

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

**МАЛИШЕВА Юлія Олександрівна**



УДК 531.383

**ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ ТА ОРІЄНТАЦІЇ ЛІТАЛЬНОГО  
АПАРАТУ З ОПТИЧНИМИ ПРИЛАДАМИ**

05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і систем керування літальними апаратами Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерство освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

лауреат Державних премій СРСР та України, Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор  
**ЗБРУЦЬКИЙ Олександр Васильович**,  
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, декан факультету авіаційних і космічних систем

**Офіційні опоненти:**

лауреат Державної премії України, доктор технічних наук, професор  
**КУЛІК Анатолій Степанович**,  
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», завідувач кафедри систем керування  
кандидат технічних наук  
**ЯНКЕЛЕВИЧ Григорій Євсійович**  
Казенне підприємство СПБ «Арсенал», начальник лабораторії

Захист відбудеться « 16 » грудня 2016 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп.1, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського ” за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « 3 » листопада 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07  
к.т.н., доцент

Ю.В. Киричук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** На сьогоднішній день у багатьох країнах дуже широко використовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА) у різних сферах народного господарства та є перспективним напрямком наукового та технічного розвитку ряду країн. За інформацією від міжнародної асоціації безпілотних систем UVS International у 2013 році БПЛА виготовляли у 57 країнах світу. Така ситуація зумовлена широким спектром можливого застосування БПЛА від моніторингу дорожнього руху, патрулювання лісових масивів, спостереження за певними об'єктами й транспортування до військових потреб. З точки зору військового сектора вирішальними факторами є більш низка вартість експлуатації, а також зменшення ризику для життя людини у порівнянні із пілотованою технікою, що виконує подібні задачі. В той же час стрімкий розвиток мікроелектромеханічних приладів в напрямку зменшення їх розмірів і маси, дозволяє вже зараз створювати бортові системи навігації та керування для БПЛА різного класу із необхідними масогабаритними характеристиками без надмірних витрат.

Система навігації і орієнтації є найбільш складною у реалізації системою БПЛА, яка потребує найбільше уваги при розробці кожного нового БПЛА. Складність полягає у тому, щоб створити таку систему, яка б за умови прийнятних витрат включала мінімальний набір первинних датчиків для забезпечення автономного польоту і при цьому мала б якомога вищу точність. Також часто додаткову складність вносять масогабаритні та інші обмеження, що визначаються наперед запланованими розмірами, аеродинамічним компонуванням та характеристиками встановленого двигуна.

Тому розробка системи навігації і орієнтації для БПЛА яка б максимально задовольняла усім перерахованим вище вимогам надасть можливість створити конкурентоздатний безпілотний ЛА. Отримані при цьому наукові результати можна використовувати для вдосконалення вже наявних систем навігації і орієнтації.

На сьогоднішній день запропоновано багато варіантів компонування датчиків первинної інформації у єдину навігаційну систему. Найбільш поширеним та перспективним напрямком є об'єднання інформації від мікроелектромеханічних (МЕМС) інерціальних датчиків та супутникової навігаційної системи (СНС). Існують варіанти доповнення таких систем різноманітними датчиками визначення кутової орієнтації, від магнітометрів та додаткових СНС до різноманітних оптичних приладів. Також окремо існують цікаві розробки по стабілізації БПЛА класу мікро, які для цього використовують зображення від бортової відеокамери. Однак у відкритих джерелах не має інформації про можливе поєднання цих двох систем, хоча обидві системи є не дуже дорогими та досить легкими й можуть бути об'єднані в одну, але вже більш точну систему. Тому розробка системи навігації та орієнтації на оптичних приладах є дуже цікавим та актуальним напрямком дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження та розроблені алгоритми, узагальнені в дисертації, виконувались у Національному технічному університеті України «КПІ» в рамках державних та галузевих науково-технічних програм та робіт:

- № 2552 «Розробка вбудованих систем орієнтації та стабілізації супутників-приладів класу нано- та пікосупутників» (№ держреєстрації 0112U001611);

- №2154-п «Розробка методів проектування та випробування мініатюрних інтелектуальних систем керування безпілотними літальними апаратами» (№ держреєстрації 0108U000514).

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є дослідження можливостей використання оптичної інформації для визначення горизонту та побудови на цій основі датчика оптичного горизонту як навігаційного сенсора і його використання в комплексованій навігаційній системі.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

1) показати можливість використання оптичної інформації для визначення лінії горизонту та побудови датчика оптичного горизонту;

2) провести експериментальні дослідження датчика оптичного горизонту для визначення його основних метрологічних характеристик;

3) розробити систему детектування перешкод та визначення відстані до них;

4) провести експериментальні дослідження системи визначення перешкод та сформулювати обмеження по її використанню;

5) розробити комплексовану систему навігації та орієнтації, що включає безплатформну інерціальну систему, приймач супутникової навігаційної системи, магнітометр та датчик оптичного горизонту.

**Об'єкт дослідження дисертації:** орієнтація та навігація безпілотного літального апарату.

**Предмет дослідження дисертації:** датчик оптичного горизонту і його комплексування у системі орієнтації та навігації.

**Методи дослідження.** Методи і прийоми машинного бачення використовувались при розробці алгоритмів визначення лінії горизонту на зображенні. Закони прямолінійної перспективи та формування зображення у пінхол камері були використані при визначенні кутів крену і тангажу на зображенні та під час калібруванні камер. Для перевірки точності розробленого оптичного датчику горизонту застосовувався метод тестових поворотів. Алгоритм комплексування системи навігації та орієнтації був отриманий на основі лінійного фільтру Калмана.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше розроблено алгоритм визначення поточних кутів крену і тангажу ЛА на основі алгоритмів розпізнавання оптичної лінії горизонту, побудованих лише на базі методів машинного зору та розпізнавання образів, який має необхідну точність визначення лінії горизонту, в тому числі за рахунок застосування колової маски для усунення викривлених областей зображення та швидкість обробки, що дозволило його використання у бортових обчислювачах та видачу інформації у реальному масштабі часу.

2. Вперше сформовано датчик оптичного горизонту на базі бортової камери і бортового обчислювача, який здатний визначати кути крену та тангажу із похибкою  $\leq 0,5^\circ$  та на відміну від існуючих моделей не потребує додаткових фінансових витрат.

3. Вперше розроблено алгоритм та оптичну систему визначення відстані до перешкоди на основі методів стереобачення, яка дає можливість підвищити безпеку польоту БПЛА у мінливому оточуючому середовищі.

4. Вперше показано, що використання датчика оптичного горизонту у комплексованих системах орієнтації та навігації, побудованих на мікроелектромеханічних датчиках, дає можливість підвищити точність визначення кутів орієнтації у три рази, що має велике значення при побудові систем орієнтації та навігації для БПЛА в умовах існуючих масогабаритних та вартісних обмежень.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Розроблені алгоритми визначення горизонту дозволяють сформувати самостійні датчики оптичного горизонту різної точності на борту літального апарату, які відповідають масогабаритним вимогам малих безпілотних літальних апаратів і в той же час не потребують великих фінансових витрат.

2. Сформовано оптичну систему визначення відстані до перешкод, яка при встановленні на борту малого маневреного БПЛА дозволить забезпечити його збереження при виконанні місій в умовах мінливого середовища.

3. Встановлено, що введення розробленого датчика оптичного горизонту у систему орієнтації і навігації, побудовану з використанням недорогих мікроелектромеханічних датчиків середньої точності, магнітометра та приймача СНС дозволило підвищити точність загальної комплексованої системи у три рази у порівнянні із базовою.

Результати використані при виконанні науково-дослідницьких робіт НАЦ КТНП НТУУ «КПІ» та в навчальному процесі на кафедрі приладів та систем орієнтації НТУУ «КПІ» в дисципліні «Інформаційні технології аерокосмічних систем».

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем вдосконалені та адаптовані алгоритми визначення лінії горизонту по її зображенню [1]; проведено напівнатурне випробування датчику оптичного горизонту [2-3; 5]; алгоритм визначення відстані до перешкоди; експериментально визначено залежність між зміщенням кадрів стерео пари зображень та відстанню до об'єкта; виконано напівнатурне моделювання комплексованої системи орієнтації та навігації [4]. В роботах, опублікованих у співавторстві, вклад автора наведений у списку опублікованих робіт за темою дисертації [1]-[13].

