

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ІНСТИТУТ АЕРОКОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра систем керування літальними апаратами
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О.В. Збруцький**
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ___ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) _____ **173 «Авіоніка»** _____
(код та назва спеціальності)

на тему: «Калібровка блока чутливих елементів безплатформової інерціальної навігаційної системи»

Виконав: студент IV курсу, групи _____ **ВЛ-г61-1**
(шифр групи)

_____ **Штанько Іван Сергійович** _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ **д.т.н., професор, Збруцький О.В.** _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____ _____ _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет/інститут _____ аерокосмічних технологій _____
(повна назва)

Кафедра _____ систем керування літальними апаратами _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 173 «Авіоніка» _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О.В. Збруцький
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Штаньку Івану Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Калібровка блока чутливих елементів безплатформової інерціальної навігаційної системи

керівник проекту Збруцький Олександр Васильович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від _____ № _____

2. Строк подання студентом проекту 10 червня 2020 р.

3. Вихідні дані до проекту:

3.1. Склад блоку чутливих елементів; принцип роботи мікромеханічних інерціальних датчиків, їх взаємне розташування в тріадах. 3.2. Параметри математичної моделі вихідних сигналів БЧЕ, що підлягають визначенню.

3.2.1. По каналах тріади акселерометрів (12 коефіцієнтів): зміщення нулів сигналів (ЗН), Коефіцієнти перетворення (КП), коефіцієнти перехресної чутливості. 3.2.2. По каналах тріади гіроскопів (12 коефіцієнтів): ЗН, КП, коефіцієнти перехресної чутливості.

3.3. Стендове обладнання для проведення калібровки: технологічна плита для закріплення БЧЕ, поворотний стенд, блок живлення $\pm 27В$, комплект кабелів, ПК, програмне забезпечення для накопичення даних інерціальних датчиків, пакет програм для технічних розрахунків Matlab.

4. Зміст пояснювальної записки

4.1. Аналітичний огляд літератури з метою ознайомлення із сучасними алгоритмами і методами калібрування. 4.2. Визначення математичної моделі вихідних сигналів БЧЕ. 4.3. Розробка плану проведення калібровки блоку чутливих елементів, оцінка паспортних коефіцієнтів системи, висування вимог до стендового обладнання, розробка програмного забезпечення.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

5.1. Будова БЧЕ і математична модель вихідних сигналів (1 арк. ф.А1).

5.2. Математична модель оцінки параметрів БЧЕ (1 арк. ф.А1).

5.3. План і функціональна схема калібровки БЧЕ (1 арк. ф.А1).

5.4. Процедура проведення випробування (1 арк. ф.А1).

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 24 вересня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Аналітичний огляд літератури з сучасних методів калібровки БНС	24.09.19-14.10.19	
2.	Визначення математичної моделі вихідних сигналів БЧЕ	15.10.19-31.10.19	
3.	Розробка математичної моделі процесу калібрування БЧЕ	01.11.19-30.12.19	
4.	Формування вимог до обладнання	02.01.20-31.01.20.	
5.	Розробка плану проведення експерименту	01.02.20-31.03.20	
6.	Розробка програмного забезпечення	01.04.20-31.04.20	
7.	Підготовка та оформлення пояснювальної записки	01.05.20-20.05.20	
8.	Оформлення графічного та ілюстративного матеріалу	20.05.20-30.05.20	
9.	Захист дипломного проекту	Червень 2020	

Студент

(підпис)

Штанько І.С.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

Збруцький О.В.

(ініціали, прізвище)

Зміст

Перелік використаних скорочень **Ошибка! Закладка не определена.**

Вступ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Розділ 1. Аналітичний огляд літератури..... **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.1. Основні алгоритми і методи калібрування БНС .. **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.1.1. Загальна характеристика калібрувальних експериментів **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.1.2. Розробка плану калібрування..... **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.1.3. Сучасні методи оцінки інструментальних похибок датчиків **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.1.4. Традиційних підхід..... **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.1.5. Скалярний спосіб..... **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.1.6. Алгоритм калібрування по навігаційному рішенню **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.2. Методичні похибки **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.2.1. Методичні похибки, зумовлені лінеаризацією математичних моделей алгоритму калібрування **Ошибка! Закладка не определена.**

 1.2.2. Методичні похибки, зумовлені зміною температури в ході проведення експериментів за сталої температури..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Висновки по першому розділу **Ошибка! Закладка не определена.**

Розділ 2. Модель вихідних сигналів блока чутливих елементів **Ошибка! Закладка не определена.**

Закладка не определена.					Літ.	Маса	Масштаб
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Закладка не определена.					Ошибка! Закладка не определена.		
Закладка не определена.					Арк.	62	Аркушів
Закладка не определена.					НТУУ "КПІ" каф. СКЛА		
Закладка не определена.							
Закладка не определена.							

2.2. Математичні моделі вихідних сигналів інерціальних датчиків ..**Ошибка!**
Закладка не определена.

2.2.1. Математична модель вихідного сигналу акселерометра**Ошибка!**
Закладка не определена.

