

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний

Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

«На правах рукопису»
УДК 531.383

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
Бурау Н.І.
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” 2021 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (Комп'ютерно-інтегровані технології та системи навігації і керування)
(код і назва спеціальності)

на тему: Вдосконалення алгоритмів компенсації температурних дрейфів гіроскопічних датчиків систем орієнтації

Виконав : студент 2 курсу, групи ПГ-01мп
(шифр групи)

Феоклістов Дмитро Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Мураховський С. А.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Розроблення старт-ап проекту к.е.н Бояринова К.О.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент д.т.н., проф. Антонюк В.С
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складає 122 сторінок, в ній містяться 52 ілюстрацій, 25 таблиць і 86 використаних джерел.

Актуальність: Розробка систем орієнтації та навігації є актуальною темою на сьогоднішній день. Разом з цим росте попит на вирішення проблем зменшення похибок викликаних чутливістю їх основних чутливих елементів - гіроскопів, до зовнішніх впливів, зокрема зміни температури в робочому середовищі.

Мета: покращити точність гіроскопів шляхом вдосконалення методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів.

Завдання:

1. Огляд поточного стану проблеми температурної компенсації гіроскопічних датчиків.
2. Аналіз математичних моделей алгоритмів компенсації, вибір та обґрунтування алгоритму.
3. Розробка програмного апарату, що дозволяє підвищити точність компенсації.
4. Експериментальна перевірка розроблених алгоритмів та програмного забезпечення.

Об'єкт: температурні дрейфи гіроскопів.

Предмет: методи зниження впливу температури на точнісні характеристики гіроскопів.

Методи дослідження: Для дослідження використано методи теорії приближення, методи аналізу зміни характеристик чутливих елементів, методи комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна:

1. Встановлено залежність точності компенсації температурних дрейфів гіроскопів від вибору методу апроксимації.

2. Розроблено та перевірено методи алгоритмічної компенсації температурних дрейфів гіроскопів.

Практичне значення: Розроблені алгоритми можуть використовуватися для покращення точності гіроскопів в сучасних системах орієнтації; Алгоритмічне і програмне забезпечення для визначення параметрів моделі компенсації температурних дрейфів гіроскопів та їх моделювання.

Публікації:

1. Феоклістов Д.О. Методи компенсації температурних дрейфів мікромеханічних гіроскопів / Погляд у майбутнє приладобудування: Збірник праць XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених / 18-19 травня 2021 р. – К.:ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2021. — С. 69-71.

Ключові слова: мікромеханічний гіроскоп; мікроелектромеханічна система; температурний дрейф; апроксимація.

ABSTRACT

The master's dissertation is 122 pages, it contains 52 illustrations 25 tables and 86 used sources.

Actuality: The development of orientation and navigation systems is a topical issue today. At the same time, there is a growing demand to solve the problem of reducing errors caused by the sensitivity of their main sensitive elements - gyroscopes, to external influences, including changes in temperature in the working environment.

Purpose: to improve the accuracy of gyroscopes by improving the methods of algorithmic compensation of temperature drifts.

Task:

1. Review of the current state of the problem of temperature compensation of gyroscopic sensors.
2. Analysis of mathematical models of compensation algorithms, selection and justification of the algorithm.
3. Development of software that allows to increase the accuracy of compensation.
4. Experimental verification of developed algorithms and software.

Object: temperature drifts of gyroscopes.

Subject: methods of reducing the effect of temperature on the accuracy of gyroscopes.

Research methods: The research used methods of approximation theory, methods of analysis of changes in the characteristics of sensitive elements, methods of computer modeling.

Scientific novelty:

1. The dependence of the accuracy of compensation of temperature drifts of gyroscopes on the choice of approximation method is established.
2. Methods of algorithmic compensation of temperature drifts of gyroscopes are developed and checked.

Practical significance: The developed algorithms can be used to improve the accuracy of gyroscopes in modern orientation systems; Algorithmic and software for determining the parameters of the model of compensation of temperature drifts of gyroscopes and their modeling.

Publications:

1. Feoklistov DO Methods of compensation of temperature drifts of micromechanical gyroscopes / A look into the future of instrument making: Proceedings of the XVI All-Ukrainian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists / May 18-19, 2021 - K .: PBF, KPI. Igor Sikorsky. - 2021. - P. 69-71.

Keywords: micromechanical gyroscope; microelectromechanical system; temperature drift; approximation.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ	10
1.1 Аналіз впливу температури на параметри мікромеханічних гіроскопів	10
1.2 Аналіз шляхів зменшення похибок ММГ	18
1.3 Методи вимірювання температури в мікромеханічних пристроях	30
1.4 Мета і завдання дослідження	37
РОЗДІЛ 2 ОПИС МЕТОДІВ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДРЕЙФІВ ГІРОСКОПІЧНИХ ДАТЧИКІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ	38
2.1 Модель вихідного сигналу гіроскопа	38
2.2 Методи компенсації температурних дрейфів ММГ	39
Висновки до розділу 2	51
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДІВ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ГІРОСКОПІВ	52
3.1 Дослідження методів компенсації температурних дрейфів ММГ	52
3.2 Дослідження методів компенсації температурних дрейфів ХТГ	70
Висновки до розділу 3	87
ВИСНОВКИ	110
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «КОМПЕНСАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДРЕЙФІВ ГІРОСКОПІВ»	89
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту	89
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	92
4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту	100
4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	104
Висновки до розділу 4	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	110

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ММГ – мікромеханічний гіроскоп

ХТГ – хвильовий твердотільний гіроскоп

ЧЕ – чутливий елемент

ІТ – інерційне тіло

ШНМ – штучна нейронна мережа

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ІВМ – інерційний вимірювальний модуль

ДТ – датчик температури

ДКШ – датчик кутової швидкості

ВСТУП

Завдяки тому, що ММГ володіють малими розмірами, масою, вартістю при масовому виробництві, часом готовності і низьким енергоспоживанням, зазначені пристрої застосовуються в широкому спектрі промислової апаратури і товарах масового споживання.

При постановці вимог до характеристик ММГ враховується тип конкретної технічної задачі. Малогабаритні безплатформенні інерціальні навігаційні системи, є тією сферою застосування високоточних мікромеханічних датчиків, для якої одним з ключових параметрів є зміщення нуля, тому що через його дрейф, помилки визначення параметрів орієнтації і координат наземних, повітряних і морських об'єктів, накопичуються з часом.

На даний момент ММГ відносяться до споживчого і тактичного класів інерційних датчиків [1]. Для сучасних ММГ типове значення дрейфу нуля становить близько $30^{\circ}/\text{г}$. В деяких зразках ця величина досягає $1^{\circ}/\text{г}$ і менше (по варіації Аллана).

Однак ця величина часто справедлива при досить комфортних умовах навколишнього середовища (малому діапазоні температур і відсутності зовнішніх механічних збурень). Насправді температурний коефіцієнт чутливості зміщення нуля для більшості ММГ перевищує $10 (^{\circ}/\text{г})/^{\circ}\text{C}$. Тому при несприятливих умовах експлуатації, при яких зміна температури навколишнього середовища може досягати $100-150^{\circ}\text{C}$ (наприклад, автомобільна і авіакосмічна електроніка, системи буріння свердловин), зміщення нуля ММГ може на два і більше порядку перевищувати його дрейф при постійній температурі [2].

Таким чином, одним з найважливіших напрямків розробки сучасних ММГ є забезпечення стабільності їх характеристик в умовах зміни температури навколишнього середовища в широкому діапазоні.

Актуальність роботи підтверджується тим, що вона спрямована на розвиток:

- 1) технологій інформаційних, управляючих, навігаційних систем;
- 2) технологій мікросистемної техніки.

В магістерській дисертації досліджуються методи алгоритмічної компенсації температурних дрейфів ММГ, проводиться їх моделювання та аналіз отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Аналіз впливу температури на параметри мікромеханічних гіроскопів

Конструкція промислового ММГ уявляє з себе багаторівневу інтегровану систему, до складу якої в загальному випадку входять механічний ЧЕ і електронна система управління яка, як правило, виконується у вигляді окремої інтегральної схеми спеціального призначення. Обидва кристали приєднують до зовнішнього корпусу пристрою (з кераміки або пластика) за допомогою різних методів монтажу мікромеханічних пристроїв. Наприклад, термокомпресійний, ультразвуковий, на клей або компаунд. У свою чергу, готова збірка встановлюється на друковану плату за допомогою проміжного затискного пристрою для тестування, або за допомогою пайки припоєм.

Чутливий елемент ММГ вібраційного типу конструктивним виконанням являє собою резонатор і в загальному випадку містить корпус, утворений підставою (підкладкою) і кришкою, які зварюються між собою, інерційне тіло, поєднане з підставою з допомогою пружного підвісу, і електроди для вимірювання і управління становищем інерційного тіла.

Конструкція пружного підвісу в ММГ дозволяє ІТ здійснювати переміщення відносно корпусу і забезпечує дві основні моди коливань [3], названі первинною та вторинною. По виду руху ІТ прийнято розрізняти три типи ЧЕ. До першого типу відносяться ЧЕ, в яких дві моди коливань є лінійними, це так звані гіроскопи LL-типу або планарні ММГ. Якщо обидві моди коливань є кутовими, то в цьому випадку гіроскопи прийнято називати RR-типу або роторними ММГ. Комбіновані гіроскопи (LR-типу) характеризуються тим, що одна з мод коливань є лінійною, а інша кутовою.

Розглянемо роботу ММГ на прикладі ММГ RR-типу зображеного на рисунку 1.

