

представлених на здобуття ступеня кандидата технічних наук, а її автор, Артабаєв Юрій Зуберович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем.

Головний конструктор напрямку
розробки гіроскопів та навігаційних
систем АТ «Елміз», к.т.н.



С.В. Головач

Голові спеціалізованої вченої ради
К26.139.03 при Відкритому
Міжнародному університеті розвитку
людини «Україна»
03115, м. Київ, вул. Львівська, 23

ВІДГУК

**офіційного опонента Головного конструктора напрямку розробка
гіроскопів та навігаційних систем Акціонерного товариства «Елміз»
к.т.н., Головача Сергія Володимировича
на дисертаційну роботу Артабаєва Юрія Зуберовича за темою: «Методика
підвищення точності комплексованих навігаційних систем на основі
прогнозуючих моделей з використанням генетичних алгоритмів»,
яка подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 01.05.03 – Математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин і систем.**

Актуальність теми. За останні кілька десятиліть діючі фахівці у галузі розробки навігаційних систем різного призначення, у тому числі й для літальних апаратів, стали свідками бурхливого розвитку сучасної бази електронних компонентів, зокрема сигнальних мікропроцесорів, аналогово-цифрових, цифро-аналогових перетворювачів, тощо. Доступ до сучасної радіоелектронної бази подібних елементів, мікросхем значно розширив можливості побудови складних систем управління у відносно невеликих габаритах, а також значно скоротив для інженерів-розробників перехід від процесу створення математичних алгоритмів до не менш важливого процесу апаратної реалізації таких алгоритмів. У свою чергу неймовірного розвитку також зазнали гіроскопічні та акселерометричні датчики, що являються невід'ємною частиною будь-яких навігаційних систем об'єктів з високим рівнем динаміки. Такі датчики є першоджерелами інформаційно-вимірювальних сигналів на основі яких навігаційні обчислювачі здатні вирішувати ті чи інші поставлені завдання. Отже можна відзначити, що на даний момент відбувається надзвичайно активний розвиток систем управління рухомими об'єктами. З

однієї сторони йде безперервний розвиток як навігаційних датчиків і інерціальних навігаційних систем в цілому (ІНС), так і обчислювальних електронних засобів, зростає їх потужність, надійність, зменшуються габарити і ціна, а з іншої сторони оптимізуються вже існуючі алгоритми управління, що в свою чергу вивільняє багато обчислювальних ресурсів під застосування більш нових та складних алгоритмів управління ніж ті, що були відомі раніше. У зв'язку з цим, розробка таких нових алгоритмів є на сьогодні дуже актуальною задачею. Така задача є насамперед актуальною для навігаційних систем як цивільної так і бойової техніки яка працює в режимі автопілотування. У даній роботі порушені такі надзвичайно важливі та актуальні питання як підвищення точності вирішення навігаційних завдань, ідентифікація та корекція похибок автономної інерціальної навігаційної системи, попередня обробка зібраних даних для застосування у іноваційних алгоритмах прогнозування. Високоточні алгоритми навігації завжди були і є однією з пріоритетних складових будь-якої ефективної системи управління рухами літальних апаратів, а тому можна без сумніву вважати, що тема роботи має значну актуальність, особливо в наш час з урахуванням викликів, що ставить сьогодення нашої державі. Неможливо також нехтувати той факт, що результати досліджень, викладені у дисертаційній роботі мають на меті практичну направленість, що є надзвичайно цінною складовою актуальності роботи.

