

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

_____ **Олександр ЗБРУЦЬКИЙ**
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

“ ____ ” _____ 2020р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Системи керування літальними апаратами та комплексами»

спеціальності 173 «Авіоніка»
(код та назва спеціальності)

на тему: Стендове калібрування інерціального вимірювального модуля на обладнанні низької точності

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

Лесюк Маркіян Павлович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник к.т.н., доц. . Черняк М. Г. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент к.т.н., доц., Мариношенко О. П. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

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

(підпис)

Київ – 2020 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

| № з/п | Формат | Позначення | Найменування | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|------------------------------|------------------------------|------------------|----------|
| 1 | A4 | | Завдання на дипломний проєкт | 2 | |
| 2 | A4 | ДП ВЛг611.08.16.77.00.000 ПЗ | Пояснювальна записка | 116 | |
| 3 | A1 | ДП ВЛг611.08.16.77.01.000 | | 1 | |
| 4 | A1 | ДП ВЛг611.08.16.77.02.000 | | 1 | |
| 5 | A1 | ДП ВЛг611.08.16.77.03.000 | | 1 | |
| 6 | A1 | ДП ВЛг611.08.16.77.04.000 | | 1 | |
| 7 | A1 | ДП ВЛг611.08.16.77.05.000 | | 1 | |
| 8 | A1 | ДП ВЛг611.08.16.77.06.000 | | 1 | |

| | | | | ДП ВЛг611.16.77.000 | | |
|-----------|--------------------|-------|------|------------------------------------|---|--------|
| | ПІБ | Підп. | Дата | Відомість дипломного проєкту | Лист | Листів |
| Розробн. | Лесюк М.П. | | | | 1 | 1 |
| Керівн. | Черняк М.Г. | | | | КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. _____ Гр. _____ | |
| Консульт. | | | | | | |
| Н/контр. | | | | | | |
| Зав.каф. | Збруцький О. В. | | | | | |

Пояснювальна записка до дипломного проєкту

на тему: Стендове калібрування інерціального вимірювального модуля на обладнанні низької точності

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”**

Факультет (інститут) інститут аерокосмічних технологій
(повна назва)

Кафедра системи керування літальними апаратами
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 6.051103 Авіоніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

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

« ___ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт (роботу) студенту
Лесюку Маркіяну Павловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Стендове калібрування інерціального вимірювального модуля на обладнанні низької точності

керівник проєкту (роботи) Черняк Микола Григорович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ___ » _____ 201__ р. № _____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10 червня 2020 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): 3.1. Склад мікромеханічного інерціального вимірювального модуля (ІВМ) типу ADIS – встановлені на єдиній основі зі взаємно ортогональною орієнтацією вимірювальних осей (ВВ) три мікромеханічних акселерометра (МА), та три мікромеханічних датчика кутової швидкості (ДКШ).

3.2. Параметри метрологічної моделі (ММ) ІВМ, що ідентифікуються при калібруванні, (систематичні значення). 3.2.1. За каналами лінійного прискорення (12 коефіцієнтів): зміщення нулів (ЗН); коефіцієнти перетворення (КП); коефіцієнти перехресної чутливості (КПЧ). 3.2.2. За каналами кутової швидкості (12 коефіцієнтів): ЗН; КП; КПЧ.

3.3. Похибки визначення метрологічних параметрів ІВМ. 3.4.1. За каналами лінійного прискорення: ЗН - $\pm 5 \cdot 10^{-4} g$; КП - $\pm 0,05\%$; КПЧ - $\pm 10 \dots 20\%$. 3.4.2. За каналами кутової швидкості: ЗН - $\pm 5 \dots 10^0 / h$; КП - $\pm 0,05\%$; КПЧ - $\pm 10 \dots 20\%$.

3.4. Стендове обладнання для калібрування ІВМ. 3.4.1. За каналами лінійного прискорення: двовісна горизонтальна основа; кантовач, як задатчик тестових положень ІВМ; рівень бульбашковий; сервісна електроніка, персональний комп'ютер. 3.4.2. За каналами кутової швидкості: поворотна установка типу УПГ, або МПУ; сервісна електроніка, персональний комп'ютер.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

4.1. Огляд літератури з мікромеханічних МА, ДКШ, ІВМ, та методів їх калібрувань; 4.2.