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертації доповідались, обговорювались та одержали позитивну оцінку на науково-технічних конференціях та семінарах: I Міжнародна конференція студентів та молодих вчених «Інтелект, інтеграція, надійність» (Київ, 2008 р.), VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки» (Київ, 2011 р.), Ювілейна Науково-практична конференція, присвячена 50-річчю польоту людини в космос «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки» (Київ, 2011 р.), IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (Київ, 2013 р.), IEEE 3rd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (Київ, 2014 р.), X Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної

техніки» (Київ, 2015 р.), Лабораторія Комп'ютерного Зору та Розпізнавання Образів (MVPR) Лаппеенрантського Технічного Університету (Фінляндія, Лаппеенранта, 2015 р.), а також на науково-технічних семінарах кафедри ПСКЛА НТУУ «КПІ» (Київ, 2007-2015 рр.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковані у 13 наукових працях, з них 5 статей в провідних фахових виданнях, 1 з яких опубліковано у іноземному фаховому періодичному виданні та 8 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях, які в повній мірі висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, 6 розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел, що складає 70 найменувань. Основний зміст викладено на 116 сторінках машинописного тексту. Робота містить 45 рисунків і 5 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** охарактеризована проблема, обґрунтована актуальність роботи, сформульована її мета, наведені основні наукові та практичні результати, що отримані в дисертації і виносяться на захист, показана структура та об'єм дисертації.

**В першому розділі** проведений огляд сучасного стану та перспектив розробки комплексованих інерціально-супутникових систем навігації та орієнтації БПЛА побудованих на мікроелектромеханічних інерціальних датчиках, а також окремих систем стабілізації по оптичній інформації, розроблених для мініатюрних БПЛА. Також у цьому розділі приділено увагу системам, що забезпечують безпеку польоту та збережуваність ЛА за допомогою оптичного детектування перешкод. На основі аналізу матеріалу, поданого в даному розділі дисертації, сформульовані задачі, що підлягають вирішенню, та мета роботи.

**В другому розділі** наведена методика визначення кутів крену та тангажу по наперед визначеній лінії горизонту на зображенні. Користуючись графічним представленням формування зображення лінії горизонту наведено на рисунку 1 та законами лінійної перспективи можна записати наступні вирази для визначення значень кутів крену і тангажу:

$$\begin{aligned} \gamma &= \arctg \left( \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right), \\ \vartheta &= \arctg \left( \frac{m - m_0}{f} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

На Рис.1 та у формулах (1) прийняті наступні позначення:  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  - координати кінців прямої,  $m$  - точка перетину лінії горизонту  $H$  із вертикаллю  $H_2$ , що проходить через головну точку  $m_0$ ,  $f$  - фокусна відстань камери,  $K$  - центр камери.

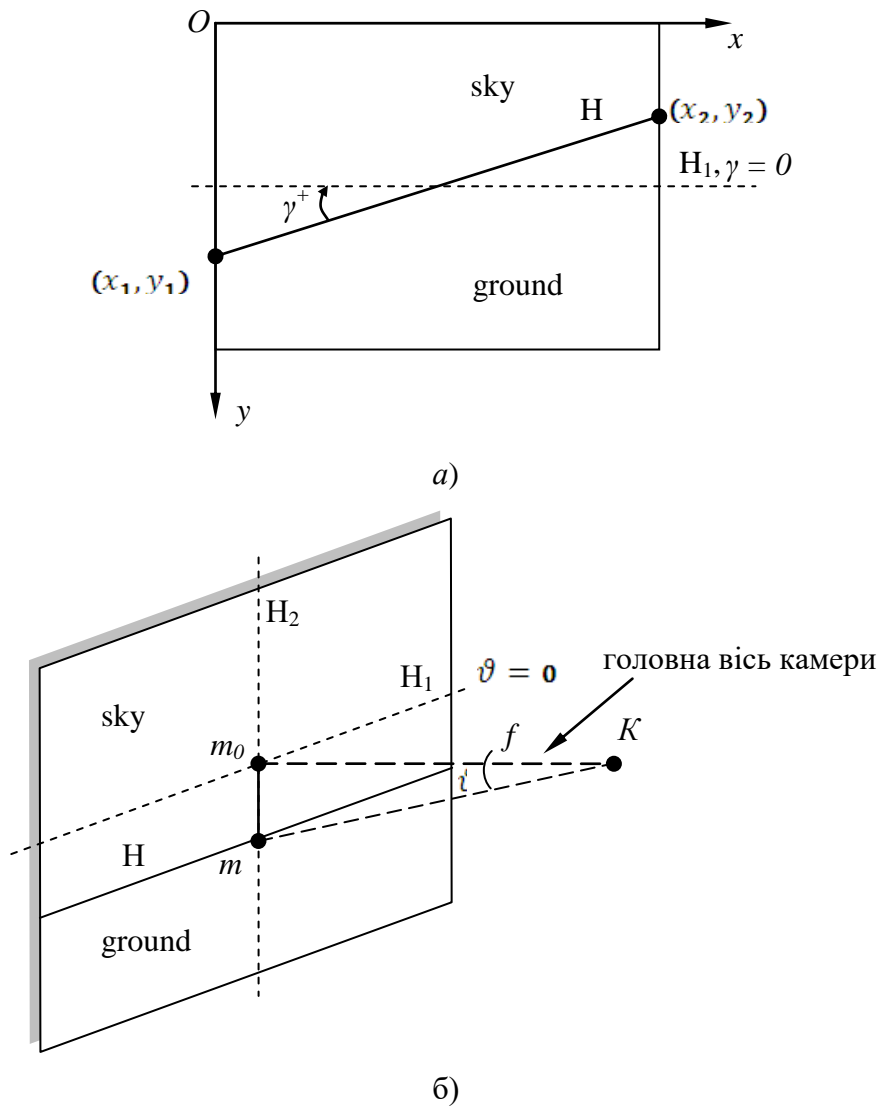


Рис. 1. Формування кута крену (а) та тангажу (б) на зображенні

Знак кута тангажу із зображення можна визначити наступним шляхом. Якщо на поточному зображенні точка  $m$ , що належить лінії горизонту попадає в область нижче горизонталі зображення  $H_1$ , то кут тангажу буде позитивний, а якщо в область вище горизонталі - негативний (при умові, що була зроблена початкова виставка камери, при якій  $H_1$  відповідає  $\vartheta = 0$ ).

У розділі проведено аналіз кольорових моделей представлення зображення на основі якого було обрано кольорову модель RGB як таку, що забезпечує високу швидкість обробки зображення і в той же час пропонує достатню кількість інформації для аналізу.

Побудовано два алгоритми для виділення лінії горизонту з використанням параметра Отсу (Алгоритм 1) та з використанням морфологічних операторів (Алгоритм 2).

У Алгоритмі 1 виділення лінії горизонту проводиться на основі сегментації зображення на певні області із використанням гістограми синьої та зеленої компонент зображення, границі між якими формується прообраз лінії горизонту. Основою для сегментації є кольорова інформація зображення. Алгоритм 2 спирається

на визначення присутніх на зображенні границь, найсильніша з яких є лінія горизонту. Обробка проводиться одночасно у трьох кольорових каналах, після чого отримана інформація об'єднується. В обох випадках побудова результуючої лінії проводиться за допомогою лінійного перетворення Хафа.

Порівняння розроблених алгоритмів проводилось на тестових зображеннях, які представляли випадки різних погодних умов, освітлення та ландшафту. Аналіз отриманих результатів показав, що обидва алгоритми мають хороші результати розпізнавання лінії горизонту на зображенні навіть у складних випадках (погана якість зображення, наявність поблизу лінії горизонту пагорбів, водоймищ). Більш точним є алгоритм, побудований на базі морфологічних операторів. Однак в деяких складних випадках кращі результати показав алгоритм на базі параметра Отсу. До його переваг можна віднести також простоту реалізації та більш високу швидкість обробки одного зображення, що має велике значення при обробці відеопослідовності та отримання величин кутів крену і тангажу в реальному масштабі часу. Тому вибір алгоритму розпізнавання лінії горизонту визначається обчислюваною потужністю наявного у складі літального комплексу бортового обчислювача.

