algorithm for determining these parameters according to the system of technical vision and inertial navigation system of the follower.

To test the proposed algorithms, a model was created in the Simulink software environment of the Matlab system. Experimental studies using a camera with a resolution of 1280x720 confirmed the correctness of the obtained ratios and algorithms. The maximum values of the error of full scale in determining the change in

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

parameters for the distance, pitch and roll angles did not exceed 4%, and for the yaw angle - 6.1%. Increasing the accuracy of parameter determination is possible due to the use of a camera with a higher resolution.

Вступ

Все більшого поширення набуває застосування груп мультикоптерів для вирішення різноманітних масштабних задач, для яких застосування одиничних мультикоптерів не дає належного ефекту. Тому виникає проблема керування рухом групи в цілому та кожного окремого мультикоптера у ній.

Керування групою безпілотних літальних апаратів може застосовувати різноманітні стратегії у залежності від поставлених задач та наявних технічних можливостей, наприклад: ієрархічне, централізоване, децентралізоване, одночасного прибуття до цілі тощо [1, 2, 3].

Більшість задач узгодженого руху мультикоптерів у складі групи, по своїй суті, можуть бути зведені до часткової та найбільш поширеної задачі: слідування кожного окремого мультикоптера веденого за іншим – лідером або ведучим. Розгляд задачі керування у такій постановці можна вважати достатньо поширеним [4, 5, 6].

Головна увага в зазначених роботах приділяється розробці питань побудови траєкторії руху, стійкості та орієнтації у польоті, у тому числі за наявності перешкод, апаратній реалізації окремих блоків. Однак недостатньо уваги приділено питанням взаємної ідентифікації безпілотних літальних апаратів, відслідковуванню руху лідера в умовах автономного польоту групи та за довільною траєкторією, а також програмно-алгоритмічному комплексу для забезпечення задач керування польотом у групі.

Постановка задачі

Розглянемо варіант автономного польоту групи мультикоптерів, параметри руху якої визначаються за траєкторією лідера та за встановленим заздалегідь відносним розташуванням окремих учасників групи. За такої постановки для вирішення задачі достатньо визначити алгоритм керування рухом окремого веденого мультикоптера відносно лідера.

У [7] показано, що оскільки мультикоптери зазвичай комплектується фото- відео- камерами, то на їх основі доцільно побудувати систему технічного зору (СТЗ), що буде визначати взаємне розташування ведених мультикоптерів відносно лідера та формувати необхідні команди для системи керування.

Метою даної роботи є розробка алгоритму керування рухом веденого мультикоптера у складі групи за визначеними за допомогою системи технічного зору параметрами.

Розробка алгоритмів

Відповідно до проведеного аналізу будемо розглядати варіант польоту мультикоптерів у складі групи як політ лідера-веденого.

У загальному випадку не накладаються обмеження на характер керування польотом лідера, тобто він може бути керований оператором або автономний. Автономний політ може відбуватись, або за заданим маршрутом, або у режимі заданої кінцевої точки прибуття. Політ лідера може відбуватись, або за сигналами *GPS*, або за заданим маршрутом по карті. У випадку автономного польоту за заданим маршрутом у пам'ять лідера заносяться дані про маршрут польоту.

Політ веденого відбувається у режимі слідування за лідером за сигналами СТЗ.

Для подальшого аналізу доцільно виділити наступні етапи:

- Допольотна підготовка
- Зліт лідера та веденого
- Пошук лідера та встановлення візуального зв'язку веденого з лідером
- Політ веденого за лідером.
- Посадка.

Етап допольотної підготовки включає введення необхідних даних у пам'ять контролерів веденого та лідера. Для веденого заносяться дані про параметри розташування відносно лідера, оскільки груповий політ може бути, або із фіксованим розташуванням лідера-ведених (стройовий, клин тощо), або у режимі слідування за лідером. У даній роботі розглядається режим слідування за лідером.

Використання для ідентифікації лідера та параметрів його руху СТЗ вимагає застосування складних алгоритмів розпізнавання образів. Особливо це характерно для мультикоптера із його складною та неоднозначною структурою, зображення якої у кадрі СТЗ суттєво залежить від положення у просторі та змінюється динамічно.