Метрологічна модель ІВМ з визначенням усіх параметрів, що ідентифікуються при його

калібруванні; 4.3. Математична модель та методика визначення метрологічних параметрів ІВМ по каналам лінійного прискорення; 4.4. Математична модель та методика визначення

метрологічних параметрів ІВМ по каналам кутової швидкості; 4.5. Розробка стендів для визначення метрологічних параметрів ІВМ, формування вимог до стендового обладнання;
4.6. Експериментальні дослідження з калібрування ІВМ на розроблених стендах.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

5.1. Будова та метрологічні моделі ІВМ типу ADIS – 1 арк. ф. А1.

5.2. Математичні моделі визначення коефіцієнтів ІВМ - 2 арк. ф. А-1.

5.3. Функціональні схеми стендів для калібрування ІВМ – 2 арк.ф.А-1.

5.4. Експериментальні результати з калібрування ІВМ на розроблених стендах – 1 арк. ф.А-1.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 25 вересня 2019 р.

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту (роботи) | Строк виконання етапів проєкту (роботи) | Примітка |
|-------|--|---|----------|
| 1 | Огляд літератури з мікромеханічних МА, ДКШ, ІВМ, та методів їх калібрувань. | 25/09/2019-10/01/2020 | |
| 2 | Розробка метрологічної моделі ІВМ. | 25/09/2019-15/10/2019 | |
| 3 | Розробка математичної моделі та методики визначення метрологічних параметрів ІВМ по каналам лінійного прискорення. | 16/10/2019-25/11/2019 | |
| 4 | Розробка математичної моделі та методики визначення метрологічних параметрів ІВМ по каналам кутової швидкості. | 26/11/2019-15/12/2019 | |
| 5 | Розробка та виготовлення стендів для визначення метрологічних параметрів ІВМ, формування вимог до стендового обладнання. | 16/12/2019-25/02/2020 | |
| 6 | Експериментальні дослідження з калібрування ІВМ на розроблених стендах. | 26/02/2020-15/04/2020 | |
| 7 | Оформлення дипломного проєкту. | 16/04/2020-01/06/2020 | |
| 8 | Захист дипломного проєкту. | з 11/06/2020 | |

Студент

_____ (підпис)

Лесюк М. П.

(ініціали, прізвище)

Керівник проєкту (роботи)

_____ (підпис)

Черняк М.Г.

(ініціали, прізвище)

Студент: Лесюк Маркіян Павлович

Група: ВЛ-61

Керівник: Черняк Микола Григорович

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт містить 110 аркушів, 26 ілюстрацій, 6 таблиць, 6 графічних матеріалів, 4 додатки, 15 бібліографічних посилань

Метою дипломного проєктування є розробка математичної моделі та методики калібрування інерціального вимірювального модуля на обладнанні низької точності, вибір усіх метрологічних параметрів, що визначаються при калібруванні, розробка стендів для проведення калібрування приладу.

Розроблена математична модель і методика базуються на скалярному методі калібрування інерціальних вимірювальних модулів. На його основі розроблена математична модель що складається з чотирьох систем лінійних рівнянь, розроблена методика проведення калібрування за допомогою двадцяти двох положень приладу відносно вектору вхідної величини.

За розробленою математичною моделлю та методикою можливо визначити параметри метрологічної моделі інерціального вимірювального модуля, провівши калібрування на розроблених стендах з низькими вимогами до них.

Ключові слова: інерціальний вимірювальний модуль, калібрування, математична модель

Student: Lesyuk Markiyan Pavlovich

Group: VL-61

Leader: Cherniak M. G.

Abstract

Diploma project contains 110 sheets, 26 illustrations, 6 tables 6 sheets of the graphic part, 15 references.

The purpose of the diploma project is to develop a mathematical model and technique of calibration of the inertial measurement unit on low-precision equipment, selection of all metrological parameters determined during calibration, development of stands for calibration of the device.

The developed mathematical model and technique are based on the scalar method of calibration of inertial measuring modules. On its basis the mathematical model consisting of four systems of linear equations is developed, the technique of carrying out calibration by means of twenty-two positions of the device concerning an input vector is developed.