На рисунку 2 наведено декілька прикладів виділення лінії горизонту двома алгоритмами на тестових зображеннях: червона лінія відповідає роботі Алгоритму 1, жовта лінія відповідає роботі Алгоритму 2.



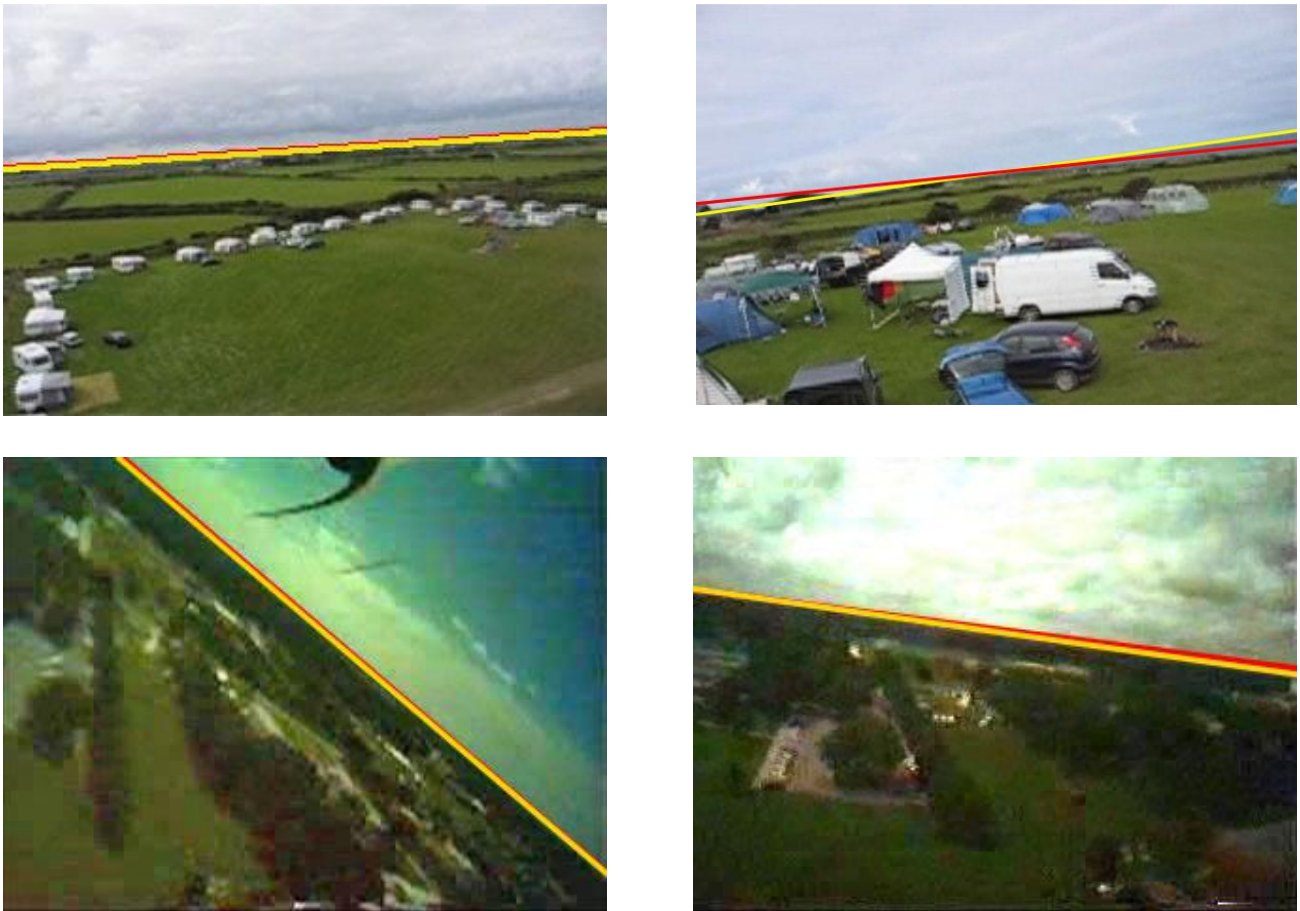


Рис. 2. Результати роботи запропонованих алгоритмів розпізнавання лінії горизонту на зображенні

**Третій розділ** присвячений формуванню прототипу датчику оптичного горизонту (ДОГ). Для цього розроблені алгоритми визначення кутів крену та тангажу були реалізовані за допомогою язику програмування високого рівня matlab. Було проведено калібрування бортової відеокамери, в якості якої використовувалась доступна на ринку веб-камера середньої цінової категорії Genius iSlim 320 із роздільною здатністю зображення 640 x 480 пікселів. В результаті було виявлене суттєве викривлення зображення, зумовлене малими розмірами лінзи камери, яке відповідало зміщенню на 8-12 пікселів у кутах зображення. Виходячи з отриманих результатів калібрування, зроблені висновки щодо можливої дисторсії лінзи інших відеокамер такого класу, що у майбутньому може призвести до необхідності у калібровці кожної відеокамери, що буде використовуватися в якості чутливого елемента ДОГ чи до використання стаціонарної камери ДОГ, що знижує рівень модульності дизайну системи. Таким чином у розроблені алгоритми визначення лінії горизонту було вирішено ввести швидку корекцію вихідного зображення для усунення вірогідних похибок, а саме додавання в алгоритм колової бінарної маски. Це дозволило ліквідувати надмірно викривлені області зображення і тим самим підвищити точність визначення кутів крену і тангажу оптичним датчиком горизонту.

Проведено експериментальні випробування роботи ДОГ в лабораторних умовах (рис. 3), які моделювали політ на висоті приблизно 100 м при ідеальних умовах видимості. В результаті було отримано середні значення похибок визначення

кутів крену і тангажу датчику, які становлять  $0,42^\circ$  із СКВ  $0,1691$  по куту крена та  $0,25^\circ$  із СКВ  $0,2243$  по куту тангажа. У подальшому ці значення використані при напівнатурному моделюванні роботи КСОН. Таким чином, в лабораторних умовах ДОГ показав себе як досить точний датчик визначення кутів крену і тангажу, рівень похибок якого складає приблизно  $\leq 0,5^\circ$  по обох кутах .