Для полегшення вирішення задачі розпізнавання та визначення відносних координат лідера запропоновано промаркувати його за допомогою спеціальної мітки, що буде виконувати роль навігаційного орієнтира із відомими параметрами. У якості такої мітки доцільно обирати стандартні геометричні фігури або геометричні тіла заданого кольору та розміру [7].

У даній роботі пропонується навігаційний орієнтир лідера у вигляді однокольорового циліндра. Покриття циліндра повинно бути максимально інваріантним до світлового відображення і відбиття променів. Тому для циліндра пропонується матоване покриття. Колір мітки визначається за умови максимальної відмінності від навколишнього середовища та за умови відносної незалежності від рівня освітлення. Проведені дослідження показали, що доцільно обрати помаранчевий колір, оскільки він є найбільш відмінним від кольорів навколишнього середовища. Зокрема даний колір

використовується для стандартних аварійних засобів і посадочних місць мультикоптерів.

Таким чином, на етапі допольотної підготовки до пам'яті контролера веденого вводяться такі дані: висота зльоту H_3 , мінімальна висота польоту H_{\min} , задана для умов даного польоту дистанція Z_e до лідера, еталонна площа S_e навігаційного орієнтира – мітки на лідері, колір та форма навігаційного орієнтира. Еталонна площа S_e вводиться із урахуванням заданої дистанції Z_e між веденим і лідером.

На другому етапі відбувається зліт лідера та веденого на висоту H_3 .

Після цього здійснюється перехід до наступного етапу – пошуку лідера за допомогою СТЗ веденого. Необхідний просторовий огляд для пошуку лідера може бути забезпечений або за допомогою маневрів веденого у разі фіксованого положення камери, або шляхом використання трьохосової гіростабілізованої платформи для камери СТЗ. Слід зазначити, що на цьому етапі зміна положення веденого здійснюється лише навколо вертикальної осі, оскільки передбачається, що лідер та ведений зависають на однаковій заданій висоті H_3 .

Після знаходження лідера за допомогою маневрування веденого здійснюється:

- встановлення у положення, за якого камера СТЗ та корпус веденого знаходяться на горизонталі у напрямку лідера;
- навігаційний орієнтир лідера розташовується у центрі кадра СТЗ;
- встановлюється задана дистанція між лідером і веденим на основі визначення площі еталонного орієнтира за допомогою СТЗ [7] до досягнення умови:

$$Z = Z_e ,$$

де Z – поточна дальність до лідера;

Z_e – задана дистанція.

На етапі польоту у режимі слідування веденого за лідером за допомогою СТЗ веденого відслідковується просторове положення лідера та відстань до нього. Керування рухом веденого здійснюється шляхом регулювання за кутами рискання ψ , крену θ , тангажу φ та зміни швидкості руху у залежності від відстані Z до лідера (рис. 1).

Необхідні зміни параметрів руху для веденого визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} \Delta\psi_k &= \psi_k - \psi ; \\ \Delta\theta_k &= \theta_k - \theta ; \\ \Delta\varphi_k &= \varphi_k - \varphi ; \\ V_k &= V_b + \Delta V ; \end{aligned} \tag{1}$$