Дисертаційну роботу виконано у рамках “Концепції проекту Закону України “Про державне регулювання у сфері супутникової навігації” розпорядження Кабінету Міністрів України від 01 січня 2003 р. № 1-р.; “Концепції створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження)” розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 липня 2003 р. № 410-р.; “Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року” розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 березня 2011 р. № 238-р.; “Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2018 - 2022 роки” розпорядження Кабінету Міністрів України від 05 вересня 2018 р. № 629-р.;

“Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2021 - 2025 роки” розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 січня 2021 р. № 15-р.;

Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, їх достовірність. Використані у роботі методи аналізу та синтезу, програмні комплекси відповідають традиційним; результати, отримані автором, не суперечать існуючим уявленням щодо процесів та алгоритмів, які досліджуються. Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату. Для отримання положень і висновків щодо ефективності вдосконалень у системі управління літальним апаратом використано методи імітаційного моделювання із застосуванням стандартних пакетів MATLAB. Підтвердження висновків щодо оптимальності запропонованих методів підвищення точності навігаційних обчислень були отримані у результаті застосування комп’ютерного моделювання методів теорії автоматичного управління. Всі результати, що були отримані в роботі багаторазово обговорювались на науково-технічних конференціях та розглядались науковою спільнотою у наукових публікаціях у фахових виданнях.

Найбільш важливими результатами роботи, що мають наукову новизну, слід вважати такі:

1) Удосконалено методику підвищення точності навігаційних визначень комплексованих навігаційних систем, яка на відміну від існуючої дозволяє формувати інформаційний сигнал корекції навігаційних визначень ІНС на основі прогнозуючих моделей з використанням генетичних алгоритмів.

2) Розроблено метод корекції динамічних похибок блоку (датчиків кутової швидкості) ДКШ, що на відміну від існуючих, дозволяє компенсувати похибки від перехресних кутових швидкостей.

3) Розроблено новий метод корекції автономної ІНС заснований на нелінійній моделі похибок системи і сигналах з датчиків моментів прецесії, що

є його відмінною рисою і який не має аналогів в літературних джерелах.

4) Запропоновано метод формування безпосередньо не вимірюваних похибок автономної ІНС для корекції системи у вихідному сигналі.

5) Розроблено метод формування вимірювальних сигналів для генетичних алгоритмів, заснований на нелінійній моделі похибок ІНС, що застосовується для компенсації похибок автономної ІНС і передбачення маршруту та виходу в задану точку літального апарату (ЛА) для розпізнавання об'єкту та розвідки обстановки. Запропонований метод оцінки заснований на аналізі прогнозу помилок ІНС.

Практичне значення результатів, полягає в тому, що:

- вибір нелінійної моделі похибок ІНС оптимальної складності дозволив розробити методи високоточної корекції навігаційної інформації автономних систем, які легко можуть бути реалізовані в навігаційному обчислювачі або бортовому комп'ютері. Розроблені алгоритми корекції автономних навігаційних систем за рахунок використання тільки внутрішніх зв'язків дозволяють підвищити точність визначення параметрів орієнтації та навігації ЛА як в автономному режимі функціонування систем, так і в умовах корекції від зовнішніх датчиків інформації за рахунок організації ефективних обчислень;

- запропоновано метод формування вимірювань для генетичних алгоритмів, який застосовується для компенсації похибок автономної ІНС і передбачення маршруту та виходу в задану точку ЛА для розпізнавання об'єкту та розвідки обстановки. Оцінка точності виконання завдань ЛА дозволяє прийняти рішення про зміну сценарію польоту;

- розроблено метод позиціонування навігаційних систем рухомих об'єктів;

- про використання результатів розробок свідчать відповідні акти впровадження: на Державному підприємстві «Оризон-Навігація» під час виконання дослідно-конструкторської роботи, шифр «Вікно» (акт реалізації № 0060101/1117 від 28.10.2021р.); в ТОВ «Інноваційна компанія «Техенерго-СВ» під час виконання дослідно-конструкторської роботи, шифр «Вектор-СВ» (акт

реалізації від 30.09.2021р.) та в АТ «ЕЛМІЗ» під час виконання дослідно-конструкторської роботи «Інерціально-вимірювальний модуль ІВМ-25Л» (акт реалізації від 02.11.2021р.);