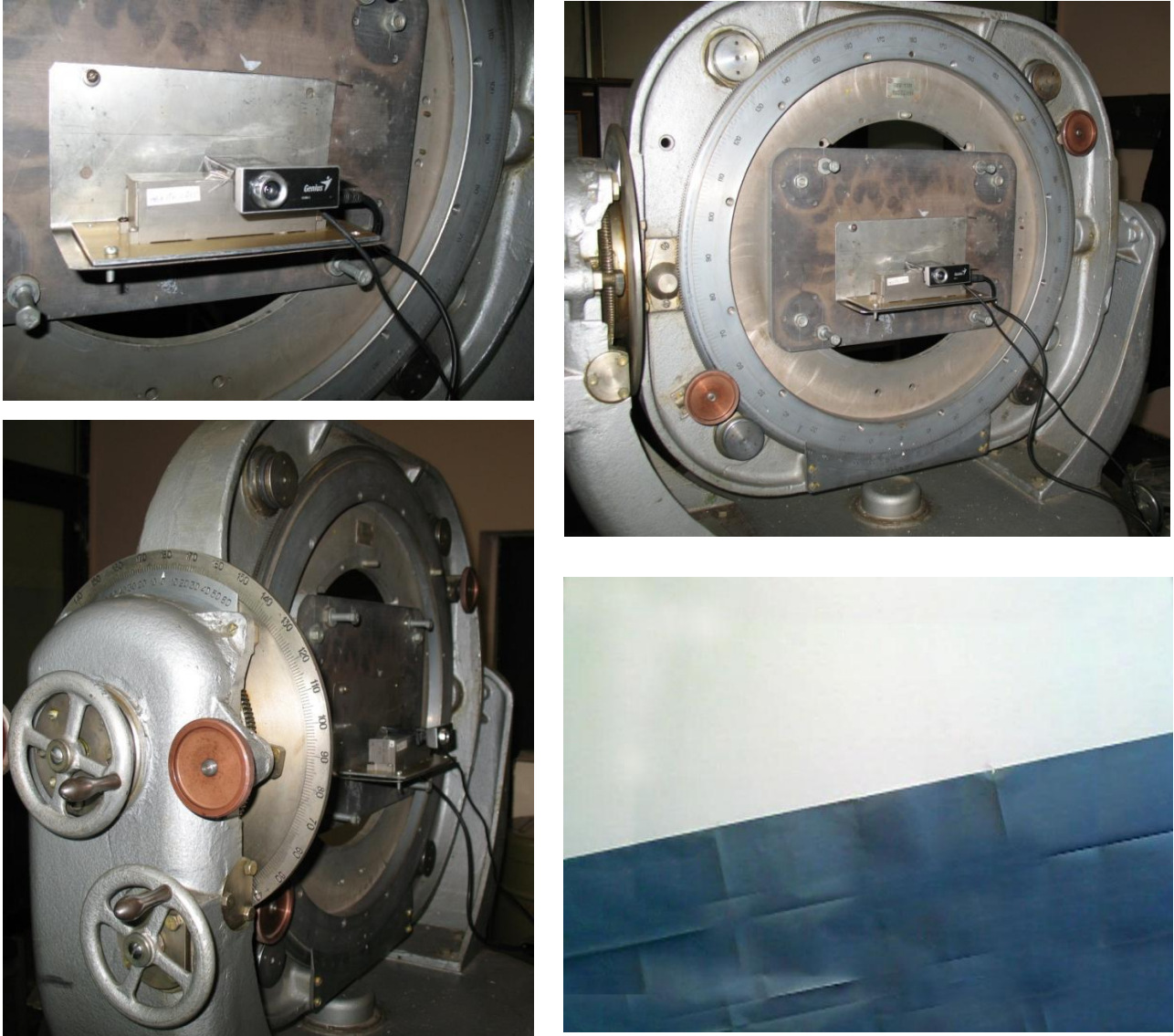


Рис. 3. Експериментальна установка та вигляд отриманого камерою відеозображення умовного горизонту

**Четвертий розділ** присвячений розробці оптичної системи визначення відстані (ОСВВ) до перешкод на основі стереобачення, що дозволяє підвищити збереження БПЛА під час польоту. ОСВВ працює на базі бортового обчислювача із програмно прописаним розробленим у даній роботі алгоритмом та двох відеокамер, які встановлені з умовою паралельності їх оптичних вісей та на певній фіксованій відстані одна від одної.

Принцип визначення відстані  $D$  до перешкоди на основі стереобачення зображено на рисунку 4 і можна записати за допомогою виразу (2).

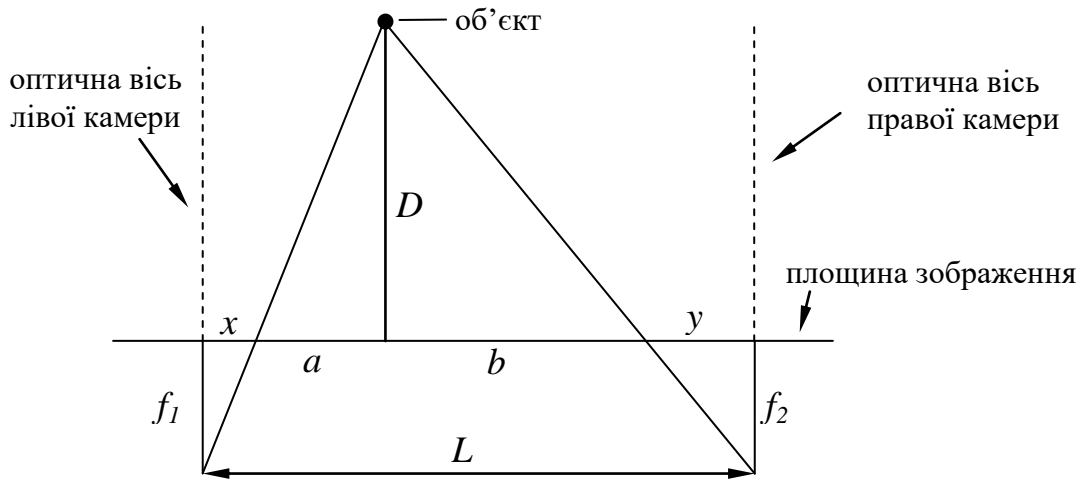


Рис. 4. Геометрія визначення відстані до об'єкту

$$D = \left( \frac{L}{x + y} - 1 \right) f, \quad (2)$$

де  $L$  - відстань між паралельними оптичними вісями камер,  $f_1 = f_2 = f$  - фокусні відстані камер,  $x$  - горизонтальне зміщення лівого зображення,  $y$  - горизонтальне зміщення правого зображення.

Для визначення горизонтальних зміщень двох зображень побудовано алгоритм, в основу якого покладено кореляційно-екстремальний метод визначення схожості зображень. Реалізація алгоритму у програмному вигляді проводилась із використанням наявних у відкритому доступі джерел.

За відсутності повної інформації про параметри використовуваних у прототипі веб-камер, проведено експериментальне встановлення залежності між горизонтальним зміщенням двох зображень  $H = x + y$  та відстанню до об'єкту  $D$ . Із цією метою було проведено низку експериментів в ході яких об'єкт встановлювався на різних відстанях від відеосистеми та проводилось обчислення горизонтального зміщення. В результаті експериментів були отримані експериментальні криві, які були інтерпольовані дробно-раціональним наближенням та встановлена залежність у вигляді:

$$D = \frac{p_1 H + p_2}{H^2 + q_1 H + q_2}, \quad (3)$$

де  $H$  - горизонтальну зміщення двох зображень, а  $p_i, q_i$  - певні коефіцієнти інтерполяційного поліному.

На базі отриманих результатів була побудована оптична систем визначення відстані до перешкоди, структурна схема якої наведена на рисунку 5.