2.2.2. Кінематика невиставки **Ошибка! Закладка не определена.**

2.2.3. Математична модель вихідного сигналу гіроскопа.....**Ошибка!**
Закладка не определена.

Висновки по другому розділу **Ошибка! Закладка не определена.**

Розділ 3. Розробка плану проведення калібровки..... **Ошибка! Закладка не определена.**

3.1. Математична модель процесу калібровки **Ошибка! Закладка не определена.**

3.2. Визначення параметрів системи **Ошибка! Закладка не определена.**

3.2.1. Визначення масштабних коефіцієнтів та зміщень нулів сигналів датчиків **Ошибка! Закладка не определена.**

3.2.2. Визначення кутів невиставки датчиків **Ошибка! Закладка не определена.**

	3.3.	Процедура проведення калібровки...	Ошибка! Закладка не определена.					
			ВЛг61122.16.77.00.00ПЗ					
	3.3.1.	Розробка методів статичних випробувань	Ошибка! Закладка не определена.			Літ.	Маса	Масштаб
Змн.	определена.	Підпис	Дата					
Розроб.								
Перевір.	3.3.2.	Функціональна схема калібровки БЧЕ.....	Ошибка! Закладка не определена.			Арк.	62	Аркушів
						НТУУ "КПІ" каф. СКЛА		
Н. Контр.								
Затверд.								

3.3.3. Перевірка результатів калібровки **Ошибка! Закладка не определена.**

Висновки по третьому розділу..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Висновки 6

Список літератури 8

Додатки..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Додаток А..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Висновки

На основі проведеного аналізу науково-технічних джерел, було приділено увагу малій кількості методичного матеріалу і недостатній розповсюженості скалярного методу калібрування безплатформових інерціальних навігаційних систем. На основі цього була поставлена задача, що полягає в науковому обґрунтуванні розроблених і вдосконалених методів випробувань і калібровок для визначення параметрів БІНС, що базуються на властивості інваріантності. Завдання на дослідження було поставлене під час роботи на профільному підприємстві КП СПБ «Арсенал» в рамках досліджень по створенню

безплатформових інерціальних навігаційних систем бортового застосування.

Відомості про документ					Літ.			Маса			Масштаб		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.					Метою роботи стала розробка методу калібрування для			однозначного					
Перевір.					Збруцький О.В.			визначення параметрів викидних сигналів блока чутливих елементів, що входить			до складу БІНС. Основними вимогами до методу і плану калібрування є		
Н. Контр.								Арк. 62			Аркушів		
Затверд.								НТУУ "КПІ" Каф. СКЛА					

зниження трудовитрат і зменшення часу, необхідного для проведення калібрування, порівняно з традиційним векторним методом, шляхом розробки оптимальної ітераційної процедури калібровки і програмного забезпечення для автоматизованого розрахунку коефіцієнтів, що підлягають визначенню.

Провівши аналіз, для застосування в даній роботі був обраний скалярний метод калібровки. Рішення було прийняте базуючись на основних перевагах даного методу перед іншими, а саме понижені вимоги до високоточного стендового обладнання, малий час на проведення випробувань і низькі трудовитрати. Це дозволяє проводити калібровку і докалібровку БЧЕ без доступу до обладнаної лабораторії.

Розроблений план калібрувальних випробувань без використання спеціалізованих стендів, що дозволяє проводити калібрування блоків чутливих елементів і БНС в зборі. Процедура випробування складається з приведення оператором БЧЕ в 9 тестових положень; додаткових двох вимірів, до і після визначеного точного повороту на кут 90° , що дозволить визначити кути невивасти; зняття даних вихідних сигналів датчиків в кожному положенні, введення цих даних до ЕВМ для виконання розрахунку параметрів визначеної математичної моделі. Приклад програмного надається в додатку 1.

За результатами проведених досліджень визначено основний недолік скалярного способу калібровки, а саме відносно великі похибки визначення паспортних коефіцієнтів ВП. Базуючись на цьому, можна зробити висновок, що основною сферою застосування є БНС низької та середньої точності. Зокрема, використання методу для калібровки резервних навігаційних систем та систем стабілізації, що мають в своєму складі мікромеханічні інерціальні датчики такі, як ММА та ММГ.

Таким чином, мети даного дипломного проектування досягнуто. Представлений план калібровки дозволяє виконувати оцінку паспортних коефіцієнтів датчиків БЧЕ, як в лабораторних умовах, так і в умовах спеціалізованих сервісних центрів, для полегшення процедури обслуговування і

										Лист
										7
Смен.	Лист	№ докум	Подпись	Дата						

ВЛг61122.16.77.00.00ПЗ

ремонт обладнання, що мають в своєму складі БІНС. Вдосконалення алгоритму калібровки додатковим визначенням поворотом, дозволяє виконати оцінку кутів невивасти, що є перевагою над алгоритмами, запропонованими раніше.

В якості розвитку даної роботи, в майбутньому необхідно розробити процедуру і провести додаткові температурні випробування з метою визначення температурних похибок паспортних коефіцієнтів; розглянути і дослідити різноманітні алгоритми розрахунку, що можуть бути використані для оцінки параметрів при використанні зазначеного методу.