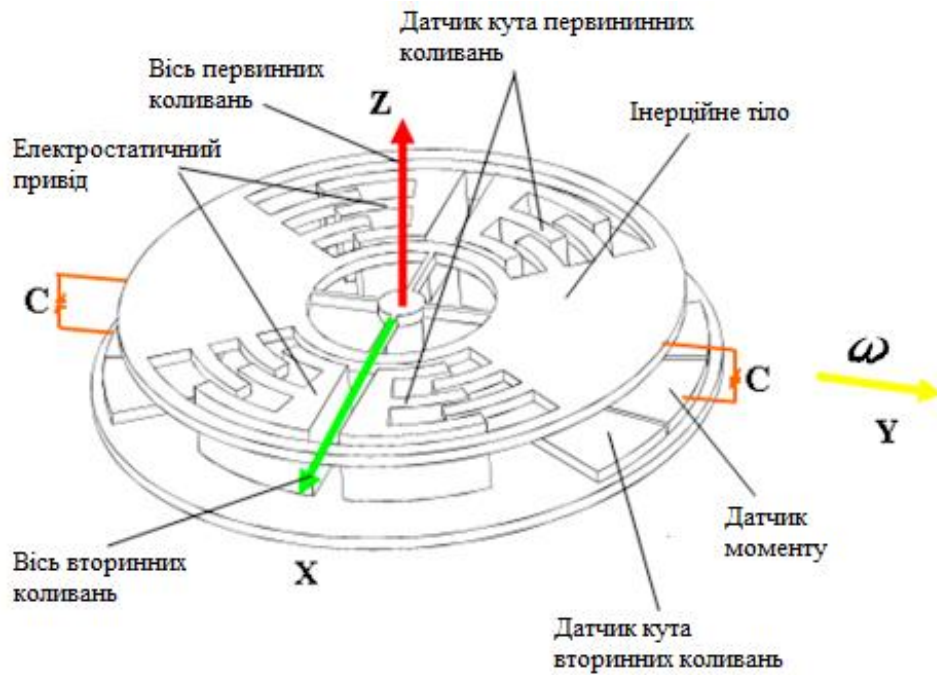


Рис. 1.1 – Конструктивна схема ЧЕ ММГ RR-типу

Принцип дії полягає в наступному. ІТ за допомогою пружного підвісу пов'язане з основою. Під дією системи розгону ІТ здійснює вимушені (первинні) коливання навколо осі Z. Поява переносної кутової швидкості основи навколо вимірювальної осі Y призводить до формування періодичного моменту, створюваного силами інерції Коріоліса, і виникнення коливань ІТ (вторинних) навколо осі X. Таким чином, відбувається перетворення енергії первинних коливань в енергію вторинних коливань ІТ. Причому амплітуда вторинних коливань пропорційна діючій кутовій швидкості.

Рух ІТ гіроскопу RR-типу характеризується кутами повороту від положення рівноваги α , β , γ навколо осей X, Y та Z, відповідно. Ідеальну модель руху ІТ (без врахування перехресних зв'язків, нелінійних ефектів та шуму) можна представити у вигляді системи диференціальних рівнянь другого порядку [4]:

$$\begin{cases} I_{\alpha}\ddot{\alpha}(t) + c_{\alpha}\dot{\alpha}(t) + k_{\alpha}\alpha(t) = M_{\kappa}(t) = -2I_{\alpha}\Omega_Y(t)\dot{\gamma}(t), \\ I_{\beta}\ddot{\beta}(t) + c_{\beta}\dot{\beta}(t) + k_{\beta}\beta(t) = 2I_{\beta}\Omega_X(t)\dot{\gamma}(t), \\ I_{\gamma}\ddot{\gamma}(t) + c_{\gamma}\dot{\gamma}(t) + k_{\gamma}\gamma(t) = M_3(t) = M_{30}\cos(\omega_3 t). \end{cases} \quad (1.1)$$

де t – час; $c_\alpha, c_\beta, c_\gamma$ – коефіцієнти демфування коливань навколо відповідних осей; $k_\alpha, k_\beta, k_\gamma$ – кутові жорсткості пружного підвісу; $I_\alpha, I_\beta, I_\gamma$ – осьові моменти інерції ІТ, причому $I_\gamma = 2I_\alpha = 2I_\beta$; $M_3(t)$ – момент збудження первинних коливань з амплітудою M_{30} та кутовою швидкістю ω_3 , відповідно; $\Omega_Y(t)$ – кутова швидкість основи навколо вимірювальної осі Y ; $M_K(t)$ – момент сил Коріоліса.

Основними параметрами ММГ є власна частота коливань підвісу ІТ та добротність коливального контуру:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k_i}{I_i}}, \text{ де } i = \alpha, \beta, \gamma. \quad (1.2)$$

$$Q_i = \frac{\omega_i I_i}{c_i} = \frac{\sqrt{k_i I_i}}{c_i} \quad (1.3)$$

Вони в свою чергу мають підвищену чутливість до дії температури.

Сучасні методи корпусування мікромеханічних пристроїв з вакуумною герметизацією дозволяють домогтися високої довгострокової стабільності резонансної частоти [5]. Відомі результати експериментальних досліджень резонатора із залишковим тиском на рівні 1,5 Па, які показали малу відносну зміну резонансної частоти протягом 10000 год і при постійній температурі [6]. Однак зміна температури навколишнього середовища може призводити до більш значного відхилення, величина якого може змінюватися, в тому числі від зразка до зразка через недосконалість технології виготовлення мікромеханічних структур.

Чутливість жорсткості пружного підвісу та власної частоти, до температури визначаються головним чином температурною залежністю модуля пружності матеріалу, з якого виготовлені елементи підвісу ІТ [7]. У більшості мікромеханічних пристроїв як конструкційний матеріал ЧЕ застосовується моно або полікристалічний кремній. Цей матеріал володіє великим модулем пружності та міцністю, що дозволяє добитися високої

добротності коливальних і є важливою вимогою для елементів конструкції ЧЕ, які відчують циклічні навантаження. Однак деякі властивості кремнію володіють значною залежністю від температури. Так температурні коефіцієнти модуля пружності і лінійного розширення кремнію при кімнатній температурі становлять $-75 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ і $2,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, відповідно, і можуть варіюватися в залежності від концентрації легуючої домішки і кристалографічної орієнтації структури.

Крім кремнію в конструкції ЧЕ можуть застосовуватися інші матеріали. Так, наприклад, при використанні технології виготовлення "кремній на ізоляторі" в якості ізолятора в підкладці використовується діоксид кремнію або сапфір.

Розбіжність коефіцієнтів теплового розширення використовуваних матеріалів і нерівномірність розподілу температури, як відомо, обумовлює виникнення деформації конструкції ЧЕ. Це в свою чергу може призводити до появи термомеханічних напружень в пружному підвісі ІТ [8] і зміни його власної частоти і добротності коливального контуру. На величину напруги впливають конструктивні особливості самого механічного ЧЕ, кількість точок опори та їх розташування, недосконалість технології виробництва і спосіб монтажу ЧЕ в корпус. В закінченому пристрої до деформації ЧЕ може призводити і деформація зовнішнього корпусу пристрою та друкованої плати [9], причому в області з'єднання друкованої плати та корпусу пристрою при термоциклюванні може спостерігатися і деформаційний термомеханічний гістерезис [10].

Відома велика кількість результатів експериментальних і теоретичних досліджень впливу температури на резонансну частоту в деяких конструкціях кремнієвих резонаторів і гіроскопів [7, 11, 12, 13], з яких випливає, що в більшості пристроїв зміна резонансної частоти відбувається в основному через зміну модуля пружності зі зміною температури. При цьому в робочому діапазоні температур резонансна частота має монотонну і близьку до лінійної залежність від температури. Типове значення температурного коефіцієнта

відносного зміни резонансної частоти складає близько $-30 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, отже, її загальна відносна зміна в діапазоні температур від -40 до $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ не перевищує 1%.

Зміна геометричних розмірів елементів конструкції за рахунок теплового розширення також призводить до зміни моментів інерції ротора та загальної величини міжелектродних ємностей, отже, і коефіцієнтів перетворення датчиків переміщення та сили/моменту. З урахуванням величини коефіцієнта теплового розширення кремнію, відносна зміна зазначених параметрів в діапазоні температур від -40 до $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ складає менше 0,1%.

Натомість, так як добротність коливального контуру визначається домінуючим механізмом демпфування коливань, її залежність від температури може набувати різної форми. Відомо безліч досліджень, присвячених встановленню типу демпфування для різних конструкцій кремнієвих мікромеханічних резонаторів та ММГ [14, 15]. У роботі [16] запропоновано узагальнений вираз визначення ефективної добротності для мікромеханічних пристроїв:

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_{\text{гд}}} + \frac{1}{Q_{\text{туд}}} + \frac{1}{Q_{\text{оп}}} + \frac{1}{Q_{\text{пов}}} + \frac{1}{Q_{\text{ел}}}, \quad (1.4)$$

де $Q_{\text{гд}}$, $Q_{\text{туд}}$, $Q_{\text{оп}}$, $Q_{\text{пов}}$, $Q_{\text{ел}}$ – добротності, зумовлені, відповідно, газовим та термопружним демпфуванням коливань, втратами енергії через опори пружного підвісу і в поверхневому шарі рухомого елемента, демпфуванням за рахунок впливу на ІТ електростатичних сил, що формуються електричними схемами вимірювання та управління.

У резонаторах, які працюють при тиску вище 1000 Па, основний внесок у втрати енергії вносить газове демпфування, яке викликане в'язким тертям та стисненням шарів газу між поверхнями елементів конструкції резонатора ($Q_{\text{гд}} < 10^2$) [17]. Зі зниженням тиску нижче 1000 Па відбувається зменшення взаємодії між молекулами газу та збільшення їх середньої довжина вільного пробігу. Завдяки цьому газове демпфування значно зменшується ($10^3 < Q_{\text{гд}} <$

10^5) і відбувається за рахунок передачі частини кінетичної енергії коливань при зіткненні рухомих елементів з молекулами розрідженого газу. У загальному випадку втрати енергії, спричинені газовим демпфуванням, залежать від геометрії конструкції резонатора (повітряних зазорів між ротором та електродами та корпусом ЧЕ, площі поверхні рухомих елементів), амплітуди та частоти коливань ІТ, тиску та температури. Таким чином, добротність $Q_{гд}$ може бути апроксимована з допомогою наступного виразу [18]:

$$Q_{гд} = C \frac{\omega \sqrt{k_b T}}{P} \quad (1.6)$$

де C - постійна, що враховує площу поверхні рухомих елементів, вплив близьких поверхонь, форму коливань елементів підвісу і т.д.; ω - Частота коливань; k_b - постійна Больцмана; P - тиск, яке за умови вакуумування ЧЕ прямо пропорційно температурі та концентрації частинок газу ($P = nk_b T$).