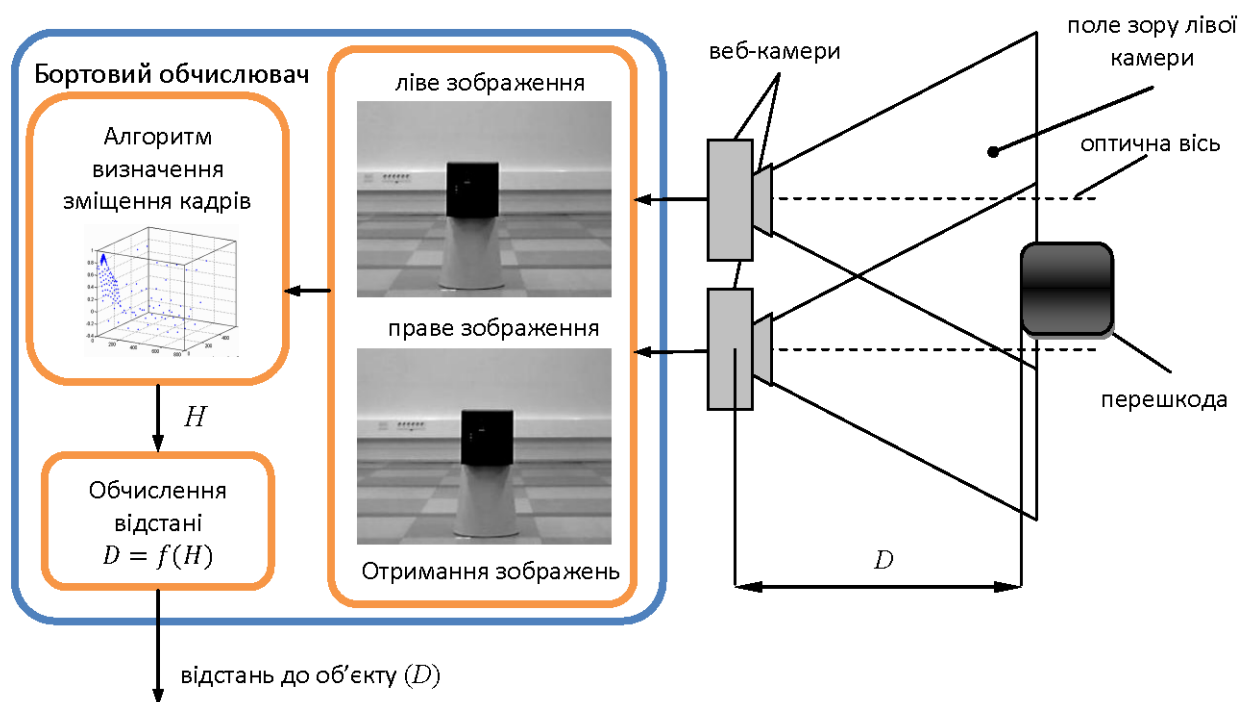


Рис. 5. Принцип роботи ОСВВ

Також експериментальна частина показала, що даний алгоритм ефективний для визначення відстані до перешкод, що знаходяться на відстані до 10 м. Це накладає певні обмеження на розміри літальних апаратів, на яких може бути використана така система. Таким чином було рекомендовано встановлення розробленої ОСВВ на малих маневрених БПЛА.

**П'ятий розділ** присвячений побудові комплексованої системи навігації та орієнтації ЛА із датчиком оптичного горизонту. Обрано схемо-технічне рішення із урахуванням вартісних та масогабаритних умов пред'явлених до системи, за яким до базового набору навігаційних засобів КСОН входять БІНС, СНС і магнітометр, а також розроблений ДОГ. Інтегрування перерахованих навігаційних засобів в єдиний навігаційний комплекс КСОН реалізовано на основі алгоритму оптимального фільтру Калмана у слабкозв'язаному виконанні, що дозволило отримати більш гнучку архітектуру системи навігації. Для цього розглянуто алгоритм функціонування КСОН, який можна умовно розділити на три частини: алгоритм визначення параметрів орієнтації об'єкту; алгоритм визначення навігаційних параметрів руху; алгоритм оптимального фільтру Калмана (ОФК) та отримана модель системи у просторі станів. На рисунку 6 наведено структурну схему розробленої КСОН із використанням позначень моделі у просторі станів, за якими  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta V_N$ ,  $\Delta V_E$ ,  $\Delta V_B$  - похибки вимірювання широти, довготи, висоти та швидкості об'єкту;  $\Delta\varphi_x$ ,  $\Delta\varphi_y$ ,  $\Delta\varphi_z$  - кути, що описують неточність положення ГСТ визначеного за допомогою БІНС;  $m_{\omega_i}$  ( $i = 1 \dots 3$ ),  $m_{a_i}$  ( $i = 1 \dots 3$ ) - повільномінливі складові випадкових похибок датчику кутових швидкостей та акселерометру; - матриця направляючих косинусів БІНС; індексами «БІНС», «СНС», «ДОГ» та «М» позначені виміряні відповідним засобом параметри руху.

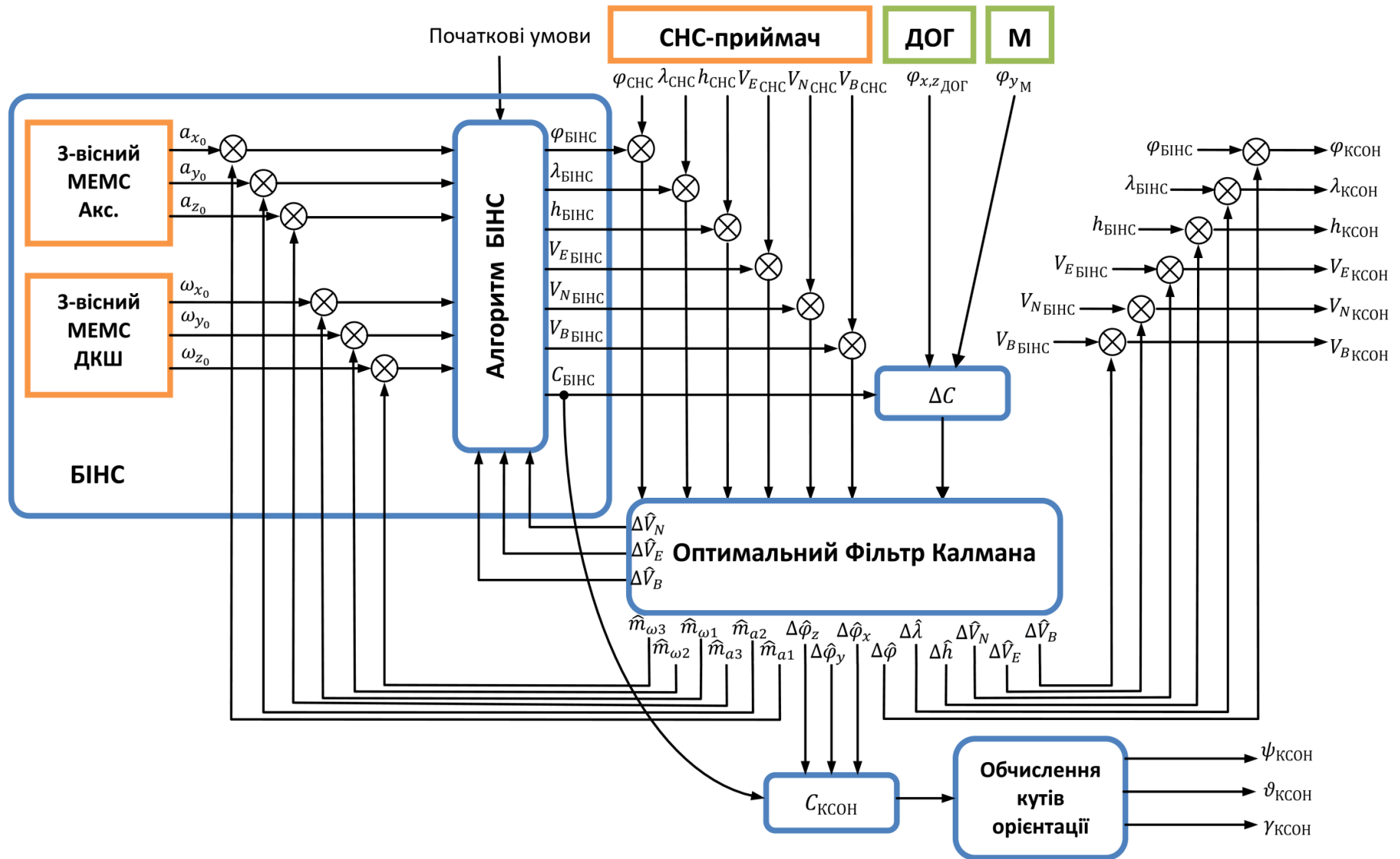


Рис. 6. Структурна схема розробленої КСОН

В розділі також розглянуті склад моделей похибок СНС і магнітометру для їх урахування у комплексованій системі.

**Шостий розділ** присвячений напівнатурному моделюванню та експериментальному дослідженню комплексованої системи навігації та орієнтації літального апарату з датчиком оптичного горизонту.

Напівнатурне моделювання проводилось із використанням експериментальних даних, які були отримані при випробуванні реальних датчиків. Так помилки вимірювання ДОГ були отримані у розділі 3. З метою з'ясування доцільності використання датчика оптичного горизонту у системі порівнюємо СКВ похибок:

- датчика оптичного горизонту;
- базової системи без ДОГ;
- комплексованої системи, що використовує ДОГ для вимірювання кутів крену і тангажу.

Деякі з результатів наведені в таблиці 1, а на рисунку 7 представлено діаграму, яка відображає рівні підвищення точності визначення кутів орієнтації (на прикладі каналу тангажу) при введенні у систему ДОГ для комбінацій датчиків різної точності.