Список літератури

1. Аврутов В.В. Випробування інерціальних приладів // Навчальний посібник. –К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – 2016. – 205 с.
2. Головач С.В. Методи випробувань і калібрування безплатформових інерціальних навігаційних систем. – Київ. – 2017. – 142 с.
3. Аврутов В.В., Головач С.В., Мазепа Т.Ю. О скалярной калибровке инерциального измерительного модуля // XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб. – 2012. – С. 113-118.
4. Лакоза С.Л., Мелешко В.В. Скалярная калибровка акселерометров низкой и средней точности // Радиооптика. – МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. – 2015. – №1. С. 9-18.
5. Аврутов В.В. Влияние погрешности поворота стенда на точность калибровки блока гироскопов и акселерометров // Вестник НТУУ «КПИ». Серия ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2012. – Вип. 43. – С. 5-9.

										Лист
										8
Смен.	Лист	№ докум	Подпись	Дата						

ВЛг61122.16.77.00.00ПЗ

6. Дзуев А.А. Инвариантная калибровка блока акселерометров бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – Москва. – 2017.
7. Шаймарданов И.Х. Методика стендовой калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем различного класса точности. – Раменское. – 2019.
8. Измайлов А.Е. Исследование точности прецизионных акселерометров и повышение их качества // дис. ... канд. тех. наук. – Москва. – 2003. – 164с.
9. Мьинт Х.Н. Метод калибровки блока акселерометров инерциальной навигационной системы на испытательном стенде // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. – 2014. – №1. – С. 38-54.
10. Аврутов В. В., Головач С. В. Скалярный метод контроля и диагностики инерциально-измерительного модуля // Вестник НТУУ “КПИ”. Сер. Приборостроение. – 2014. – Вып.48 (2). – С. 14-20.
11. Драницына Е.В. Калибровка измерительного модуля прецизионной БИНС на волоконно-оптических гироскопах. – Санкт-Петербург. – 2016. – 89 с.
12. Егоров Ю.Г., Дзуев А.А. Инвариантный подход в задаче калибровки акселерометров // Тезисы докладов XLI Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых. – 2017. – С. 487-488.
13. Черняк Н.Г., Хазинедарлу Э. Метрологическая модель навигационного маятникового акселерометра и экспериментальное определение её параметров // Збірн. допов. VII Міжнародної н.-т. конф. ”Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки”. – Київ. – 2009. – С. 72-79.
14. Черняк Н.Г., Хазинедарлу Э. Калибровка навигационного маятникового акселерометра методом тестовых поворотов в гравитационном поле Земли // Механіка гіроскопічних систем.- научн.-техн. збірник. – Київ. 2009. – Вип. 20. – С. 81-91.
15. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: учебное пособие. – Кировоград. 2011. – 172 с.

Смен.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ВЛг61122.16.77.00.00ПЗ

Лист

9

16. Деревянкин А.В., Матасов А.И. Методика калибровки блока акселерометров при грубой информации о его угловом положении. Москва. – МГУ. – 2006. – 70 с.
17. Бабич О.А. Обработка информации в навигационных комплексах. – Москва. – Машиностроение. – 1991. – 512 с.
18. Измайлов Е.А. Скалярный способ калибровки и балансировки БИНС // Материалы XV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2008. – С. 145-154.
19. Черняк М.Г. Математична модель методичних вібраційних похибок маятникового компенсаційного акселерометра з пружним підвісом чутливого елемента // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2008. – № 2. – С. 81-88.
20. Черняк М.Г. Застосування мікромеханічного акселерометра для вимірювання кутів нахилу об'єкта // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології – наук.-техн. журнал. – 2010. – Т.1(7). – №4. – С. 9-16.
21. Лихолит Н.И., Черняк Н.Г., Шостак А.М., Юрьев Ю.Ю., Никонов И.В. Акселерометры для бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Збірн. допов. XI Міжнародної н.-т. конф. "Приладобудування: стан і перспективи". – Київ. – 2012 – С. 19-20.
22. Черняк М.Г. Похибки навігаційного маятникового компенсаційного акселерометра від просторових вібрацій основи // Механіка гіроскопічних систем. – научн.-техн. збірник. – Київ. – 2010. – Вип. 21. – С. 30-41.
23. Челпанов И.Б., Козлов Д.П., Кочетков А.В. Построение комплексной системы организации калибровки микромеханических датчиков // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – Том 8. – №1. – 2016.
24. Галба Е.Ф., Дейнека В.С., Сергиенко И.В. Взвешенное сингулярное разложение и взвешенное псевдообращение матриц с вырожденными весами. – Ж. – 2012. – том 52, номер 12. – С. 2115-2132.
25. М.А. Литвин, А.А. Малюгина, А.Б. Миллер, А.Н. Степанов, Д.Е. Чикрин

~~Типи помилок в інерціальних навігаційних системах і методи їх~~

										Лист
										10
Смен.	Лист	№ докум	Подпись	Дата						

ВЛг61122.16.77.00.00ПЗ