При залишковому тиску нижче 1 Па домінуючим механізмом втрат енергії стає термопружне демпфування ($Q_{туд} < 10^6$) [19], яке виникає в пружних елементах підвісу ІТ за їх періодичної деформації [20]. Вигин пружного елемента супроводжується його стиском і розтягуванням з протилежних сторін, що призводить до виникнення температурного градієнта всередині нього та теплопередачі до настання теплової рівноваги. Таким чином, частина кінетичної енергії перетворюється на теплову енергію, яка відводиться у зовнішнє середовище. Цей механізм демпфування залежить від властивостей матеріалу (коефіцієнта теплового розширення α_1 , модуля пружності E , щільності ρ , теплоємності при постійному тиску C_p та теплопровідності k) та геометричних розмірів пружних елементів. Температурна чутливість перелічених параметрів визначає загальну залежність добротності від температури. Для пружного елемента з прямокутним поперечним перерізом добротність визначається за допомогою наступного виразу [21]:

$$\frac{1}{Q_{\text{туд}}} = \frac{E\alpha_1^2 T}{C_p \rho} \left(\frac{6}{\xi^2} - \frac{6}{\xi^3} * \frac{\sinh \xi + \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \right), \quad (1.7)$$

$$\xi = b \sqrt{\frac{\omega C_p \rho}{2k}} \quad (1.8)$$

де b – ширина пружного елемента.

Втрати енергії коливань, спричинені поширенням та розсіюванням пружних хвиль в опорній конструкції, що виникають через дію сил зсуву, що періодично змінюються, в місці закладення пружного елемента при коливання ІТ, залежать від геометричних розмірів пружного елемента та його жорсткості. Добротність $Q_{\text{оп}}$ пропорційна відношенню довжини до ширини пружного елемента $Q_{\text{оп}} \propto (L/w)^3$ (при згинальних коливаннях, що лежать у площини резонатора) і в кремнієвих мікромеханічних пристроях з резонансними частотами менше 10 кГц її величина зазвичай перевищує 106 і тому робить малий внесок у ефективну добротність [22].

Втрати енергії у поверхневому шарі відбуваються внаслідок взаємодії механічних хвиль, що поширюються в ІТ, що коливається, з дефектами кристалічних ґрат. Причиною мікронерівності поверхні є також абсорбція на ній атомів і молекул з навколишнього середовища. Причому втрати збільшуються із збільшенням відношення площі до розміру рухомої кремнієвої структури. Завдяки герметизації ЧЕ та використанню гетеру для поглинання залишкових газів забезпечується хімічна стабільність середовища і таким чином зменшуються втрати енергії ($Q_{\text{пов}} > 106$) [23].

Також малий вплив на величину ефективної добротності надають ємнісні схеми вимірювання переміщення ІТ на основі трансімпедансного підсилювача чи зарядового інтегратора з великим коефіцієнтом посилення. Демпфування коливань у такому разі відбувається через те, що в ІТ діють додаткові сили або моменти, які виникають через те, що потенціал на вході, що інвертує, операційного підсилювача (віртуальна земля) насправді відрізняється від нульового. У роботі [24] показано, що величина $Q_{\text{ел}}$ може становити близько $3,5 \times 10^{11}$.

На основі доступних публікацій, присвячених дослідженню залежності добротності від температури в мікромеханічних резонаторах та гіроскопах можна зробити такі висновки:

- для герметизованих мікромеханічних резонаторів залежність ефективної добротності від температури може мати різний характер, але при цьому вона є монотонною в робочому діапазоні температур і може бути апроксимована за допомогою статечної функції виду:

$$Q_e \sim \frac{1}{T^\mu} \quad (1.9)$$

де μ – коефіцієнт, що характеризує чутливість добротності до температури;

- аналіз залежності ефективної добротності від температури та визначення коефіцієнта дозволяє опосередковано встановити джерела демпфування в резонаторі та оцінити їх внесок у загальну величину добротності за різних температур;
- відносна зміна добротності в робочому діапазоні температур найчастіше перевищує 30-40%.

Довготривала стабільність добротності визначається процесом старіння конструкції під дією циклічних навантажень [25], а так само, як і у випадку з резонансною частотою, технологією вакуумної герметизації [26]. У роботі [27] представлені результати експериментального дослідження довготривалої стабільності добротності в резонаторі при постійній температурі ($25 \pm 0,1$ °C), які показали, що в протязі 10000 год безперервної роботи зміна добротності не перевищує $\pm 5\%$ з урахуванням високої похибки вимірювання, яка обумовлена грубим роздільною здатністю по частоті, що дорівнює 0,125 Гц.

1.2 Аналіз шляхів зменшення похибок ММГ

1.2.1 Зменшення чутливості власної частоти пружного підвісу інерційного тіла до температури

Для ММГ з високою добротністю, стабільність частот коливань є особливо важливою вимогою. Методи, що дозволяють зменшити температурні коефіцієнти власних частот, можуть бути застосовані вже на етапі розробки конструкції ЧЕ.

Для зменшення температурного коефіцієнту модуля пружності кремнію в його кристалічну решітку імпантуються атоми легуючої домішки (наприклад, бору) [28]. Однак разом з цим виникає і зворотний ефект - зміна коефіцієнту теплового розширення.

Температурний коефіцієнт жорсткості підвісу можна змінити за рахунок використання композитних пружних елементів, що складаються з декількох шарів з матеріалів з різними температурними коефіцієнтами модуля пружності [15]. В такому випадку жорсткість пружного елементу $k_{\text{мех}}$ при здійсненні вигибних коливань знаходиться співвідношенням ширини шарів (для стержня з прямокутним поперечним перетином):

$$k_{\text{мех}} = \sum_{j=1}^N E_{0j} \left(1 + k_{Ej}(T - T_0) \right) \frac{h(T)}{12} w_j^3(T), \quad (1.10)$$

де k_{Ej} – температурний коефіцієнт модуля пружності для j -го шару; E_{0j} – модуль пружності j -го шару при температурі T_0 ; N – кількість шарів; h – ширина шару; w_j ширина j -го шару.

Так в роботах [29] та [30] пропонуються варіанти конструкції мікромеханічного резонатора камертоного типу з монокристалічного кремнію, на всій поверхні якого за допомогою мокрого термічного оксидування нанесено шар діоксиду кремнію. Завдяки використанню багат шарових

пружних елементів, по-перше, зменшився діапазон відносної зміни власної частоти в 25 разів. А по-друге, температурна залежність прийняла параболічну форму с близькою до нуля чутливістю при температурі 30°C, при якій доцільно її стабілізувати. Недоліком методу є те, що шар SiO₂ не є кристалічним, що може впливати на добротність і довготривалу стабільність.

Наступні два підходи до зменшення температурної чутливості власної частоти пружного підвісу виходять з того, що її величина визначається температурними і залишковими після корпусування напруженнями. Перший метод [31] полягає в їх зменшенні за рахунок конструктивних особливостей пружного підвісу (кількість опорних точок, їх розташування та площа з'єднання) і технології монтажу кремнієвої структури в корпус, в тому числі використання між ними додаткових вставок. Інший метод заснований на навмисному введенні на етапі проектування ЧЕ термомеханічних напружень в конструкцію підвісу ІТ для компенсації зміни власної частоти, викликаного зміною модуля пружності [32]. Подібний підхід використовується в роботі [33], в якій пропонується конструкція полі-кремнієвого мікромеханічного резонатора, у якого ІТ (балка) з одного боку жорстко закріплене на кремнієвій підкладці, а з іншого пов'язане з зовнішнім підвісом. Балка резонатора і елементи підвісу мають різну довжину, отже, швидкості їх теплового розширення відрізняються, що з урахуванням розбіжності коефіцієнтів теплового розширення матеріалів підкладки і структури резонатора обумовлює виникнення температурних напружень в балці. співвідношення довжин резонатора і елементів підвісу визначає залежність температурного коефіцієнта власної частоти, причому, як і в попередньому випадку, на деякій температурі досягається мінімальна температурна чутливість. Зазначена конструкція резонатора дозволила зменшити діапазон відносної зміни власної частоти більш ніж в 8 разів в діапазоні температур від +27 до +107°C. Недолік методу полягає в тому, що при зовнішньому механічному впливі і через недосконалості технології корпусування в конструкції підвісу створюються

додаткові напруги, які також можуть змінюватися з часом і температурою, тим самим змінюючи власну частоту коливань.

1.2.2 Зменшення чутливості резонансної частоти коливань інерційного тіла до температури

У мікромеханічних пристроях, в яких електростатичний привід утворений плоско-паралельними електродами, зміна резонансної частоти може бути скомпенсованою електростатичним методом. Цей метод заснований на підтримці загальної жорсткості підвісу $k_{\text{заг}}$ на постійному рівні шляхом підлаштовування електростатичної жорсткості $k_{\text{ел}}$ в залежності від температури:

$$k_{\text{ел}} = \frac{1}{2} \frac{d^2 C(x)}{dx^2} V^2, \quad (1.11)$$

$$k_{\text{заг}} = k_{\text{мех}} + k_{\text{ел}}. \quad (1.12)$$

де $\frac{d^2 C(x)}{dx^2}$ – друга похідна від ємності між електродами по координаті x ; V – різниця потенціалів між електродами ротора та статора.

Зазначений метод компенсації, описаний в роботі [34], в резонаторі на об'ємних акустичних хвилях дозволив зменшити відносну зміну власної частоти більш ніж в 70 разів. При цьому підстроювання величини електростатичної жорсткості здійснювалася за рахунок зміни різниці потенціалів. Однак, для досягнення необхідної величини електростатичної жорсткості потрібно подавати на електроди високу напругу (до 18 В).

Керувати величиною електростатичної жорсткості можна не тільки за рахунок зміни напруги, але і за рахунок зміни відстані між електродами. Так в роботі [35] пропонується оригінальна конструкція полі-кремнієвого резонатора, в якому відстань між металевим електродом і ІТ змінюється в залежності від діючої температури. Це досягається завдяки тому, що опори електрода і сама конструкція резонатора (ІТ, підвіс та анкери) виконані з матеріалів з різними коефіцієнтами теплового розширення. Напруга є

постійною і вибирається шляхом калібрування виходячи з досягнення найменшого температурного коефіцієнта резонансної частоти коливань. До недоліку розглянутої конструкції можна віднести те, що зміна температури призводить до виникнення в електроді механічної напруги і його деформації, що викликає зміну температурної залежності резонансної частоти.

1.2.3 Стабілізація температури мікромеханічних приладів

Ще одним методом зменшення чутливості характеристик ММГ до зміни температури є використання системи термостатування, задача якої полягає в стабілізації температури всередині приладу в автоматичному режимі незалежно від температури навколишнього середовища, для забезпечення найкращих температурних умов для приладу.

Термостатування датчика може здійснюватися на рівні приладу, наприклад, в складі вимірювального модуля. Але тенденція розвитку мікромеханічних пристроїв показує, що традиційні термостати заміщаються системами на рівні корпусу пристрою ММГ або кремнієвої структури з локальним нагріванням самого ЧЕ. Їх використання дозволяє значно зменшити температурний гістерезис, а завдяки малим габаритним розмірам (ефективної теплової маси) і високій теплопровідності кремнію досягаються малі значення споживаної потужності і постійної часу перехідного процесу, яка визначає час готовності пристрою.