Таблиця 1. Похибки систем орієнтації, побудованих на первинних вимірювачах різної точності

№	СКВ похибки у запуску		СКВ похибки ДОГ, °		СКВ похибки базової КСОН, рад	СКВ похибки КСОН з ДОГ, рад		Відношення до СКВ похибки КСОН з ДОГ	
	акселерометра, м/с <sup>2</sup>	ДКШ, °/год	крен	тангаж		крен	тангаж	СКВ похибки базової КСОН	СКВ похибки ДОГ
								тангаж	тангаж
1	0,024	381	0,22	0,17	0,0032	0,0019	0,0017	1,83	1,75
2	0,024	700	0,22	0,17	0,0049	0,0034	0,0031	1,6	0,96
3	0,24	381	0,22	0,17	0,024	0,0023	0,0019	12,5	1,6
4	0,004	0,12	0,22	0,17	$41 \cdot 10^{-5}$	$14 \cdot 10^{-5}$	$12 \cdot 10^{-5}$	3,34	24,7
5	0,0001	0,12	0,22	0,17	$1,85 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	<1,01	160
6	0,24	2000	1	1	0,025	0,0083	0,0083	3,05	2,1
7	0,004	0,12	1	1	0,0004	$27 \cdot 10^{-5}$	$27 \cdot 10^{-5}$	1,5	65

Як видно із таблиці 1 та діаграми (рис. 7), для деяких конфігурацій систем орієнтації включення до їх складу ДОГ дозволяє зменшити СКВ похибки більш ніж у 10 разів. Навіть у випадку, коли базова КСОН визначає кути набагато точніше а ніж ДОГ, спільна обробка може підвищити точність у 3 рази (п. № 4). Однак для деяких конфігурацій (п.п. № 2, 5) комплексування менш ефективне. Визначимо граничні рівні похибки первинних вимірювачів системи орієнтації, при яких доцільно слабкозв'язане комплексування із ДОГ.

Аналіз даних таблиці показує, що для більш грубих датчиків кутових швидкостей використання ДОГ у складі КСОН менш вигідне у порівнянні із використанням ДОГ окремо. При цьому найбільший вплив має шуми вимірювачів. Якщо середньоквадратичне відхилення помилки датчиків кутових швидкостей

перевищує  $650 \text{ }^\circ/\text{ч}$  (п.п. № 2, 6), інформація отримана лише від ДОГ буде більш точною, ніж від комплексованої системи. Для більш точних ДКШ спільна оцінка параметрів орієнтації краща, ніж оцінка від ДОГ окремо, навіть якщо в системі застосовуються найгрубіші акселерометри.

При підвищенні точності акселерометрів відношення середньоквадратичних відхилень помилок базової системи і комплексованої системи з ДОГ збільшується. Якщо точність блоку акселерометрів, як інклінометра, набагато вище точності ДОГ, зазначені СКО стають майже рівними між собою. Для поліпшення точності на 33%, акселерометри базової системи повинні мати СКО помилки більш  $0,00065 \text{ м/с}^2$ .

В представленій комплексованій системі помилки СНС на точність визначення кутів крену і тангажу не впливають. Чисельні значення таблиці і результати імітаційного моделювання отримані при значеннях СКО помилок вимірювання координат і швидкостей за допомогою СНС  $10 \text{ м}$  і  $0,1 \text{ м/с}$  відповідно.

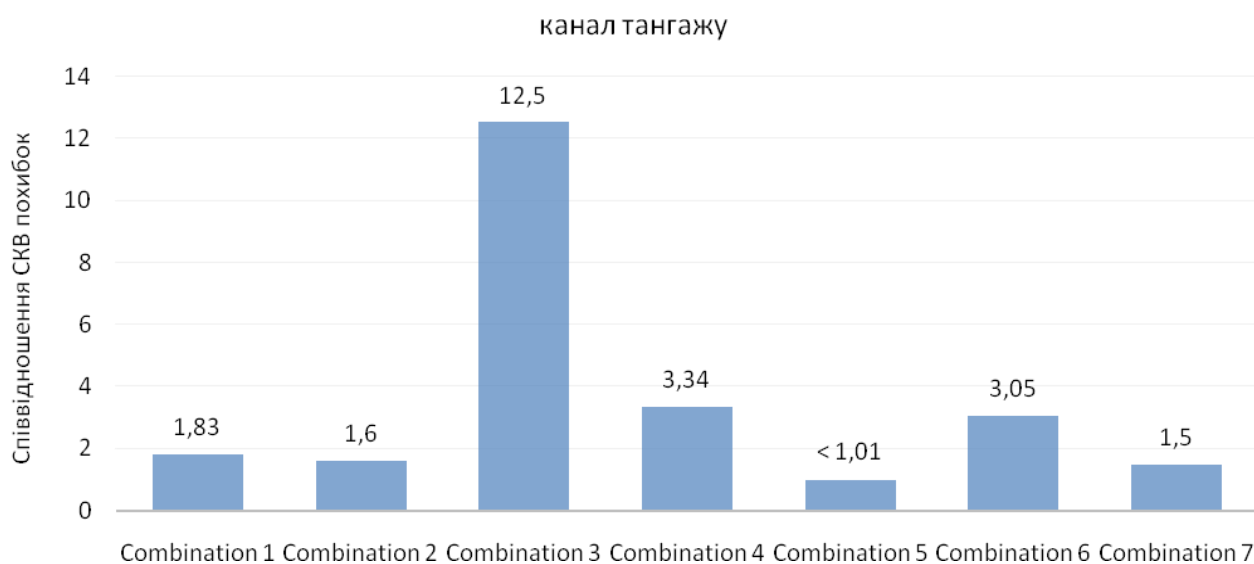


Рис. 7. Співвідношення СКВ похибок двох систем на прикладі каналу тангажу

Для описаного у п. № 1 таблиці 1 складу вимірювачів було виконано розрахунок дисперсій похибок оцінювання, а також проведено імітаційне моделювання роботи комплексованої системи навігації та орієнтації. На рисунку 8 наведені похибки оцінювання кутів крену, тангажу і рискання із введенням у базову КСОН датчику оптичного горизонту (рис. 8, б) та без нього (рис. 8, а).

Також з рис. 8, а видно, що похибка визначення кутів є зміщеною. Це пов'язано із наявністю нестійких зміщень нульових сигналів інерціальних вимірювачів, які обумовлені їх неповторюваністю у кожному запуску або неточністю калібрування. Результати моделювання (рис. 8, б) свідчать про зниження цього зміщення приблизно у п'ять разів при використанні інформації від ДОГ.