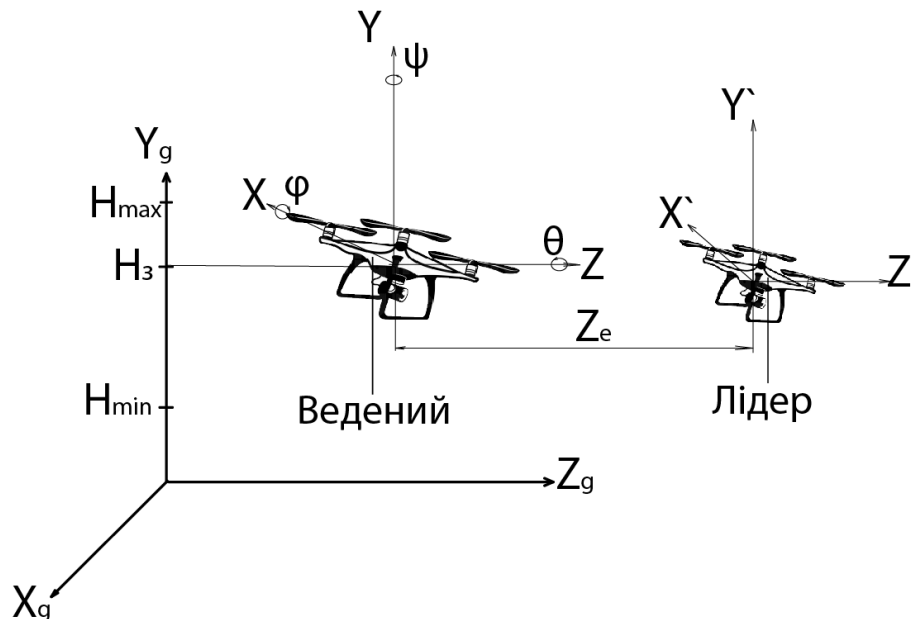


Рис. 1. Розташування лідера та веденого у просторі

де ψ_k , θ_k , ϕ_k – кути рискання, крену, тангажу для лідера, визначені за допомогою камери СТЗ веденого, відповідно;

ψ , θ , ϕ – кути рискання, крену, тангажу веденого, визначені за допомогою його інерціальної навігаційної системи, відповідно;

V_k – швидкість руху лідера;

V_b – поточна швидкість руху веденого;

ΔV – зміна швидкості для веденого, визначена за допомогою СТЗ.

У процесі групового польоту можлива втрата лідера і тоді передбачається рух без нього, який може здійснюватися у двох режимах:

- екстреної автоматичної посадки у точці втрати лідера;
- повернення у задану точку посадки, наприклад, у точку зльоту.

Перехід до режиму автоматичної посадки передбачений також, якщо у процесі польоту здійснюється посадка лідера та/або виконується умова:

$$H \leq H_{\min},$$

де H – поточне значення висоти польоту веденого;

H_{\min} – задана мінімальна висота.

Загальний алгоритм керування польотом представлений на рис. 2.

Розглянемо шляхи визначення параметрів руху мультикоптера та їх зміни за допомогою СТЗ.

Зміна швидкості руху веденого відносно лідера визначається по відповідному збільшенні чи зменшенні відстані до лідера. Як було зазначено, відстань до лідера, а точніше її зміна, визначається шляхом визначення площі орієнтира за допомогою СТЗ та наступного розрахунку по формулі [7]:

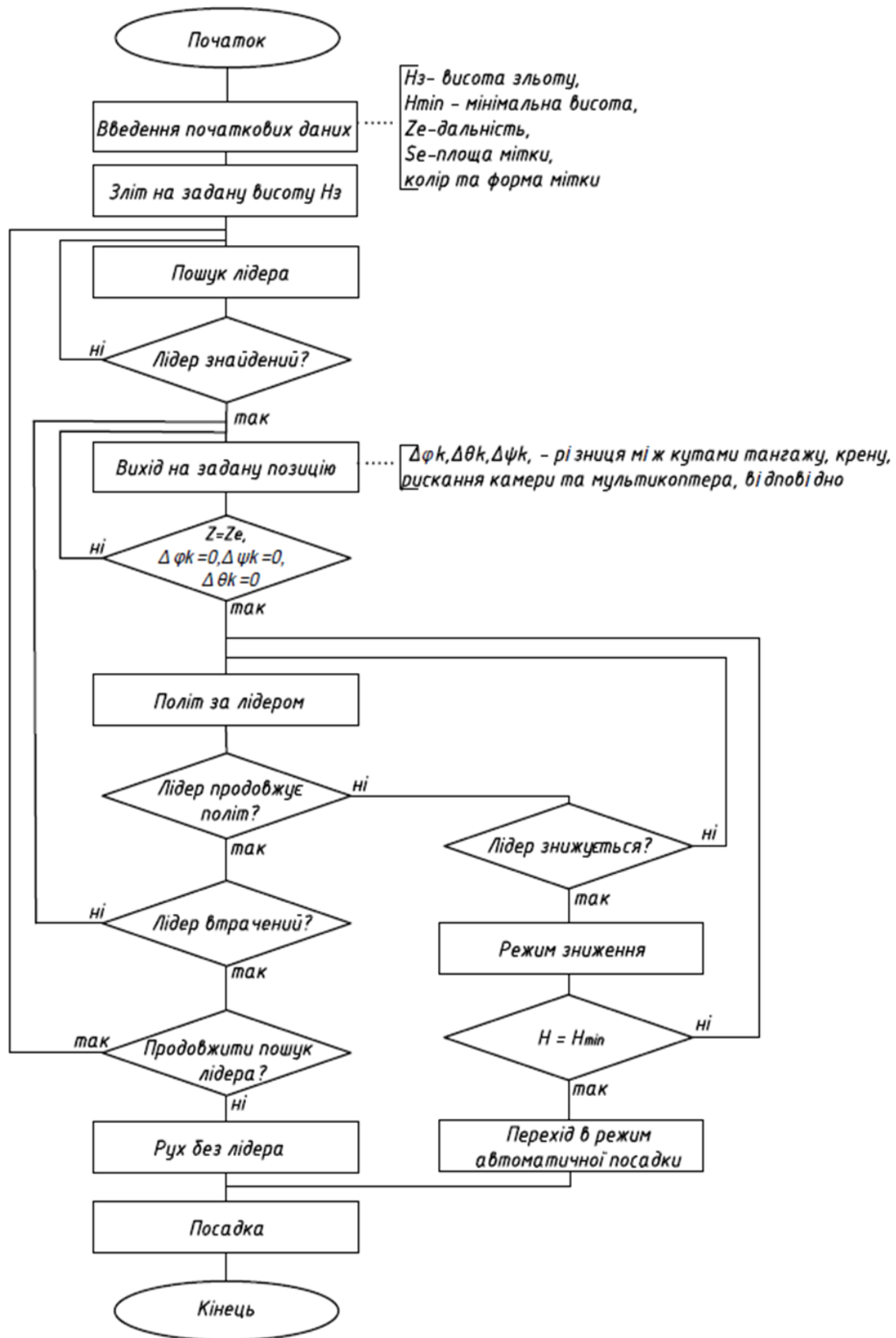


Рис. 2. Загальний алгоритм керування польотом

$$\Delta Z = \left(1 - \frac{S}{S_e}\right) \cdot Z_e.$$

де S – поточне значення площі еталонного орієнтира, визначене за допомогою СТЗ із використанням алгоритмів розпізнавання образів.

Знак ΔZ буде відображати зближення («-»), чи віддалення («+»).

Вочевидь, що зміна швидкості веденого мультикоптера відносно лідера може розраховуватись наступним чином:

$$V = \frac{\Delta Z}{Z_e} \cdot V_k = \left(1 - \frac{S}{S_e}\right) \cdot V_k.$$

Іншими параметрами для розрахунків є кути тангажу φ_k та рискання ψ_k , що визначаються за зображенням у кадрі (на фотоматриці) СТЗ веденого навігаційного орієнтира (мітки), розташованого на лідері (рис. 3).