Так в роботі [36] представлений прототип ММГ з системою термостатування, максимальна потужність споживання якої склала 0,213 Вт в діапазоні від -40 до $+55^{\circ}\text{C}$, а для нагріву ЧЕ з кімнатної температури до $+60^{\circ}\text{C}$ потрібно близько 20 с. Відомі конструкції резонаторів з підвищеною тепловою ізоляцією ЧЕ [37], які дозволяють знизити постійну часу перехідного процесу до десятків мілісекунд, а величину споживаної потужності нижче декількох мВт, що становить всього 10% від загального енергоспоживання пристрою.

У більшості випадків в мікромеханічних пристроях використовуються тільки нагрівальні елементи, при цьому температура статкування задається вищою, ніж максимальна температура з робочого діапазону [38]. Однак важливо враховувати, що при високій температурі добротність значно зменшується, а ресурс скорочує термін його служби. Використання радіаторів, тепловідводів і навіть термоелектричних вентиляторів менш поширене, тому що вони збільшують загальні розміри пристрою. Однак вони застосовуються в разі, коли пристрій не може працювати на підвищеній температурі, і дозволяють проводити стабілізацію за температур, при яких характеристики пристрою мають найменшу чутливість. Так, наприклад, в роботі [39] пропонується стабілізувати температуру резонатора при -5°C для зменшення термопружного демфування коливань.

В якості нагрівальних елементів в мікромеханічних пристроях на практиці використовуються тонкоплавні платинові і кремнієві резистори, а також напівпровідникові транзистори. При цьому велике значення має місце їх розташування, тому що при локальному нагріві розподіл температури стає нерівномірним. Для зменшення градієнта температури застосовують кілька нагрівальних елементів, розташованих в різних частинах пристрою. Вони можуть встановлюватися на поверхні корпусу ЧЕ або поруч з ним на одній платформі, також зустрічаються випадки, коли нагрівач формується всередині самого ЧЕ на його нерухомих частинах (наприклад, на анкері), щоб не створювати додаткову масу на рухомих частинах конструкції [40].

Також самі елементи конструкції ЧЕ можуть виступати в якості нагрівачів. Для цього через них пропускається постійний або змінний електричний струм, за рахунок чого відбувається підвищення температури пристрою шляхом, так званого, нагріву Джоулевым теплом [41]. зазначений спосіб може бути застосований до всіх резонаторів з струмовим ланцюгом, що проходить через структуру, для цього в конструкції повинні бути передбачені дві точки опори, між якими пропускається струм.

1.2.4 Термокомпенсація вихідного сигналу ММГ

При наявності в реальному часі інформації про температуру пристрою, метод температурної компенсації дозволяє інформаційно корегувати вихідний сигнал ММГ[42]. При наявності високої кореляції вихідних сигналів ММГ та датчика температури, систематична складова дрейфу нуля може бути зменшена на один або більше порядків.

В роботі [43] показано, що за рахунок температурної компенсації величину середньоквадратичного відхилення зміщення нуля вихідного сигналу ММГ можна знизити до $0,76\text{ }^{\circ}/\text{год}$ в діапазоні температур від -30 до $+80^{\circ}\text{C}$. Крім того компенсація дозволяє зменшити нестабільність зміщення нуля до $0,35\text{ }^{\circ}/\text{год}$, виключаючи дрейф, викликаний температурою, тим самим збільшивши довгострокову стабільність вихідного сигналу.

Однією з переваг температурної компенсації є скорочення часу готовності пристрою до моменту включення живлення, крім того вказаний метод підходить для гіроскопів різної конструкції (RR, LL, з однією або декількома інерційними масами) [44].

В методі використовується математична температурна модель вихідного сигналу гіроскопу, згідно якою в залежності від виміряної температури вираховуються правки, які далі враховуються при обрахунку справжніх значень абсолютної кутової швидкості.

Модель може ґрунтуватися на температурних залежностях окремих параметрів електронної та механічної частини гіроскопа. Через недосконалість технології виготовлення чутливого елементу (ЧЕ) температурні залежності насправді відрізняються від тих що використовуються в аналітичній моделі. Крім того залежності опорних напруг, здвигів фаз між сигналами, які формуються в електронній частині, можуть варіюватися від пристрою до пристрою. Це завдає значний вплив на загальну точність вказаної моделі.

Моделі можуть бути отримані експериментальним шляхом [45] за допомогою спеціальної процедури температурного калібрування, при якому

традиційно окремо встановлюються залежності систематичної складової похибки зміщення нуля від температури. В такому випадку моделі представляються в вигляді калібрувальної таблиці «температура – вихідний сигнал», або в вигляді функцій інтерполяції або апроксимації (частково-неперервної, експоненціальної або поліноміальної). Крім того для різних температурних режимів можуть бути використані свої окремі температурні моделі.

Не дивлячись на малі розміри пристрою, розподіл температури в ЧЕ насправді є нерівномірним. В такому випадку теплове розширення проходить неоднаково, що призводить до появи температурного гістерезису залежності зміщення нуля ММГ [46]. Розмір петлі гістерезису залежить від діапазону вимірювання температури, напрямку та швидкості її зміни. Методи температурної компенсації, в яких не враховується температурний гістерезис, не дозволяють зменшити похибку зміщення нуля менше, ніж на половину ширини гістерезису.

Важливою вимогою до використання методу температурної компенсації є висока повторюваність і постійність в часі температурних залежностей зміщення нуля та масштабного коефіцієнта, для чого температурні залежності визначаються при однакових багаторазових діях. При не дотриманні цих вимог достовірність температурної моделі знижується, тому в деяких випадках її використання при компенсації стає недоцільною.

Відома також робота [47], в якій пропонується компенсувати вплив температури на вихідний сигнал двухмасового гіроскопа прямого типу перетворення не з допомогою інформаційної корекції безпосередньо вихідного сигналу ММГ, а шляхом підлаштовування параметрів системи керування рухом інертної маси гіроскопа. Враховуючи, що масштабний коефіцієнт ММГ визначається амплітудою первинних коливань, то за рахунок їх зміни в залежності від температури і пропонується проводити його корекцію. В діапазоні температур від -40 до $+60^{\circ}\text{C}$ температурний коефіцієнт масштабного коефіцієнта вдалося знизити в 2,7 рази.

У роботі [48] розглядається компенсація температурних похибок параметрів моделі вихідних сигналів ММГ, а саме апроксимація температурних залежностей поліномом різних степенів. В процесі роботи використовувалися покази реальних ЧЕ, що дозволило авторам оцінити похибки апроксимації, та на основі отриманих результатів встановити, що використання апроксимуючої функції першого степеня дає недостатню точність температурної компенсації, а використання полінома високих степенів (3-5 порядок) дають дуже близькі результати компенсації високої точності, але підвищення порядку збільшує об'єм обчислень, що навантажує процесор. Обираючи порядок поліному доцільно зупинитися на компромісному значенні, яке б давало необхідну точністю компенсації і швидкість обчислень.

Оптимізований метод тривимірного калібрування ММГ запропоновано в роботі [49]. По-перше, була встановлена комплексна модель похибки, яка враховує інструментальні похибки неспівпадіння осей чутливості ММГ з базовими осями блоку, похибки неортогональності осей тривісного блоку ММГ, масштабний коефіцієнт і зміщення нульового сигналу. Після стандартної процедури калібрування блоку ММГ в широкому діапазоні температур, методом найменших квадратів було визначено матрицю параметрів моделі та отриманий вектор компенсації похибок. Варто зазначити, що вектор компенсації похибки у відомій температурній точці розраховується методом інтерполяції Лагранжа. Експериментальні результати підтверджують більшу ефективність компенсації температурних дрейфів ММГ запропонованим методом, порівняно з традиційним. Недоліком є необхідність збільшувати кількість вимірювань для отримання більшої кількості вузлів інтерполяції.

В роботі [50] запропоновано вдосконалений метод температурного калібрування та компенсації температурного дрейфу з використанням метода інтерполяції Лагранжа. Насамперед, було зменшено крок кутової швидкості в заданому діапазоні калібрування блоку ММГ, отримавши більше вузлів

інтерполяції. Виходячи з традиційної моделі вихідного сигналу блоку ММГ, було складено модель інтерполяційних параметрів, які залежать від температури і кожна група параметрів зберігається окремо. Порівнюючи результати калібрування традиційним та запропонованим методами зроблено висновки, що обидва методи справедливі для покращення точності ММГ, але запропонований метод є більш ефективним, оскільки краще компенсується температурний дрейф нульового сигналу та усуваються похибки нелінійності масштабного коефіцієнту на всьому діапазоні температур. Незважаючи на те, що запропонований метод потребує додаткові блоки пам'яті, у разі застосування методу на практиці, сучасний цифровий процесор є достатньо потужним, щоб виконати ці обчислення.

Застосування ШНМ для температурного калібрування та компенсації зміщення нульового сигналу ММГ обговорюється в роботі [51]. Виходячи з того, що метод інтерполяції температурної залежності поліномом, який проходить через точки температур калібрування, має деякі недоліки, а саме коли він застосовується при різкій зміні зміщення нуля на вузькому температурному інтервалі, в даній роботі запропоновано використання ШНМ зі зворотнім поширенням помилки для покращення компенсації. Обрана архітектура ШНМ досить проста, та включає два приховані шари з двома нейронами в кожному. Щоб уникнути перенавчання ШНМ в разі поганого набору навчальних даних, використовується метод «найближчого сусіда» для отримання єдиного набору даних, після чого він оцінюється критерієм узгодженості Колмогорова. Результати випробувань показали незначне покращення ефективності температурної компенсації нульового сигналу ММГ.

Ефективний варіант реалізації ШНМ для температурної компенсації зміщення нульового сигналу наведено в роботі [52]. Архітектура ШНМ має один прихований шар, який включає 6 нейронів з активаційними функціями гіперболічного тангенса. Вихідний шар нейронів має лінійні активаційні функції. Для тренування використовується алгоритм Левенберга-Марквардта,

який має дуже велику швидкість роботи, порівняно з іншими. Для оцінки ефективності описаний метод порівнювався з апроксимацією методом найменших квадратів, після чого за дисперсіями похибок кількісно оцінили обидва методи. Результати показують правильність компенсації та зменшення дисперсії похибки майже в 4 рази.