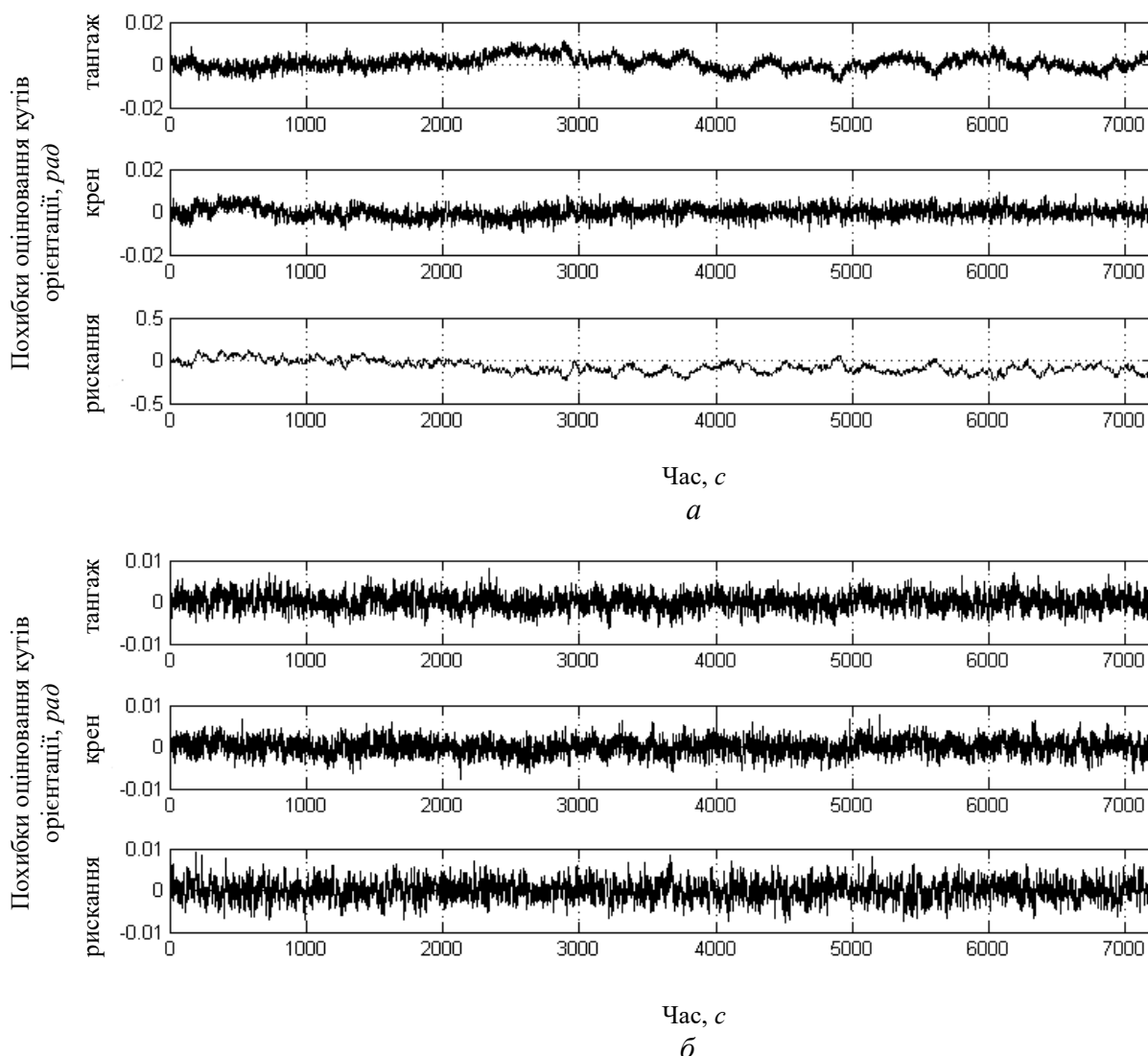


Рис. 8. Результати імітаційного моделювання КСОН без використання ДОГ (*a*) та із використанням ДОГ (*б*) по кутам тангажу, крену та рискання відповідно

Таким чином, спираючись на результати моделювання можна зробити висновки про те, що точність ДОГ, яка за певних умов може сягати точності у декілька десятих градуса можна підвищити шляхом комплексування навіть із інерціальними вимірювачами невисокої точності (СКВ похибки ДКШ у запуску до  $650^\circ/\text{ч}$ ). Також визначено, що датчик оптичного горизонту із такою точністю доцільно використовувати у складі КСОН сумісно з акселерометрами, в яких похибка у запуску має СКВ не менш  $65 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ . Для багатьох конфігурацій системи комплексування дозволяє зменшити СКВ похибки визначення кутів більш ніж у 3 рази.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна наукова задача розробки комплексованої системи орієнтації та навігації для БПЛА на базі мікроелектромеханічних датчиків, а також із використанням оптичної інформації, за рахунок якої здійснюється підвищення точності визначення кутів орієнтації.

Проведені у дисертаційній роботі дослідження дозволили отримати наступні нові результати:

1. Вперше розроблено алгоритм визначення поточних кутів крену і тангажу ЛА на основі алгоритмів розпізнавання оптичної лінії горизонту, побудованих лише на базі методів машинного зору та розпізнавання образів, який має необхідні точність визначення лінії горизонту, в тому числі за рахунок застосування колової маски для усунення викривлених областей зображення та швидкість обробки, що дозволило його використання у бортових обчислювачах та видачу інформації у реальному масштабі часу.

2. Вперше сформовано датчик оптичного горизонту на базі бортової камери і бортового обчислювача, який здатний визначати кути крену та тангажу із похибкою  $\leq 0,5^\circ$  та на відміну від існуючих моделей не потребує додаткових фінансових витрат.

3. Вперше розроблено алгоритм та оптичну систему визначення відстані до перешкоди на основі методів стереобачення, яка дає можливість підвищити безпеку польоту БПЛА у мінливому оточуючому середовищі.

4. Вперше показано, що використання датчика оптичного горизонту у комплексованих системах орієнтації та навігації, побудованих на мікроелектромеханічних датчиках, дає можливість підвищити точність визначення кутів орієнтації у три рази, що має велике значення при побудові систем орієнтації та навігації для БПЛА в умовах існуючих масогабаритних та вартісних обмежень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що:

1. Розроблені алгоритми визначення горизонту дозволяють сформуванню самостійні датчики оптичного горизонту різної точності на борту літального апарату, які відповідають масогабаритним вимогам малих безпілотних літальних апаратів і в той же час не потребують великих фінансових витрат.

2. Сформовано оптичну систему визначення відстані до перешкод, яка при встановленні на борту малого маневреного БПЛА дозволить забезпечити його збереження при виконанні місій в умовах мінливого середовища.

3. Встановлено, що введення розробленого датчика оптичного горизонту у систему орієнтації і навігації побудовану із використанням недорогих мікроелектромеханічних датчиків середньої точності, магнітометрі та приймачі СНС дозволило підвищити точність загальної комплексованої системи у три рази у порівнянні із базовою.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Мальшева Ю.А.* Применение методов компьютерного зрения для построения алгоритмов распознавания горизонта / Ю. А. Мальшева // Механіка гіроскопічних систем. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. - Випуск 19. – С. 174-182.
2. *Мальшева Ю.А.* Комплексированная система ориентации и навигации с оптическим датчиком горизонта / Ю. А. Мальшева // Інформаційні системи, механіка та керування, – К.: НТУУ «КПІ», 2012. - Випуск 8. – С. 23–32.
3. *Збруцкий А.В.* Точность комплексированной системы ориентации и навигации с оптическим датчиком горизонта / А.В.Збруцкий, Ю.А.Мальшева, В.В.Бурнашев // Информационные системы, механика, управление.– К. : НТУУ «КПІ»,

2014. – Випуск 11. – С. 5-12. (Особисто здобувачем було отримані наступні результати: розроблено датчик оптичного горизонту, сформовано інтегровану систему орієнтації та навігації із мінімально-необхідному переліку первинних сенсорів).

4. *Zbrutsky A. Experimental tests of an algorithm of roll and pitch estimation using only optical information / A. Zbrutsky, J.A. Malysheva // Механіка гіроскопічних систем. – К.: НТУУ«КПІ», 2015. - Випуск 29. – С. 5-14. (Особисто здобувачем було отримані наступні результати: отримано формули для обчислення кутів крену та тангажу по зображенню лінії горизонту, проведено калібрування відеокамери, проведено експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів).*

5. *Rahmouni M. An Integrated Aircraft Navigation System with Optical Horizon Sensor / M. Rahmouni, J. Malysheva // Aviation [Aviacija]. – Taylor & Francis Group, 2012. – № 16(4). – С. 109-114. (Особисто здобувачем було отримані наступні результати: сформульовано алгоритм розпізнавання лінії горизонту на зображенні, розроблено датчик оптичного горизонту, сформовано інтегровану систему орієнтації та навігації із мінімально-необхідному переліку первинних сенсорів та проведено моделювання та аналіз роботи системи із датчиком оптичного горизонту).*

6. *Малишева Ю.О. Розробка навігаційної системи підвищеної точності для малого безпілотного літального апарату / Ю.О. Малишева, Н.І. Покладова // IV міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки»: Збірка доповідей, Частина I, – К. : НТУУ«КПІ», 2007. - С. 326-332. (Особисто здобувачем було отримані наступні результати: розроблено алгоритм навігації по опорним точкам оперативного знімку та еталонної карти, проведено моделювання та аналіз траєкторного управління літального апарату).*

7. *Малишева Ю.О. Розробка навігаційної системи підвищеної точності для малого безпілотного літального апарату / Ю.О. Малишева // Гіротехнології та конструювання літальних апаратів: Тези доп. учасн. XI наук.-техн. конф. студ. та молодих вчених. – К. : ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2007. – 72 с.*