Рекомендації щодо використання результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи у вигляді теоретичного обґрунтування, інженерних методик, алгоритмів та рекомендацій можуть бути використанні у приладобудуванні при створенні програмно-математичного апарату для комплексованих ІНС на основі сучасних навігаційних мікроелектромеханічних датчиків. Також такі результати можна впровадити у навчальному процесі на кафедрі «Аерокосмічні системи управління» Національного авіаційного університету в навчальній дисципліні «Основи технологій виготовлення пристроїв БСУ» та в процесі дипломного та курсового проектування зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Повнота відображення результатів у публікаціях. За темою дисертації опубліковано 21 наукова праця, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України; 3 статті в наукових закордонних журналах країн Європейського Союзу; 10 матеріалів та тез доповідей на міжнародних та національних наукових та науково-практичних конференціях, семінарах, 3 в звітах про науково-дослідну роботу та в одному патенті України на винахід.

Публікації досить повно відображають отримані результати.

Зміст автореферату ідентичний до змісту основних положень дисертації та досить повно відображає зміст та сутність отриманих результатів.

Оцінка змісту дисертації. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, виконаною і оформленою відповідно до вимог.

Дисертаційна робота містить вступ, розширені анотації українською та англійською мовою, перелік умовних позначень, чотири основні розділи, загальні висновки по роботі, список використаних джерел та додатки.

Вступ містить усі необхідні кваліфікаційні ознаки. Висвітлено обґрунтування теми дослідження, мета, задачі, об'єкт, предмет дослідження, методи дослідження; наукова новизна та значущість результатів; особистий внесок, публікації автора, апробація результатів дисертації.

У першому розділі, присвяченому огляду основних сучасних методів навігації детально розглянуто існуючі варіанти супутникових навігаційних систем, наведені теоретичні відомості щодо базових понять їх функціонування. Зокрема розглянуті такі системи як GPS (NAVSTAR), ГЛОНАСС, Galileo та Beidou. У стислому, але інформативному вигляді розкрито принципи виконання вимірювань за допомогою таких супутникових систем.

Далі у першому розділі роботи описані інерціальні навігаційні системи, окремо увагу присвячено сучасним інерціальним датчикам – гіроскопам та акселерометрам, що являються основою ІНС. Наведено інформацію щодо сучасних тенденцій у застосуванні тих чи інших типів інерціальних датчиків у системах. Приведено дані одного з основних виробників ІНС на світовому ринку iXblue (Франція). Також наведено дані щодо розробок українських підприємств, таких як КП СПБ «Арсенал» та НПП «Хартрон-Аркус». При розгляді інерціальних систем досить значну увагу приділено точностним характеристикам різних систем. Такі характеристики зібрані в порівняльних таблицях, що є дуже зручним для вивчення подібної інформації.

Основну частину першого розділу присвячено прискіпливому розгляду комплексованих навігаційних систем, тобто можливим варіантам синтезу супутникових навігаційних систем (СНС) з ІНС та з іншими таким додатковими джерелами первинної інформації. Зокрема розглянуті такі варіанти можливого комплексування як роздільна схема; слабо зв'язана схема, жорстко зв'язана схема та глибоко інтегрована схема. Такі схеми наведено також у графічному вигляді і описано їх базові принципи роботи.

У заключній частині першого розділу приведено класифікацію похибок інерціальних навігаційних джерел і способи їх корекції. На основі викладених вище відомостей поставлено наукове завдання даної роботи.

Другий розділ присвячено аналізу існуючого науково-методичного апарату

з дослідження комплектованих навігаційних систем, а саме: дослідженню лінійних і нелінійних моделей навігаційних систем літальних апаратів (ЛА). Представлені нелінійні моделі похибок ІНС оптимального рівня складності: досить точно відображають основні особливості зміни похибок ІНС і можуть бути реалізовані в навігаційному обчислювачі. Проведено аналіз помилок навігаційних систем. Розглянуто питання корекції автономних навігаційних систем за допомогою фільтра Калмана. представлені оригінальні методи корекції навігаційних систем ЛА, розроблені з використанням відомої методики.