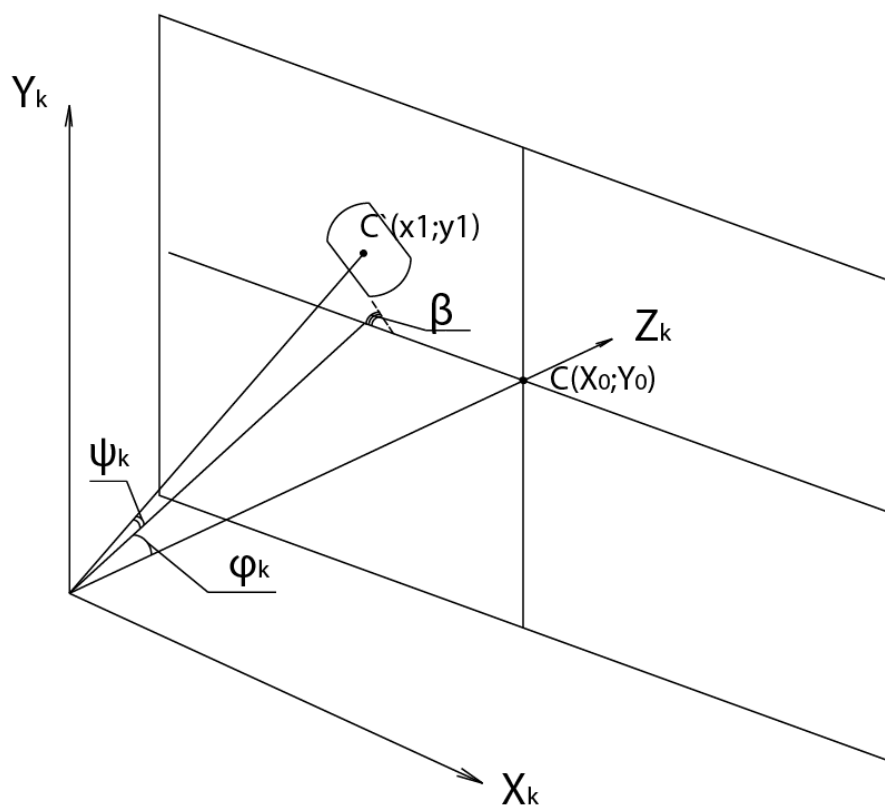


Рис. 3. Визначення кутів рискання, крену та тангажу лідера

Для розрахунку кутів рискання ψ_k та тангажу φ_k використовуються формули:

$$\psi_k = \arcsin\left(\frac{x_1}{Z_e + \Delta Z}\right);$$

$$\varphi_k = \arcsin\left(\frac{y_1}{Z_e + \Delta Z}\right);$$

де x_1, y_1 – координати центра мітки (рис. 2), що визначаються СТЗ.

Кут крену θ_k визначається за кутом β між бічною стороною мітки та віссю X_k (рис. 3).

Слід зазначити, що координати x_1, y_1 є координатами у площині кадру зображення. Для переходу до зв'язаної системи координат потрібно виконати процедуру калібрування камери. Результатом даної процедури є формування калібрувальних коефіцієнтів відповідності по кожній з координат. Тоді остаточне значення кутів ристання та тангажу визначається за наступними формулами:

$$\psi_k = \arcsin\left(\frac{K_x \cdot x_1}{Z_e + \Delta Z}\right);$$

$$\varphi_k = \arcsin\left(\frac{K_y \cdot y_1}{Z_e + \Delta Z}\right);$$

де K_x, K_y – калібрувальні коефіцієнти по осях X_k, Y_k , відповідно.

Узагальнений алгоритм визначення значень параметрів керування веденим на етапі польоту за допомогою СТЗ показаний рис. 4.

Розробка моделі у середовищі *MATLAB/Simulink* та її дослідження

Для перевірки роботоздатності запропонованих алгоритмів було проведено моделювання у середовищі *MATLAB/Simulink*.

Блок схема моделі для системи визначення параметрів для керування рухом веденого мультикоптера у програмному середовищі *Simulink* показана на рис. 5.

У якості камери під час моделювання використовувалась звичайна веб-камера із роздільною здатністю 1280x720. Камера підключалась до моделі за допомогою стандартного блоку *From Video Device* та дозволяла отримати зображення навігаційного орієнтира лідера.

Для отриманого кадру із навігаційним орієнтиром виконується перехід від кольорового простору *RGB* у *HSV*. Для розпізнавання навігаційного орієнтиру обраний гістограмний метод сегментації з наступним визначенням контуру шляхом переходу в бінарне зображення.