Практичне рішення застосування ШНМ для комплексної компенсації залежності нульового сигналу ММГ як від температури, так і від впливу прискорення (g-чутливість) приводиться в роботі [53]. Під комплексною компенсацією розуміється одночасна компенсацію як дії прискорення, так і температури на чутливий елемент ММГ. Для порівняння наведеного методу, в роботі використовується метод компенсації вище зазначених похибок поліномом різних порядків, крім того, розглядається поєднання цих двох методів. Після експериментальної перевірки, авторами був зроблений висновок про необхідність компенсації впливу прискорення, та ефективність застосування ШНМ для компенсації g-чутливості ММГ. Вибір оптимального методу компенсації залежить від вимог до необхідної точності компенсації, та обчислювальних можливостей ЕОМ.

Недоліками компенсації похибок ММГ за допомогою ШНМ, насамперед, є, необхідність навчання ШНМ, ефективність якого залежить від обраної архітектури (вибір типу ШНМ, кількість прихованих шарів та нейронів в них, вибір активаційних функцій), вибірки цільових даних для навчання, вибору алгоритму, швидкості та кількості ітерацій при навчанні та інших параметрів. Всі ці недоліки призводять до затрат часу на підбір параметрів ШНМ та певне ускладнення алгоритму.

Детальний аналіз характеру температурного дрейфу ММГ наведений в роботі [54]. Автори виділяють декілька типів температурного дрейфу, а саме: дрейф після включення ЧЕ (нагрів); температурний гістерезис, який має нелінійний характер і залежить від напрямку та швидкості зміни температури; залежність від швидкості зміни температури. Крім того, в роботі приведено нову модель температурного гістерезису, та запропоновано методику

визначення всіх необхідних параметрів температурної залежності з метою подальшого усунення відповідних похибок.

Розглядаючи внутрішню будову та принцип роботи ММГ, в роботі [55] встановлена залежність зміщення нульового сигналу ММГ не тільки від зміни температури, а від градієнта (швидкості зміни) температури. В роботі запропонована нова модель температурної компенсації та проведено експериментальні дослідження даного методу. Результати випробувань показали покращення точності ММГ на один порядок після компенсації. У порівнянні з загальними методами компенсації, що базуються тільки на зміні температури, середня похибка може бути зменшена в 7~20 разів. Недоліком методів [56] та [57] є ускладнення стандартної процедури температурного калібрування ММГ для визначення всіх необхідних параметрів математичних моделей.

1.2.5 Теплова ізоляція в мікромеханічних пристроях

Один із ключових моментів термостатування полягає в тому, що структура, що нагрівається, і нагрівач повинні бути теплоізовані від навколишнього середовища, а між ними слід забезпечити мінімальні теплові втрати. При цьому від інтегральної схеми ММГ навпаки потрібно відводити тепло, щоб вона не перегрівалася, тому між нею та корпусом необхідно забезпечити низький тепловий опір.

До основних процесів перенесення тепла відносяться: конвекція за рахунок молекул газу, теплопровідність елементів конструкції та газу та теплове випромінювання з поверхонь усередині корпусу.

Теплові втрати, пов'язані з конвекцією та теплопровідністю газу, можуть бути зменшені за рахунок використання технології вакуумної герметизації на рівні корпусу пристрою або лише на рівні кремнієвої структури [58]. Для збереження високого рівня вакууму у внутрішній порожнині корпусу

пристрою застосовується шар геттера, який вступає в реакцію із захопленими молекули газу.

У роботі [59] вказано, що у мікромеханічних датчиках тепловий опір через випромінювання на рівні 10^6 °C/Вт, тому теплові втрати відносно малі та ними можна знехтувати. Для зменшення втрат можуть бути використані теплові екрани (наприклад, із золота), які формуються на кришці та підкладці корпусу.

Таким чином, теплопередача в ММГ відбувається в основному через теплопровідність елементів конструкції. У роботах [60, 61] наведено загальні рекомендації з корпусування різних мікромеханічних пристроїв, у тому числі гіроскопа камертонного типу (М2 -TFGs). Для підвищення теплової ізоляції ЧЕ від довкілля використовується проміжна підвісна платформа завтовшки 100 мкм. Як матеріал платформи застосовується боросилікатне скло (зустрічається також нітрид кремнію), т.к. воно має відносно високе значення модуля Юнга, низькою теплопровідністю та коефіцієнтом теплового розширення близьким до монокристалічного кремнію. На платформі за допомогою анодного зварювання розташовується кремнієва структура ММГ і формуються нагрівач та датчик температури системи термостатування. Для збільшення теплового опору (до 3300 °C/Вт) з'єднувати платформу з монокристалічного кремнієвою підкладкою або корпусом було запропоновано за допомогою підвісу, елементи якого мають велику довжину та малу площу поперечного перерізу.

З недоліків конструкцій можна виділити те, що підвіс платформи має власну резонансну частоту, а загальна реалізація призводить до збільшення масогабаритних характеристик та вартості виробництва.

1.3 Методи вимірювання температури в мікромеханічних пристроях

1.3.1 Вимірювання температури за допомогою традиційних датчиків температури

Активні методи зменшення температурної чутливості характеристик ММГ використовують інформацію про температуру пристрої.

Традиційно для вимірювання температури у мікромеханічних пристроях використовуються зовнішні по відношенню до ЧЕ датчики температури.

На практиці широке застосування знайшли напівпровідникові ДТ, принцип роботи яких засновано на температурній залежності падіння напруги на р-n переході (окремі діоди та транзистори, або схеми РТАТ-генераторів (proportional to absolute temperature), напруга на яких прямо пропорційна абсолютній температурі). Зазначені ДТ, як правило, мають власну похибку вимірювань на рівні 0,1 ... 0,2 °C і вбудовуються в ІС гіроскопа (при цьому необхідно враховувати, що компоненти ІС самі розсіюють потужність). Також ці датчики встановлюються на поверхні ЧЕ в безкорпусному виконанні [62]. Крім того, вони можуть бути сформовані в кремнієву структуру за допомогою легування кремнію, проте можливість інтеграції в ЧЕ обмежена сумісністю з технологічним процесом виробництва ЧЕ, на деяких етапах якого відбувається нагрівання до температури 1000 °C.

Також поширені тонкоплівкові терморезистори з платини, золота та алюмінію, які мають лінійну залежність опору від температури в широкому діапазоні температур і можуть бути виконані у вигляді чіп-резисторів або сформовані в мікромеханічну структуру за допомогою напилення. Для вимірювання електричного опору може бути застосований вимірювальний міст Уїтстона, плечі якого утворені терморезистором та опорним резистором. Необхідно зазначити, що необхідність використання додаткових схем

вимірювання для розглянутих ДТ тягне за собою погіршення таких характеристик ММГ як габарити, що впливає на потужність та надійність.

Трапляються випадки, при яких ДТ встановлюється окремо на друкованій платі на значній відстані від корпусу гіроскопа [63]. Це рішення поширене в інерційних вимірювальних модулях, так як є найбільш доступним та дешевим.

Головний недолік вимірювання температури за допомогою ДТ, який розташовується на відносно великій відстані від ЧЕ, пов'язаний з тим, що температура в різних частинах пристрою відрізняється, а її зміна відбувається в різний час, тобто. з деякою тимчасовою затримкою. Ця затримка обумовлена процесом теплообміну між корпусом, інтегральною схемою та ЧЕ, який відбувається з кінцевою швидкістю і залежить від швидкості зміни температури навколишнього середовища, шляхи поширення тепла, геометричних розмірів елементів конструкції та теплопровідності конструкційних матеріалів та газу всередині ЧЕ. У роботі [64] показано, що реакція зміни зовнішньої температури всередині ЧЕ та на поверхні його корпусу може відбуватися з тимчасовою затримкою близько 3-5 хв.

Таким чином, розбіжність місць встановлення ЧЕ та датчика температури неминуче призводить до помилок вимірювання температури ЧЕ та збільшення похибки при компенсації чи стабілізації температури. І якщо в стаціонарному режимі різниця температури між ними може становити одиниці градусів, то в динамічних температурних режимах вона збільшується в залежності від швидкості зміни температури навколишнього середовища і може перевищувати одиниці градусів Цельсія. Відомо, що компанія Honeywell, Inc. в процедуру перевірки свого інерційного модуля HG1930 включає випробування на тепловий удар зі швидкістю зміни від 3 до 15 °C/хв [65].

На малюнку 1.4 показано зміну в часі температури ІС та ЧЕ в ММГ, розробки ЦНДІ "Електроприлад", з відкритою кришкою мікромодуля,

встановленого у затискному пристрої з великим тепловим опором (близько 80 °C/Вт) після включення живлення (при кімнатній температурі).

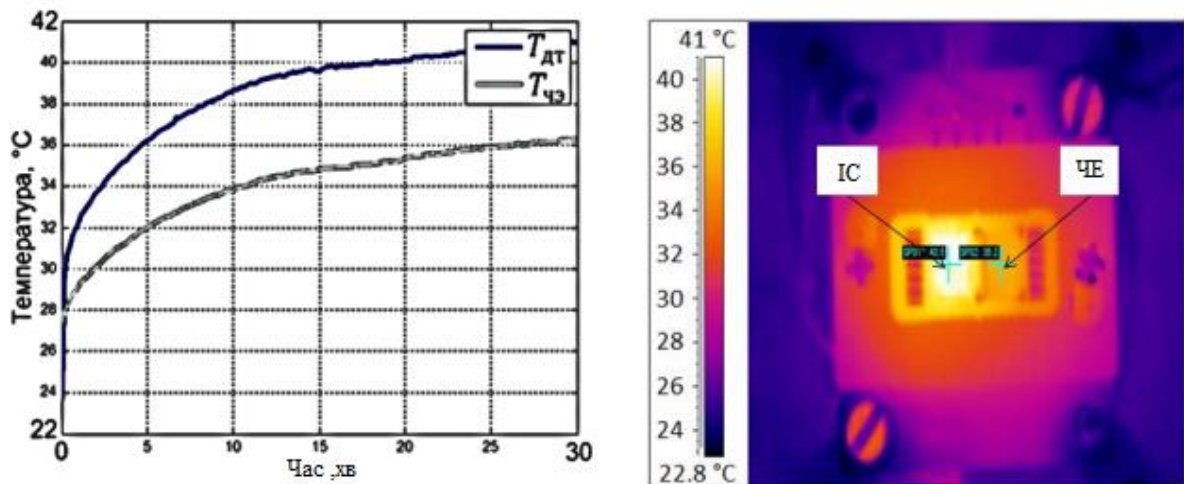


Рис. 1.2 – Зміна температури ЧЕ та ІС після подачі живлення та зображення ММГ в кінці перехідного процесу отримане за допомогою тепловізора.