Третій розділ присвячений розробці науково-методичного апарату з підвищення точності навігаційних визначень комплексованих навігаційних систем. В розділі представлені оригінальні методи корекції навігаційних систем ЛА. Для корекції блоку датчиків кутових швидкостей запропонований алгоритм на основі лінійної моделі зміни їх динамічних параметрів. При корекції автономної ІНС використана нелінійна модель похибок ІНС і сигнали з датчиків моменту прецесії. Для випадку корекції безпосередньо невимірюваних параметрів запропонований спосіб формування компенсаційних сигналів, заснований на моделі похибок ІНС, скалярному підході та інформації про кути прецесії.

Також, третій розділ присвячений розробці способу динамічної оцінки точності ЛА при вирішенні завдання передбачення маршруту та виходу в задану точку ЛА для розпізнавання об'єкту та розвідки обстановки, а також способу корекції ІНС після зникнення сигналів від зовнішніх датчиків. Замість апріорних моделей похибок ІНС, встановленої на ЛА, запропоновано використовувати генетичного алгоритму для побудови нелінійних моделей похибок ІНС в польоті. Потім отримані моделі використовуються для прогнозу похибок ІНС при обчисленні маршруту та виходу в задану точку ЛА для розпізнавання об'єкту та розвідки обстановки. Для побудови моделі безпосередньо невимірюємих параметрів моделі ІНС сформований вектор вимірювань генетичних алгоритмів.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням.

Проведено моделювання тестової математичної моделі помилок ІНС, сформованих коректуючих сигналів і ГА. Результати математичного моделювання продемонстрували працездатність розроблених методів. Аналіз результатів математичного моделювання показав, що розроблені методи дозволяють підвищити ефективність обчислювань в БЕОМ тим самим підвищують ефективність навігаційних систем в автономному режимі і забезпечують виконання поставлених завдань ЛА.

Висновок містить перелік основних нових результатів дисертаційної роботи.

Зауваження та недоліки:

1) У першому розділі є плутанина з представленими рисунками та таблицями. Зокрема перший рисунок починається з нумерації 1.6, а таблиця – 1.4. В цілому рисунки розділу 1 мають досить низьку чіткість зображення через що є досить проблематичним розрізняти деякі надписи. У таблиці 1.4 викликає сумнів параметр №17 «Кутові швидкості» для УКННС, а саме 350 °/с. Наскільки мені відомо такий діапазон кутових швидкостей є занадто високим для системи на основі лазерних гіроскопів RL-28.

На мою думку, перший розділ є надмірно обширним і становить майже половину від усього обсягу роботи.

2) Нажаль ні в першому ні в другому розділі конкретно не вказано для якої саме навігаційної системи розробляється комплекс алгоритмів що становлять наукову новизну у даній роботі. Виходячи з практичного досвіду відомо, що будь-які алгоритми корекції, наприклад фільтр Калмана необхідно розробляти з урахуванням особливостей як навігаційної системи у якій буде застосовано даний алгоритм так і з урахуванням принципів функціонування окремих інерціальних датчиків, що входять у дану систему. Ураховуючи те, що в роботі вказано, що вирішено наукове завдання щодо розробки компенсації похибок датчика кутової швидкості (ДКШ) необхідно було б привести хоча б такі мінімальні відомості про даний датчик як його тип, клас точності навести зображення зовнішнього вигляду.