It is possible to determine the parameters of the metrological model of the inertial measurement unit by performing calibration on the developed stands with low requirements to them, using the developed mathematical model and technique.

Keywords: inertial measurement unit, calibration, mathematical model

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... 10

ВСТУП 12

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З МІКРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ, ДАТЧИКІВ КУОВОЇ ШВИДКОСТІ, ІНЕРЦІАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ МОДУЛІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ КАЛІБРУВАНЬ **Ошибка! Закладка не определена.**

1.1 Мікромеханічні акселерометри **Ошибка! Закладка не определена.**

1.2 Мікромеханічні датчики кутової швидкості **Ошибка! Закладка не определена.**

1.3 Інерціальний вимірювальний модуль **Ошибка! Закладка не определена.**

1.4 Методи калібрування ІВМ на базі МА та МГО **Ошибка! Закладка не определена.**

1.5 Постанова задачі дипломного проектування **Ошибка! Закладка не определена.**

1.6 Висновок до розділу 1 **Ошибка! Закладка не определена.**

2 МЕТРОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ІВМ З ВИЗНАЧЕННЯМ УСІХ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ІДЕНТИФІКУЮТЬСЯ ПРИ ЙОГО КАЛІБРУВАННІ **Ошибка! Закладка не определена.**

Висновки до другого розділу **Ошибка! Закладка не определена.**

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІВМ ПО КАНАЛАХ ЛІНІЙНОГО

ПРИСКОРЕННЯ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
ДП ВЛ611.08.16.77.000 ПЗ

| | | | | | | | |
|-----------|------|-------------|--------|------|---|--|--|
| | | | | | Ошибка! Закладка не определена. | | |
| | | | | | ДП ВЛ611.08.16.77.000 ПЗ | | |
| | | | | | <i>Стендове калібрування інерціального вимірювального модуля на обладнанні низької точності</i> | | |
| | | | | | <i>Пояснювальна записка</i> | | |
| | | | | | Літ. Маса Масштаб | | |
| | | | | | Арк. 8 Аркушів 110 | | |
| | | | | | НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ІАТ, Гр. ВЛ-з61-1 | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | |
| Розроб. | | Лесюк М. П. | | | | | |
| Перевір. | | | | | | | |
| Реценз. | | | | | | | |
| Н. Контр. | | | | | | | |
| Затверд. | | | | | | | |

- 3.1 Рівняння калібрування ІВМ для скалярного методу калібрування ІВМ
..... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.2 Порядок встановлення ІВМ на стенді **Ошибка!** **Закладка** **не**
определена.
- 3.4 Використання чисельних методів для обчислення СЛАРК **Ошибка!**
Закладка не определена.
- 3.5 Математична модель визначення коефіцієнтів неортогональності
..... **Ошибка! Закладка не определена.**

3.6 Похибки обчислення метрологічних параметрів **Ошибка! Закладка не определена.**

3.7 Методика проведення калібрування ІВМ **Ошибка! Закладка не определена.**

3.7.1 Структурна схема проведення калібрування **Ошибка! Закладка не определена.**

3.7.2 Алгоритм калібрування **Ошибка! Закладка не определена.**

3.7 Висновки до розділу 3 **Ошибка! Закладка не определена.**

4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІВМ ПО КАНАЛАХ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

4.1 Рівняння калібрування ІВМ для скалярного методу калібрування ІВМ **Ошибка! Закладка не определена.**

4.2 Порядок встановлення ІВМ на стенді **Ошибка! Закладка не определена.**

4.5 Математична модель визначення коефіцієнтів неортогональності **Ошибка! Закладка не определена.**

4.7 Висновки до розділу 4 **Ошибка! Закладка не определена.**

РОЗРОБКА СТЕНДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІВМ, ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО СТЕНДОВОГО ОБЛАДНАННЯ **Ошибка! Закладка не определена.**