8. *Malysheva Julia A computer vision technique implementation for a horizon recognition algorithms designing / J. Malysheva // Інтелект, інтеграція, надійність: Тези доп. учасн. I міжнар. конф. студ. та молодих вчених, – К. : ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2008. – 35 с.*

9. *Малишева Ю.О. Система навигации и ориентации летательного аппарата на оптических датчиках / Ю.О. Малишева // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки»: Збірник доповідей, Частина I, 21-22 квітня - К. : ІВЦ, “Видавництво «Політехніка»”, 2011. - С. 65-70.*

10. *Малишева Ю.О. Корректируемая оптическая система навигации и ориентации летательного аппарата / Ю.О. Малишева // Ювілейна Науково-практична конференція, присвячена 50-річчю першого польоту людини в космос «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки»: Тези доп. та виступів, 7-8 березня - К., 2011. - С. 25-26.*

11. *Malysheva J. An Integrated Aircraft Navigation System [Електронний ресурс] / J. Malysheva // IEEE 2nd International Conference Actual Problems of*

Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings, Kyiv, 15-17 October, 2013. - С. 169-172. – Режим доступу : <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6705316>

12. *Zbrutsky A.V.* Navigation and orientation system with optical horizon sensor for mini UAV [Електронний ресурс] / A.V. Zbrutsky, J.A. Malysheva, V.V. Burnashev // IEEE 3rd International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 14-17 October, 2014. - С. 15-16. – Режим доступу : <http://www.ieeeexplore.us/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6979717&url=http%3A%2F%2Fwww.ieeeexplore.us%2Fxppls%2Ficp.jsp%3Farnumber%3D6979717> (Особисто здобувачем було отримані наступні результати: розроблено датчик оптичного горизонту та проведено його випробування, сформовано інтегровану систему орієнтації та навігації на мінімально-необхідному переліку первинних сенсорів).

13. *Zbrutsky A.V.* Navigation and orientation system with optical horizon sensor for mini UAV / A.V. Zbrutsky, J.A. Malysheva, V.V. Burnashev // X Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки»: Збірник доповідей, Частина I, 16-17 квітня – К. : ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2015. - С. 453-456. (Особисто здобувачем було отримані наступні результати: розроблено датчик оптичного горизонту та проведено його випробування, сформовано інтегровану систему орієнтації та навігації на мінімально-необхідному переліку первинних сенсорів).

## АНОТАЦІЯ

**Малишева Ю.О. Інтегрована система навігації та орієнтації літального апарату з оптичними приладами. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2016 р.

Розроблений алгоритм визначення поточних кутів крену і тангажу ЛА за оптичною інформацією, що надається бортовою відеокамерою, використовуючи техніку машинного зору. У його основу покладено методику розпізнавання оптичної лінії горизонту на зображенні. Даний алгоритм має необхідні швидкість обробки та точність визначення лінії горизонту, в тому числі за рахунок застосування колової маски для усунення викривлених областей зображення. Вказані характеристики роблять можливим використання розробленого алгоритму у бортових обчислювачах та видачу інформації у реальному масштабі часу.

Сформовано датчик оптичного горизонту на базі бортової камери і бортового обчислювача, який здатний визначати кути крену та тангажу із похибкою  $\leq 0,5^\circ$  та на відміну від існуючих моделей не потребує додаткових фінансових витрат.

Розроблений алгоритм, на якому побудована оптична система визначення відстані до перешкоди на основі методів стереобачення. Така система дає можливість підвищити безпеку польоту БПЛА.

Показано, що використання датчика оптичного горизонту у комплексованих системах орієнтації та навігації, побудованих на мікроелектромеханічних датчиках,

дає можливість підвищити точність визначення кутів орієнтації у три рази. Цей фактор може мати вирішальне значення при побудові систем орієнтації та навігації для БПЛА в умовах існуючих масогабаритних та вартісних обмежень.

*Ключові слова:* комплексована система орієнтації та орієнтації, датчик оптичного горизонту, машинний зір, напівнатурне моделювання, розпізнавання лінії горизонту.

## АННОТАЦІЯ

**Малышева Ю.А. Интегрированная система навигации и ориентации летательного аппарата с оптическими датчиками. – Рукопись.**

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.03 – Гироскопы и навигационные системы, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2016 г.

Диссертационная работа посвящена разработке системы ориентации и навигации для беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на микроэлектромеханических датчиках первичной информации, точность определения углов ориентации которой была повышена за счёт введения информации от оптического датчика горизонта, этапы разработки которого также представлены в данной диссертационной работе.

Разработано два алгоритма определения текущих углов крена и тангажа ЛА по оптической информации предоставляемой бортовой видеокамерой используя подходы машинного зрения. В их основу были заложены различные методики распознавания оптической линии горизонта на изображении, что позволило получить алгоритмы с разными характеристиками по точности определения линия горизонта и скорости обработки видеопоследовательности. Проведенные экспериментальные исследования показали, что оба алгоритма являются эффективными и позволяют сформировать их основе оптический датчик горизонта. Приемлемая скорость обработки и точность определения в частности обеспечивается за счёт применения круговой маски для устранения искривлённых областей изображения. Указанные характеристик делают возможным применение разработанного алгоритма в бортовых вычислителях и выдачу информации в реальном времени.

Сформирован датчик оптического горизонта на базе бортовой видеокамеры и бортового вычислителя. Экспериментальные исследования в лабораторных условиях показали, что указанный датчик способен определять углы крена и тангажа с погрешностью  $\leq 0,5^\circ$  и в отличие от существующих моделей не требует дополнительных финансовых затрат для БПЛА с бортовой видеокамерой.

Также в работе рассмотрен вопрос повышения сохранности БПЛА также за счёт использования оптической информации. Разработан алгоритм, который заложен в основу оптической системы определения расстояния до преграды на базе методов стереозрения. Проведенные экспериментальные исследования в лабораторных условиях показали, что данная система может быть использована на высокоманёвренных БПЛА.

На основе анализа существующих навигационных систем подобного класса выбран минимально-необходимый набор датчиков первичной информации для построения навигационной системы включающий: бесплатформенную навигационную систему, приёмник спутниковой навигационной системы, магнитометр и датчик оптического горизонта. Комплексирование составляющих элементов произведено с помощью оптимального фильтра Калмана. Результаты проведенного полунатурного моделирования показали, что использование датчика оптического горизонта в составе базовой комплексированной систем навигации и ориентации, построенной на микроэлектромеханических датчиках и приёмнике спутниковой навигационной системы даёт возможность повысить точность определения углов ориентации в три раза. Этот фактор может иметь решающее значение при построении систем ориентации и навигации для БПЛА в условиях существующих массогабаритных и стоимостных ограничений.

*Ключевые слова:* комплексированная система ориентации и навигации, датчик оптического горизонта, машинное зрение, полунатурное моделирование, распознавание линии горизонта.

## ABSTRACT

**Malysheva J.A. Integrated navigation system for an aircraft with optical sensor.– Manuscript.**

Thesis for obtaining the philosophy doctor degree in engineering, on specialty 05.11.03 – gyroscopes and navigation systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2016.

An algorithm for aircraft roll and pitch values estimation based on optical horizon line recognition is developed. The algorithm makes use only of machine vision techniques. It has required accuracy of horizon line detection, in particular due to circular mask usage for image distorted areas elimination and processing rate. Such performances allow the algorithm to be used in onboard computers as well as obtaining of processed information in real time.

The optical horizon sensor is designed based on onboard camera and computer which is able to calculate roll and pitch angles with accuracy  $\leq 0,5^\circ$ . In contrast with available models such a sensor does not require additional expenses.

An algorithm defined the framework of optical system for distance estimation to the obstacles is developed, which is based on stereovision principals. Such a system allows to increase the safety of an UAV during the flight.

It is shown that the usage of optical horizon sensor as a part of integrated navigation system built with usage of microelectromechanical sensors proposes an opportunity of accuracy enhancement in tree times for pitch and roll estimation. This can be crucial factor in UAV navigation system design in existing conditions of cost and weight limitations.

*Key words:* integrated navigation system, optical horizon sensor, machine vision, simulation, horizon line recognition.