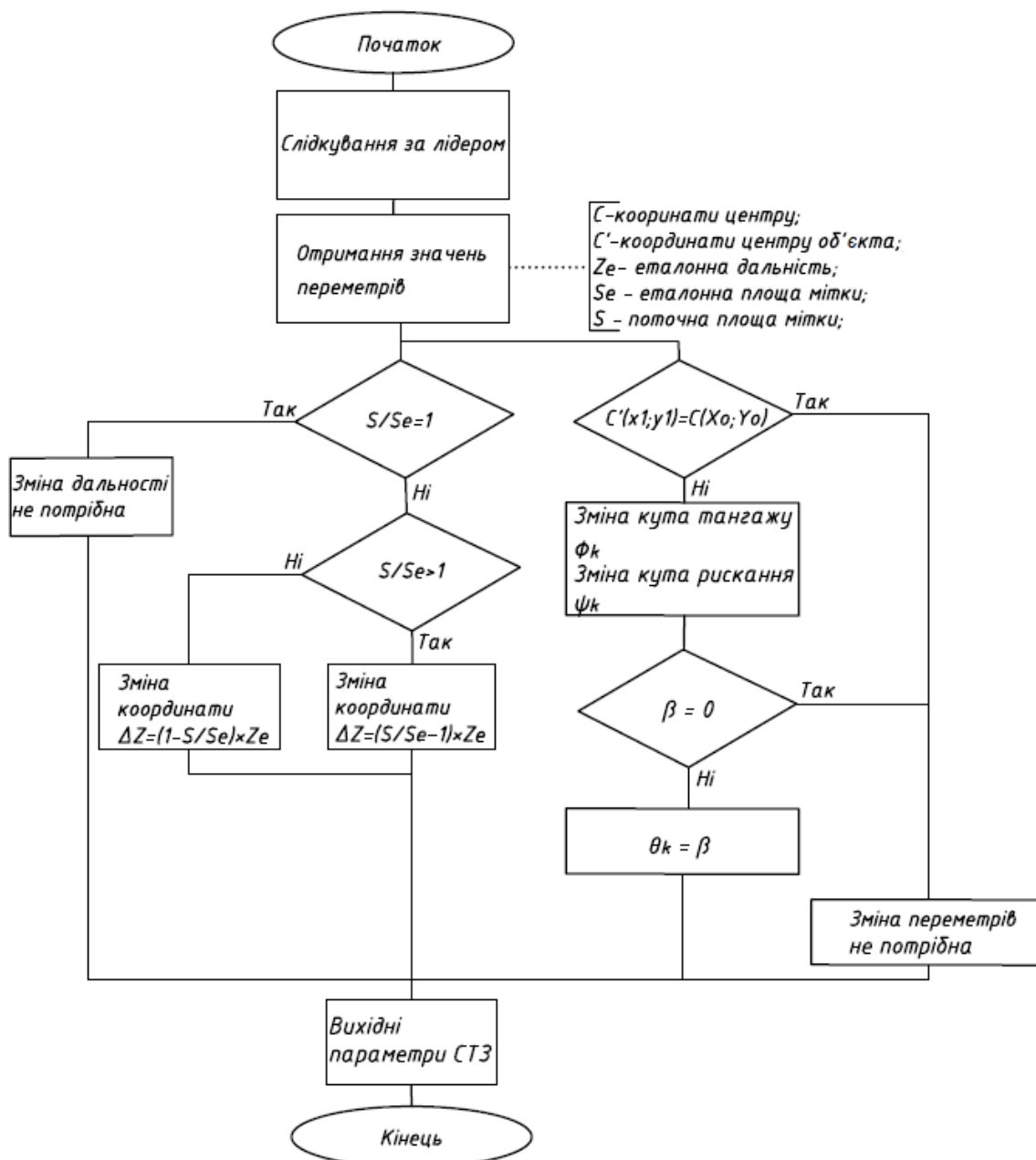


Рис. 4. Узагальнений алгоритм визначення значень параметрів керування

Після цього визначається центр навігаційного орієнтиру із урахуванням положення камери та його площа.

За наведеними вище формулами та алгоритмом розраховуються потрібні зміни кутів тангажу $\Delta\phi_k$, крену $\Delta\theta_k$, рискання $\Delta\psi_k$ для веденого, а також зміна дальності ΔZ до лідера.