5.1 Розробка комп'ютерної програми **Ошибка! Закладка не определена.**

5.1.1 Вибір програмного пакету **Ошибка! Закладка не определена.**

5.1.2 Алгоритм обчислення..... **Ошибка! Закладка не определена.**

5.1.3 Знімки екрану з прикладами етапів роботи програми **Ошибка! Закладка не определена.**

| | |
|--|--|
| 5.2 Розробка стенду для калібрування ІВМ по каналам лінійного прискорення..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.2.1 Стенд призначений для: | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.2.2 На стенді виконується: | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.2.3 Стенд повинен складатися з: | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.2.5 Структурна схема стенду | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.3 Розробка стенду для калібрування ІВМ по каналам кутової швидкості | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.3.1 Стенд призначений для: | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.3.2 На стенді виконується: | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.3.3 Стенд повинен складатися з: | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.3.5 Структурна схема стенду | Ошибка! Закладка не определена. |
| 5.4 Висновок до розділу 5 | Ошибка! Закладка не определена. |
| 6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З КАЛІБРУВАННЯ ІВМ НА РОЗРОБЛЕНИХ СТЕНДАХ | Ошибка! Закладка не определена. |
| Висновок до розділу 3 | Ошибка! Закладка не определена. |
| ВИСНОВОК..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА ТА ПОСИЛАННЯ | Ошибка! Закладка не определена. |
| ДОДАТКИ..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| ДОДАТОК А РОЗРАХУНКИ ДО МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ..... | Ошибка! Закладка не определена. |
| ДОДАТОК Б РОЗРАХУНКИ ДО МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ НЕОРТОГОНАЛЬНОСТІ..... | Ошибка! Закладка не определена. |

ДОДАТОК В ОГЛЯД ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ **Ошибка!** Закладка не определена.

ДОДАТОК Г ЛІСТИНГ КОМП'ЮТЕРНОЇ ПРОГРАМИ **Ошибка!** Закладка не определена.

ДОДАТОК Г ТАБЛИЦІ ДО МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ ІВМ... **Ошибка!** Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

| | |
|-------|--|
| БА | – блок акселерометрів |
| БГ | – блок гіроскопів |
| БЧЕ | – блок чутливих елементів |
| ІВМ | – інерціальний вимірювальний модуль |
| МА | – мікромеханічний акселерометр |
| МГ | – мікромеханічний гіроскоп |
| МНК | – метод найменших квадратів |
| ПЗ | – програмне забезпечення |
| ПК | – персональний комп'ютер |
| СК | – система координат |
| СЛАР | – система лінійних алгебраїчних рівнянь |
| СЛАРК | – система лінійних алгебраїчних рівнянь калібрування |
| ЧЕ | – чутливий елемент |
| MEMS | – microelectronics mechanical systems |

ВСТУП

Інерціальні вимірювальні модулі на базі MEMS широко використовуються для інерціальних навігаційних систем різної точності. Такий ІВМ складається з блоку одновісних мікромеханічних акселерометрів, та блоку одновісних мікромеханічних гіроскопів або датчиків кутової швидкості.

Точність визначення положення цих датчиків в корпусі ІВМ, а саме кутів невідповідності осей ІД вимірювальним осям ІВМ, сильно впливає на точність вимірювання ІВМ в цілому. Тому, для підвищення точності, окрім масштабних коефіцієнтів та зміщення нуля, у метрологічну модель ІВМ вводять коефіцієнти перехресної чутливості. Для визначення параметрів визначеної метрологічної моделі проводять калібрування ІВМ. Від обраного чи розробленого методу калібрування залежать вимоги до обладнання, за допомогою якого проводять калібрування.

Метою дипломного проектування є встановлення метрологічної моделі ІВМ і розробка математичної моделі та методу ідентифікації коефіцієнтів метрологічної моделі з використанням обладнання низької точності.

Для цього в роботі було визначено метрологічну модель ІВМ, обрано метод калібрування, а саме метод скалярного калібрування, розглянуто способи вирішення недоліків даного методу.

Методика калібрування дозволяє визначити такі коефіцієнти метрологічної моделі:

- коефіцієнти зміщення нуля за 3ма каналами лінійного прискорення та 3ма каналами кутової швидкості;
- коефіцієнти перетворення за 3ма каналами лінійного прискорення та 3ма каналами кутової швидкості;
- коефіцієнти неотогональності осей ІВМ