Зміну температури ЧЕ та ДТ з часом від початкового значення T_0 можна представити за допомогою виразу:

$$\begin{aligned} T_{\text{че}} &= T_{\text{че}}^{\text{к}} + (T_0 + T_{\text{че}}^{\text{к}}) \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{че}}}\right), \\ T_{\text{дт}} &= T_{\text{дт}}^{\text{к}} + (T_0 + T_{\text{дт}}^{\text{к}}) \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{дт}}}\right) \end{aligned} \quad (1.11)$$

де $T_{\text{че}}$ та $T_{\text{дт}}$ – температура ЧЕ та інтегральної схеми, відповідно; T_0 – початкове значення температури при $t = 0$; $T_{\text{че}}^{\text{к}}$, $T_{\text{дт}}^{\text{к}}$ – кінцеві значення температури, що встановлюються після завершення теплових процесів; $\tau_{\text{че}}$, $\tau_{\text{дт}}$ – сталі часу.

Згідно з малюнком 1.2 різниця між температурами ІС та ЧЕ змінюється у часу від 0 до 4 °C, а тривалість перехідного процесу становить 30 хв. У разі монтажу ММГ на друковану плату з тепловідведенням різниця температур між ІС та ЧЕ знижується до 0,5-1 °C і час перехідного процесу може зменшитися на порядок, але, проте, зміна цієї різниці призводить до похибки температурної компенсації

Виходячи з цього, важливо виключити тимчасову затримку через просторовий поділ ДТ та ЧЕ. Тому для температурної компенсації або стабілізації віддають перевагу ДТ, який дозволяє проводити вимірювання температури всередині ЧЕ. Також, для того щоб враховувати температурний просторовий градієнт між різними частинами пристрою та друкованої плати доцільно, використовувати два і більше датчиків температури.

Останнім часом розвиваються та вважаються перспективними альтернативні способи вимірювання температури всередині ЧЕ резонаторів та гіроскопів, при яких сигнал, функціонально пов'язаний із величиною температури ЧЕ, формується із внутрішніх сигналів контурів управління становищем ІТ. У зарубіжній літературі зазначені способи називають "temperature self-sensing methods", а засновані вони на використанні температурно-залежних параметрів об'єкта управління і цим за рахунок виключення градієнта температур дозволяють визначати температуру безпосередньо самого ЧЕ:

$$U_{\text{ДТ}} \approx k_{\text{п}} * T_{\text{че}} \quad (1.12)$$

$k_{\text{п}}$ - Коефіцієнт перетворення.

До загальних переваг альтернативних способів відноситься те, що вони не вимагають додаткових схем вимірювання, завдяки чому загальне енергоспоживання не збільшується, а їх використання не повинне призводити до ускладнення конструкції пристрою, збільшення кількості з'єднань і контактів, тому ці способи мають потенційне застосування там, де мають місце особливо високі вимоги до розмірів.

1.3.1 Вимірювання температури за резонансною частотою коливань інерційного тіла

У роботі [66] і раніше в [19] наведено експериментальні дослідження кремнієвого ММГ, що проводяться в лабораторії агентства НАСА (NASA Jet Propulsion Laboratory), які показали, що, по-перше, залежності резонансних

частот коливань від температури мають близьку до лінійної форми у широкому діапазоні температур (від -60 до $+60$ °C), а по-друге, гістерезис залежності усунення нуля ММГ від резонансної частоти менше, ніж від температури довкілля (всередині термокамери). Крім того у роботі [67] показано, що у чотиримасовому ММГ резонансна частота первинних коливань та усунення нуля мають високе значення кореляції (98%). Таким чином, температурна чутливість резонансної частоти з одного боку є недоліком, а з іншого боку може бути використана для визначення дійсної температури ЧЕ із високою точністю. У роботі [68] дано оцінку похибки вимірювання температури за допомогою зазначеного способу, що становив $0,002$ °C (при часі опосередкування 1с).

Складність зазначеного способу визначення температури полягає в тому, що відносна зміна резонансної частоти зазвичай не перевищує 1% у всьому робочому діапазоні температур (від -40 до $+85$ °C), тому вимірювати резонансну частоту потрібно з високою точністю.

Для безперервного виміру резонансної частоти під час роботи ММГ потрібен опорний сигнал, власна частота якого має малу чутливість до зміни температури. Джерелом опорного сигналу може виступати окремий опорний генератор, або один з резонаторів у разі багатомасових систем. У першому випадку на практиці використовується цифровий частотомір з кварцовим генератором, що по-перше, призводить до збільшення розмірів пристрою, а по-друге, при частоті коливань ІТ близько 10 кГц для досягнення похибки вимірювань (через дискретність), рівної $\pm 0,01$ Гц, потрібно фіксувати та накопичувати імпульси лічильником протягом 100с , що призводить до малої швидкодії.

У разі багатомасових ЧЕ вихідний сигнал одного з резонаторів проходить через цілий дільник частоти для формування опорного сигналу з частотою f_1/N . Далі цей сигнал надходить на вхід фазового детектора, на другий вхід якого подається сигнал з різницею частот $f_1(T) - f_2(T)$. Зміна зсуву фаз між сигналами визначатиме зміну частоти, а отже, температури.

У ММГ, які мають принаймні два ІТ і, відповідно, два коливальних контури, визначати температуру можна по різниці між ними резонансними частотами, які мають різні коефіцієнти чутливості до температури:

$$f^*(T) = f_1(T) - f_2(T) = f_1(T_0) - f_2(T_0) + (\alpha_{f1} - \alpha_{f2})\Delta T \quad (1.13)$$

де $f_1(T)$, $f_2(T)$ – залежності резонансних частот від температури;

$f_1(T_0)$, $f_2(T_0)$ – резонансні частоти при температурі T_0 ; α_{f1} , α_{f2} – температурні коефіцієнти резонансних частот; $\Delta T = T - T_0$ – зміна температури.

Чим ближче одна до одної резонансні частоти $f_1(T_0)$ і $f_2(T_0)$ то більша різниця між їх температурними коефіцієнтами, тим більше чутливість до температури має відносну зміну різницевої частоти:

$$\frac{f^*(T) - f^*(T_0)}{f^*(T_0)} = \frac{(\alpha_{f1} - \alpha_{f2})\Delta T}{f_1(T_0) - f_2(T_0)}, \quad (1.14)$$

Приклад використання зазначеного способу в мікромеханічному осциляторі з двома резонаторами, які здійснюють вимушені коливання на частотах з різними температурними коефіцієнтами наведено у роботі [69]. Для формування сигналу з різницею частотою вихідні сигнали двох резонаторів після перетворення "ємність-напруга" спочатку перемножуються між собою, після чого за допомогою фільтра нижніх частот модульованого сигналу виділяється сигнал з різницею:

$$\cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t) = \frac{1}{2} [\cos(2\pi(f_1 - f_2)t) + \cos(2\pi(f_1 + f_2)t)] \quad (1.15)$$

Температурний коефіцієнт різницевої частоти становить $-360 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, що більш ніж у 20 разів вище за коефіцієнт одного з резонаторів [70].

Однак перемноження сигналів призводить до збільшення шумів у результуючому сигналі та появи небажаних гармонік у його спектрі.

Схожий спосіб вимірювання температури ЧЕ використовується в одномасових резонаторах з двома постійними модами коливань, які також мають Різні температурні коефіцієнти резонансних частот. Практична

реалізація зазначеного способу вимірювання температури в резонаторах поверхнево-акустичної хвилі розглядаються в роботі [71].

Таким чином, спосіб вимірювання температури на основі резонансної частоти може бути реалізований або в багатомасових резонаторах, або резонаторах, які мають, принаймні, дві моди коливань чи опорний генератор.

1.3.1 Вимірювання температури за добротністю коливального контура

Інша ідея визначення температури всередині ЧЕ заснована на використанні температурної залежності добротності коливального контуру. У цьому випадку коефіцієнт перетворення у виразі (1.12) можна подати у вигляді:

$$k_{\pi} = f(Q_e) \quad (1.16)$$

При тестуванні мікромеханічних резонаторів після їх виготовлення резонансні частоти та добротність можуть бути визначені в часовій (за часом згасання вільних коливань) та частотній областях. Однак обидва ці способи займають тривалий час і не підходять для резонаторів, що знаходяться в робочому режимі, при якому ІТ здійснює вимушені коливання під впливом системи розгону.

Відомий спосіб визначення добротності мікромеханічного резонатора по амплітуді коливань ІТ у генераторі опорної частоти [72], яка пропорційна добротності резонатора, і обернено пропорційна температурі. Практична реалізація цього способу була перевірена в резонаторі камертонного типу [73] і використовувалася для стабілізації температури ЧЕ.

Однак зазначена схема вимірювання температури не може бути застосована в ММГ, т.к. їх системи управління первинними коливаннями мають відмінну особливість, яка полягає в тому, що амплітуду коливань необхідно підтримувати на постійному рівні з високою точністю. Це досягається за рахунок регулювання амплітуди вхідного сигналу.

У роботі [74] зазначається (для невеликого діапазону температур від +35 до +65 °C), що вихідний сигнал схеми автоматичного регулювання посилення контуру управління первинними коливаннями в ММГ має монотонну залежність від температури і таким чином дозволяє опосередковано визначати температуру резонатора. Крім того, як і в попередньому випадку, гістерезис залежності зсуву нуля ММГ від сигналу АРУ має меншу ширину. Однак щодо ММГ подальшого розвитку та аналізу цього способу вимірювання температури для компенсації або стабілізації температури у закордонних роботах не було.

1.4 Мета і завдання дослідження

Мета: покращити точність гіроскопів шляхом вдосконалення методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів.

Завдання:

1. Огляд поточного стану проблеми температурної компенсації гіроскопічних датчиків.
2. Аналіз математичних моделей алгоритмів компенсації, вибір та обґрунтування алгоритму.
3. Розробка програмного апарату, що дозволяє підвищити точність компенсації.
4. Експериментальна перевірка розроблених алгоритмів та програмного забезпечення.

Об'єкт: температурні дрейфи гіроскопів.

Предмет: методи зниження впливу температури на точносні характеристики гіроскопів.

РОЗДІЛ 2 ОПИС МЕТОДІВ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДРЕЙФІВ ГІРОСКОПІЧНИХ ДАТЧИКІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

2.1 Модель вихідного сигналу гіроскопа

Розглянемо модель вихідного сигналу гіроскопічного датчика кутової швидкості з однією віссю чутливості [75].