Були проведені дослідження для обраної моделі навігаційного орієнтира у вигляді помаранчевого матованого циліндра за різних рівнях освітлення та за його різних просторових положеннях.

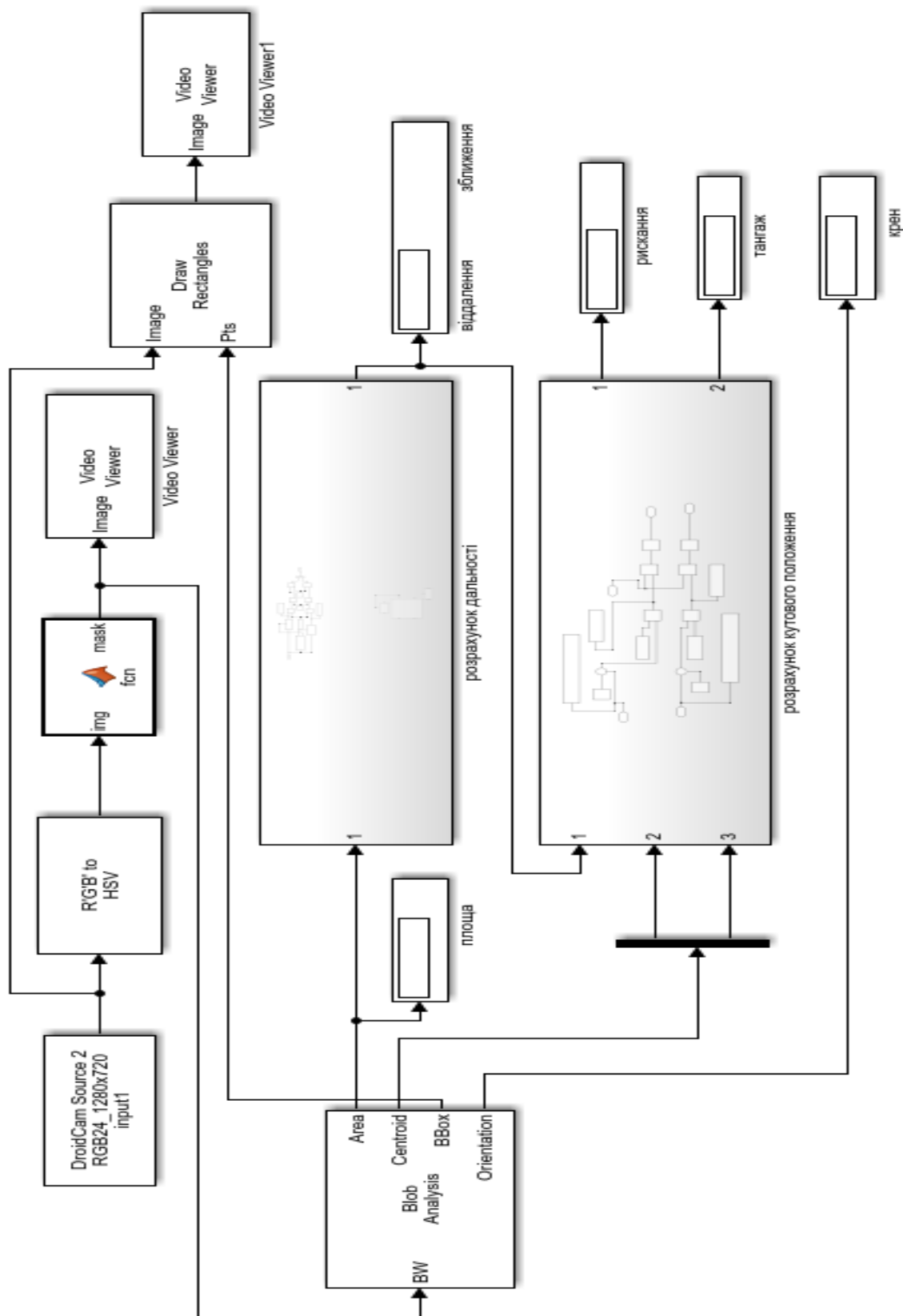


Рис. 5. Блок схема моделі у програмному середовищі *Simulink*

Було встановлено, що обраний варіант навігаційного орієнтира стало розпізнається у діапазоні освітлення від 2 до 82 люкс.