3) З другого та третього розділу випливає, що рівняння які розглядаються відносяться до гіростабілізованих платформ на основі роторних механічних гіроскопів. Нажаль такі навігаційні системи на основі гіростабілізованих платформ є вже досить застарілими для використання у літальних апаратах. На даний час для малогабаритних літальних апаратів широко використовуються інерціальні навігаційні системи на основі мікроелектромеханічних систем (МЕМС), звичайно у традиційному поєднанні з СНС. Такі прилади хоча і є у традиційному розумінні безплатформними (БІНС), проте, на даний час, це є вже настільки очевидним фактом, що навіть поняття БІНС вже являється не досить популярним. Наразі більш вживаним є поняття AHRS (Attitude and Heading Reference Systems) або курсо-вертикаль. У ЛА з більш критичними вимогами до надійності та точності визначення навігаційних параметрів також використовуються сучасні ІНС на основі або лазерних, або волоконно-оптичних гіроскопів. Такі сучасні датчики та системи на їх основі були описані в першій частині роботи, проте нажалі так і не були розглянуті при виведенні рівнянь для створення методів корекції саме їх похибок. Виходячи з цього є побажання до здобувача зосереджувати також увагу і на сучасних типах ІНС.

4) У третьому розділі вказано, що фільтр Калмана застосовується для високоточних і відповідно дорогих ІНС, а для систем більш грубого класу має труднощі застосування у разі, якщо невідома їх апіорна інформація і тому, у роботі використовується лише нелінійна модель похибок, яка була отримана у розділі 2. Проте слід згадати, що існує розширений варіант фільтра Калмана з можливостями адаптивного пристосування коваріаційної матриці та вектору стану. Звичайно розробка такого алгоритму є більш складною, проте це ніяк не пов'язано з вартістю або типом системи.

5) Нажаль у четвертому розділі що має назву «Прикладні дослідження з використанням розробленого НМА» наведено у вигляді графіків лише результати комп'ютерного моделювання розроблених методів. Проте попри всі переваги комп'ютеризованих методів дослідження складно або практично неможливо створити моделювання з урахуванням таких реальних чинників як впливи зміни температури, тиску, вібрації від працюючих двигунів тощо, які

можуть суттєво впливати на працездатність таких особливо складних алгоритмів які були представлені в роботі. Надзвичайно важливо мати підтвердження працездатності алгоритмів на реальних об'єктах у реальних умовах, які нажалі у даній роботі не були представлені.

6) У тексті роботи часто зустрічаються русизми, неточності у формулювання деяких понять, наприклад: “висока точність формування вихідної інформації” що ускладнює розуміння суті роботи. Є також плутанина у назвах параметрів, наприклад “систематичний дрейф” та “випадкове блукання нуля”, – без вказання до якого саме вимірювання відносяться ці характеристики вони є ідентичними. Недостатньо ілюстративного матеріалу по тексту дисертації та додатків з наведенням прикладів моделей, програм і т.д. Відсутня систематизованість у списку використаних джерел.

В цілому представлені зауваження не впливають на наукову цінність та позитивну оцінку дисертаційної роботи, а також теоретичних і практичних результатів проведених досліджень.

Загальна оцінка та висновки. Дисертація Артабаєва Юрія Зуберовича «Методика підвищення точності комплексованих навігаційних систем на основі прогнозуючих моделей з використанням генетичних алгоритмів» є завершеною науково-дослідною роботою, що містить наукову новизну у вигляді нових вирішення актуальних наукових задач підвищення точності методів визначення похибок навігаційних систем та підвищення точності роботи навігаційної системи літального апарата в цілому у режимі автопілотування. Її зміст відповідає паспорту спеціальності 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем.

Актуальність проблематики дослідження, теоретичне та практичне значення одержаних результатів, обґрунтованість наукових положень і висновків та їх достовірність відповідає вимогам п.п. 9, 11, «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 до кандидатських дисертацій,

представлених на здобуття ступеня кандидата технічних наук, а її автор, Артабаєв Юрій Зуберович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем.

Головний конструктор напрямку
розробки гіроскопів та навігаційних
систем АТ «Елміз», к.т.н.

С.В. Головач