Нехай віссю чутливості буде вісь Z. В такому випадку при ідеальних умовах вихідний сигнал гіроскопу $U_{\omega Z}$ (може бути – струм, напруга, коди АЦП) має бути пропорційним до проекції абсолютної кутової швидкості обертання ω на вісь Z:

$$U_{\omega Z} = k_z * \omega_z \quad (2.1)$$

де k_z – спільний коефіцієнт передачі (масштабний коефіцієнт), що включає коефіцієнт передачі власного датчика кута (датчика переміщень) ДКШ, коефіцієнти передачі підсилювача та інших можливих перетворювачів вимірювального ланцюга.

По справжньому кожен унікальний екземпляр ДКШ має свої індивідуальні особливості у вигляді масштабного коефіцієнта, зміщення нуля, перехресних зв'язків та багатьох інших параметрів. Виходячи з цього більш приближена до реальності модель вихідного сигналу гіроскопа матиме вигляд:

$$U_{\omega Z} = k_z \omega_z + k_{zx} \omega_x + k_{zy} \omega_y + U_{\omega z0} + n_{\omega z} \quad (2.2)$$

де k_{zx}, k_{zy} – коефіцієнти перехресної чутливості; $U_{\omega z0}$ – зміщення нуля ДКШ;
 $n_{\omega z}$ – шум вимірювання/

Конструкція датчиків кутової швидкості може бути заснована на різних принципах. І відповідно до цього модель вихідного сигналу може бути уточнена за рахунок додавання до неї специфічних складових.

2.2 Методи компенсації температурних дрейфів ММГ

В загальному випадку компенсація температурного дрейфу мікромеханічних гіроскопів зводиться до наступного алгоритму:

1. Проведення процедури температурного калібрування та накопичення даних.
2. Побудова температурної характеристики зміщення нуля та масштабного коефіцієнту.
3. Апроксимація цих даних за допомогою різних моделей.
4. Прогін отриманих даних через алгоритм корекції.

Функція корекції в найпростішому випадку знаходиться як різниця між вихідними даними ММГ після процедури температурного калібрування та результатом їх апроксимації. Крім того можливо виконання подальшого фільтрування скомпенсованого сигналу, його повторна компенсація та ін.

Апроксимацією називають наближене вираження будь-яких величин через інші. Вона дозволяє дослідити числові характеристики та якісні характеристики об'єкта досліджень зводячи задачу до вивчення більш простих та зручних об'єктів (наприклад, таких, характеристики яких легко обраховуються або властивості яких вже відомі). Апроксимації даних відведено окремі розділи математики, такі як: теорія приближення чисел, чисельні методи аналізу.

2.2.1 Апроксимації даних за допомогою лінійної моделі

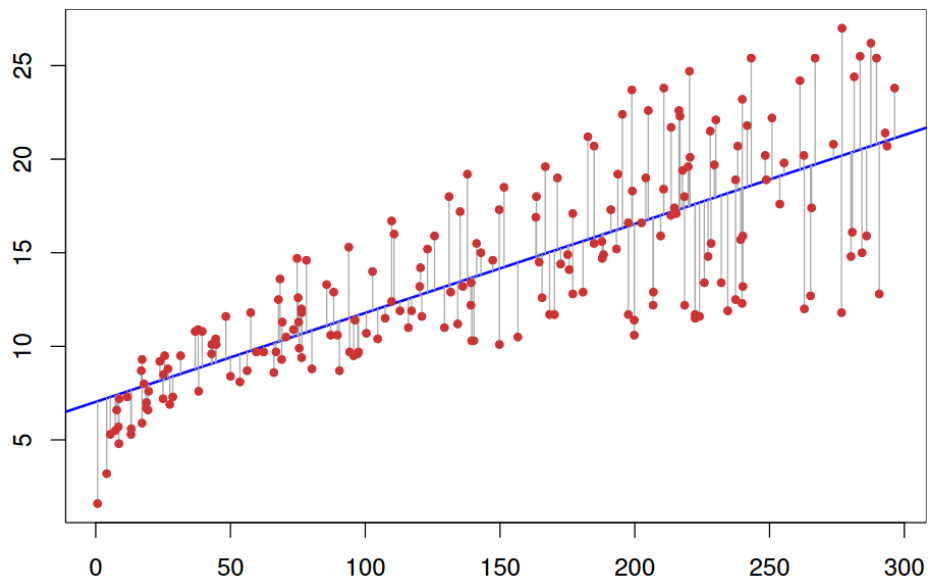


Рис. 2.1 – Лінійна апроксимація з допомогою МНК

Будь яка лінійна функція може бути представлена у вигляді рівняння [76]:

$$f(x_i) = a_0 + a_1 * x_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.3)$$

Апроксимація заключається в пошуку коефіцієнтів a_0 та a_1 рівняння таких, щоб всі точки апроксимованих даних лежали як можна ближче до апроксимованої прямої.

Для цього частіше всього використовують метод найменших квадратів (МНК), сенс якого заключається в наступному: сума квадратів відходжень значення точки від апроксимуючої точки має бути мінімальною:

$$F(a_0, a_1) = \sum_{i=0}^n (y_i - (a_1 * x_i + a_0))^2 \rightarrow \min \quad (2.4)$$

ішення поставленої задачі зводиться до знаходження екстремуму вказаної функції двох змінних. З цією ціллю знаходимо часткові похідні функції по коефіцієнтам a_0 та a_1 і прирівнюємо їх до нуля:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(a_0, a_1)}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (a_1 * x_i + a_0)) * x_1 = 0 \\ \frac{\partial F(a_0, a_1)}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (a_1 * x_i + a_0)) = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Вирішуючи отриману систему отримуємо:

$$\begin{cases} a_1 * \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_0 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i * y_i \\ a_1 \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n a_0 = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_1 * \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_0 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i * y_i \\ a_1 \sum_{i=1}^n x_i + na_1 = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (2.6)$$

Визначаємо значення коефіцієнтів:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i * y_i - \sum_{i=1}^n x_i * \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \\ a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n} \end{cases} \quad (2.7)$$

Для визначення коефіцієнтів необхідно знайти наступні складові:

$$\begin{aligned} sumx &= \sum_{i=1}^n x_i & sumy &= \sum_{i=1}^n y_i \\ sumx2 &= \sum_{i=1}^n x_i^2 & sumxy &= \sum_{i=1}^n x_i * y_i \end{aligned} \quad (2.8)$$

Тоді значення коефіцієнтів будуть визначатися як:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{n * sumxy - sumx * sumy}{n * sumx2 - sumx^2} \\ a_0 = \frac{sumy - a * sumx}{n} \end{cases} \quad (2.9)$$

До плюсів апроксимації даних лінійною моделлю можна віднести її простоту, та легкість в обчисленні. Що в свою чергу впливає на швидкодію та реалізованість програмного забезпечення, що використовує в ролі апроксимуючої функції лінійну модель.

Але очевидним мінусом є те, що апроксимація реальних даних лінійною моделлю буде нести за собою великі похибки, оскільки реальні залежності

Для подальшого вирішення даної задачі представимо систему рівнянь у матричній формі:

$$Y = X * A \quad (2.12)$$

де:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^m \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Зрештою вирішення системи рівнянь зводиться до знаходження вектора A , при відомих матриці X та вектору Y .

Варто відмітити, що кількість рівнянь n може бути більшою ніж кількість невідомих m . Це призводить до перевизначення системи, що в свою чергу означає, що вона не має єдиного точного розв'язку. Тому вирішення системи варто привести до знаходження оптимального вектору A .

Як і в випадку лінійного рівняння з попереднього пункту для цього частіше всього застосовують метод найменших квадратів. Вирішення даної системи рівнянь за допомогою МНК виглядає наступним чином.

Для початку запишемо рівняння яке буде відображати суть МНК:

$$\sum_i \varepsilon_i^2 = \sum_i (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \min \quad (2.14)$$

де: $\varepsilon_i = y_i - f(x_i)$. Далі потрібно переписати рівняння з додаванням вектора похибки:

$$Y + \varepsilon = X * A \quad (2.15)$$

Після цього завдання зводиться до мінімізації квадрата норми вектора похибки ε :

$$\sum_i \varepsilon_i^2 = \|\varepsilon\|^2 = \varepsilon^T * \varepsilon = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \dots \quad \varepsilon_n] * \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \rightarrow \min \quad (2.16)$$

таким чином з рівняння (2.15):

$$\varepsilon^T * \varepsilon = (X * A - Y)^T * (X * A - Y) \rightarrow \min \quad (2.17)$$

перетворюємо праву частину виразу:

$$X^T * A^T * X * A - 2 * X^T * A^T * Y + Y^T * Y \rightarrow \min \quad (2.18)$$

ля знаходження мінімум необхідно обчислити часткову похідну по вектору A рівняння і прирівняти її до 0:

$$\frac{\partial \varepsilon^T * \varepsilon}{\partial A} = 2 * X^T * X * A - 2 * X^T * Y = 0 \quad (2.19)$$

Визначимо з цього рівняння A :

$$A = (X^T * X)^{-1} * X^T * Y \quad (2.20)$$

Таким чином МНК зводиться до знаходження оберненої матриці.

Компенсація температурних дрейфів мікромеханічних гіроскопів з використанням апроксимації поліномом виглядає наступним чином:

Спершу обирається степінь поліному для масштабного коефіцієнту на зміщення нуля:

$$\begin{aligned} U_0 &= a_0 + a_1 * T + a_2 * T^2 + \dots + a_m * T^m \\ k &= \beta_0 + \beta_1 * T + \beta_2 * T^2 + \dots + \beta_m * T^m \end{aligned} \quad (2.21)$$

Потім потрібно визначити відповідні коефіцієнти поліномів застосовуючи МНК по експериментальним даним, що були отримані в процесі температурного калібрування.

Після цього будується поліном з визначеними коефіцієнтами та обраховується результат корегування.

Як видно поліноміальна апроксимація температурних залежностей гіроскопів позбавлена недоліків апроксимації лінійною моделлю. Однак вона також має і свої недоліки.