На початку експериментів було проведено калібрування камери та визначені коригуючі коефіцієнти по двох осях фото матриці.

За результатами проведених досліджень були визначені похибки вимірювання параметрів. Максимальні значення наведеної похибки визначення зміни параметрів становили:

1. дальності ΔZ – 3,9 %;
2. кутів рискання $\Delta\psi_k$ у діапазоні $\pm 20^\circ$ – 6,1 %;
3. кутів тангажу $\Delta\phi_k$ у діапазоні $\pm 20^\circ$ – 3,8 %;
4. кутів крену $\Delta\theta_k$ у діапазоні $\pm 45^\circ$ – 3,7 %.

Висновки

Під час автономного польоту групи мультикоптерів, особливо за довільною траєкторією, яка визначається лідером, найбільш прийнятним є варіант керування за моделлю лідер-ведений. Визначення взаємного розташування лідера та веденого, а також визначення параметрів для керування рухом веденого пропонується здійснювати за допомогою СТЗ. Для цього лідер маркується спеціальною міткою. У роботі обґрунтовано вибір мітки у вигляді помаранчевого матованого циліндра з відомими геометричними параметрами, що є найбільш інваріантним для просторових змін та рівня освітлення.

Розроблений загальний алгоритм керування польотом, який включає всі його основні етапи, а саме: допольотну підготовку, зліт лідера та веденого, пошук лідера та встановлення візуального зв'язку веденого із лідером, політ веденого за лідером, посадку.

Керування рухом веденого здійснюється шляхом регулювання за кутами рискання, крену, тангажу та зміни швидкості руху в залежності від відстані до лідера. У роботі наведено формули та алгоритм визначення цих параметрів за даними СТЗ та інерціальної навігаційної системи веденого.

Для перевірки запропонованих алгоритмів була створена модель у програмному середовищі *Simulink* системи *Matlab*. Проведені експериментальні дослідження із застосуванням камери за роздільною здатністю 1280x720 підтвердили правильність отриманих співвідношень та алгоритмів. Максимальні значення наведеної похибки визначення зміни параметрів для дальності, кутів тангажу та крену не перевищували 4 %, а для кута рискання – 6,1 %. Підвищення точності визначення параметрів можливо за рахунок застосування камери із більшою роздільною здатністю.

Список використаної літератури

1. *Austin Reg*, Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment / R. Austin. – WILEY, 2010. – 368 p.

2. *Tsourdos Antonios*, Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles / A. Tsourdos, B. White, M. Shanmugavel – WILEY, 2010. – 214 p.
3. *Пікенін О. О.* Реалізація польоту групи безпілотних літальних апаратів / О. О. Пікенін, О. П. Мариношенко, О. В. Прохорчук. // Механіка гіроскопічних систем. – 2016. – № 31. – С. 12–14.
4. *Wenzel K. E.* Visual Tracking and Following of a Quadcopter by another Quadcopter / K. E. Wenzel, A. Masselli, A. Zell // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 7-12, 2012. – Vilamoura, Algarve, Portugal. – 6 p.
5. *Mercado D. A.* Quadrotors Flight Formation Control Using a Leader-Follower Approach / D. A. Mercado, R. Castro, R. Lozano // European Control Conference (ECC), July 17-19, 2013/ – Zürich, Switzerland.– P. 3858-3863.
6. *Pyvovar M.* Simulation of Flight Control of Two UAVs Based on the “Master-Slave” Model / M. Pyvovar, O. Pohudina, A. Pohudin, O. Kritskaya //Conference on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering–Synergetic Engineering. – Springer, Cham, 2021. – С. 902-907.
7. *Бобков Ю. В.* Система технічного зору для забезпечення руху групи мультикоптерів / Ю. В. Бобков, П. О. Піщела // Механіка гіроскопічних систем. – 2020. – № 39. – С. 13-24.