Як вже говорилося раніше в декількох роботах [48, 49] досліджувалася компенсація температурних похибок параметрів моделі вихідних сигналів ММГ, а саме апроксимація температурних залежностей поліномом різних степенів. Автори роботи прийшли до висновків, що апроксимація поліномами невеликих степенів (1 – 3 порядок) не дає достатньої точності компенсації. В той же час Апроксимація поліномом високих степенів (5 та більше) хоч і дає

кращі результати, але значно збільшує об'єм обчислень, що навантажує процесор. Також варто зазначити, що використання поліномів високих степенів може привести до появи такого явища як поліноміальне розгойдування (осциляція), що навпаки веде до збільшення похибки методу компенсації вихідних сигналів ДКШ. Обираючи порядок поліному доцільно зупинитися на компромісному значенні, яке б давало необхідну точність компенсації і швидкість обчислень.

В теорії кращих результатів можна домогтися використовуючи модель вихідних сигналів ДКШ, що заснована на використанні лінійної регресійної багатопараметричної моделі.

2.2.3 Лінійна регресійна багатопараметрична модель вихідного сигналу ДКШ

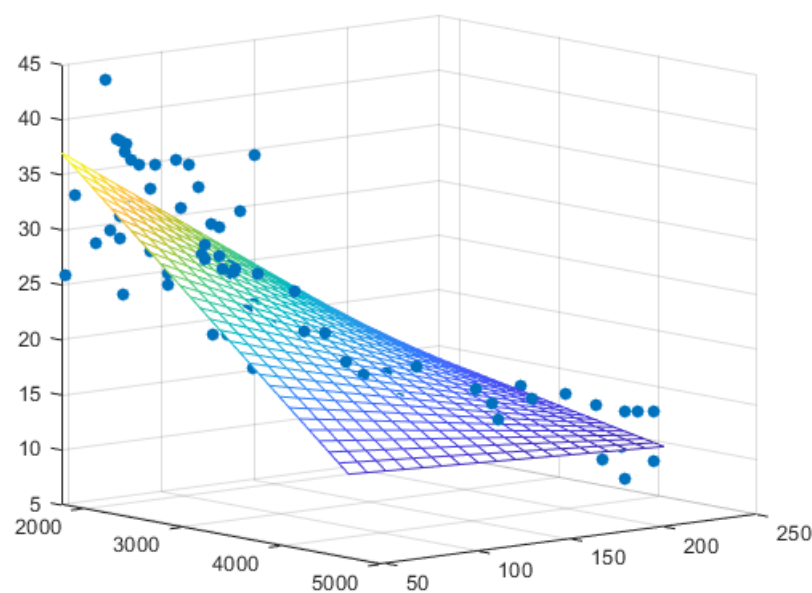


Рис. 2.3 – Апроксимація лінійною багатопараметричною моделлю

Лінійна регресія, хоча і є корисним інструментом, але вона має значні обмеження. Як випливає з назви, вона не може легко зіставити будь-який набір даних, який є нелінійним. Її можна використовувати лише для прогнозувань, які відповідають діапазону набору навчальних даних. І, що найголовніше вона

може бути застосований лише до наборів даних з однією залежною змінною та однією незалежною змінною.

Що до множинної регресії, в той час як вона не може подолати всі три з цих слабкостей лінійної регресії, вона спеціально розроблена для створення регресії на моделях з однією залежною змінною і декількома незалежними змінними.

Різниця між рівнянням для лінійної регресії та рівнянням для множинної лінійної регресії полягає в тому, що рівняння для множинної регресії має мати можливість обробляти декілька вхідних даних. З врахуванням цього, рівняння для множинної регресії набуває вигляду:

$$f(x_i) = B_1x_1 + B_2x_2 + \dots + B_ix_i + A, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.22)$$

У цьому рівнянні індекси позначають різні незалежні змінні. x_1 — значення першої незалежної змінної, x_2 — значення другої незалежної змінної і так далі. Рівняння продовжується, оскільки додається все більше і більше незалежних змінних, поки до рівняння не буде додано останню незалежну змінну, x_n . Слід зауважити, що ця модель дозволяє мати будь-яке число n , незалежних змінних, які додаються за потреби. Коефіцієнти B_i використовують ті самі індекси, що вказують на те, що вони є коефіцієнтами, пов'язаними з кожною незалежною змінною. Коефіцієнт A , є просто константою, яка вказує значення залежної змінної, коли всі незалежні змінні, дорівнюють нулю.

Для прикладу, якщо ми намагаємося оцінити вихідний сигнал гіроскопа при різній температурі. Ми не можемо знати точно який сигнал буде на виході того чи іншого гіроскопа при тій чи іншій температурі, але ми знаємо, що на нього може впливати. Це може бути на сам перед температура, частота його коливань, рівень шуму та інше. У цьому випадку можна створити рівняння лінійної множинної регресії, наприклад:

$$f(x_i) = B_1 * Temp + B_2 * Fres + \dots + B_i * Noise + A, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.23)$$

де $f(x_i)$ – вихідний сигнал, $Temp$ – показники датчика температури на платі, $Fres$ – це власна частота гіроскопа, $Noise$ – це рівень шуму сигналу а A – константа, що представляє постійну похибку.

Тепер, коли модель зіставлено для прогнозування вихідного сигналу гіроскопа, потрібно підігнати її до набору навчальних даних, щоб мінімізувати помилки.

Подібно то мінімізації суми квадратів помилок як це робилося в лінійній регресії, потрібно мінімізувати суму квадратів помилок, щоб знайти всі значення B у множинній регресії. Різниця в мінімізації полягає в тому, що оскільки існує кілька значень B , невизначена кількість змінних, поки не буде створена модель, простого алгебраїчного рішення, щоб знайти значення A і B просто не існує. Це означає, що потрібно використовувати стохастичний градієнтний спуск. Стохастичний градієнтний спуск досить велика тема, яка заслуговує окремого розгляду але детально в рамках наукової роботи розбиратися не буде. Його опис можна знайти в роботі[78].

Першим кроком потрібно підсумовувати квадрати похибок у кожній точці:

$$Error_{point} = (Actual - Prediction)^2 \quad (2.24)$$

де $Error_{point}$ — це помилка в моделі під час прогнозування вихідного сигналу ДКШ, $Actual$ – актуальне значення, а $Prediction$ — це значення, передбачене моделлю. Слід пам'ятати, що зведення помилки в квадрат є важливим, оскільки деякі помилки будуть додатними, а інші – негативними, і, якщо їх не звести в квадрат, ці похибки зкомпенсують одна одну, завдяки чому загальна помилка моделі буде виглядати набагато меншою, ніж вона є насправді.

Щоб знайти помилку моделі, помилку з кожної точки необхідно підсумувати по всьому набору даних. Це, по суті, означає, що модель використовується для прогнозування вихідного сигналу для кожної наявної точки даних. Віднімаючи це значення від фактичного в точці даних, щоб знайти помилку, зводячи цю помилку в квадрат, а потім підсумовуючи всі квадрати помилок разом, отримується похибка моделі:

$$Error_{model} = \sum (Actual_i - Prediction_i)^2 \quad (2.25)$$

де i – індекс, що повторює всі точки в наборі даних.

Після визначення функції помилки потрібно застосувати модель і функцію помилки за допомогою алгоритму стохастичного градієнтного спуску, щоб мінімізувати помилку. Це робиться шляхом мінімізації членів B у рівнянні. Детально про алгоритм стохастичного градієнтного спуску розповідається в [79]. Після підгонки моделі до навчальних даних, наступним кроком є переконатися, що вона добре відповідає даним.

Переконатися в тому що модель добре відповідає даним можна використовуючи коефіцієнт детермінації r^2 . Він визначає частину зміни в наборі даних, передбачену моделлю. Це значення в діапазоні від 0 до 1, причому 0 говорить про те, що модель не має можливості передбачити результат, а 1 говорить про те, що модель ідеально прогнозує результат. Потрібно зауважити, що значення r^2 будь-якої моделі, яка створюється, буде між цими двома значеннями (якщо це не так, десь в моделі є помилка).

Коефіцієнт детермінації для моделі можна розрахувати за допомогою таких рівнянь:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{Act_i} - y_{Pred_i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \text{mean}(f(x)))^2} \quad (2.26)$$

Додаткові умови завжди покращують модель, незалежно від того, додає нова змінна значну цінність моделі чи ні. При цьому слід пам'ятати, що з додаванням нових параметрів перевірка відповідності моделі множинної регресії ускладнюється. Додавання додаткових змінних до множинної регресії дає нові умови для моделі, які будуть використовуватися для відповідності даним, і новий коефіцієнт, який вона може змінюватися, щоб забезпечити кращу відповідність. Насправді, додавання нових змінних може фактично погіршити модель. Додавання все більше і більше змінних збільшує імовірність переповнення моделі відносно навчальних даних. Це може призвести до створення моделі, яка створює тенденції, яких насправді не існує, лише для того, щоб змусити модель відповідати точкам, які існують.

Цей факт має важливі наслідки при розробці множинних регресійних моделей. Звісно можна продовжувати додавати все більше і більше термінів до рівняння, поки не отримаєте ідеальну відповідність, або не скінчатися змінні для додавання. Але тоді в результаті можна отримати дуже велику, дуже складну модель, яка сповнена термінів, які насправді не мають відношення до процесів, що прогножуються. Постає питання як визначити які параметри є найважливішими.

Один із способів дати відповідь на це питання — обчислити стандартну похибку кожного коефіцієнта. Стандартна помилка вказує, наскільки впевнена модель щодо кожного коефіцієнта, причому більші значення вказують на те, що модель менш впевнена в цьому параметрі. Це інтуїтивно зрозуміло навіть без огляду основних рівнянь — якщо помилка, пов'язана з терміном, зазвичай висока, це означає, що вона не дуже сильно впливає на узгодження моделі з набором даних. Розрахунок стандартної помилки є складним статистичним процесом, і його не можна коротко описати. Про даний спосіб написано в роботі [80].

Після обчислення стандартної помилки кожного коефіцієнта можна використовувати результати, щоб визначити, які коефіцієнти важливі, а які ні. Оскільки високі значення вказують на те, що ці терміни додають моделі меншої передбачуваної цінності, можете зробити висновок, що ці терміни найменш важливі для збереження. На цьому етапі можна почати вибирати, які терміни з моделі можна видалити, щоб зменшити кількість доданків у рівнянні без різкого зниження передбачуваної сили моделі.

Інший метод полягає у використанні методики, яка називається регуляризацією. Регуляризація працює шляхом додавання нового терміна до обчислення помилки, який базується на кількості доданків у рівнянні множинної регресії. Більше доданків у рівнянні за своєю суттю призведуть до більшої похибки регуляризації, тоді як менше доданків в свою чергу призводять до меншої похибки регуляризації. Якщо до рівняння помилки додано член регуляризації, мінімізація помилки означає не просто мінімізацію

помилки в моделі, а й мінімізацію кількості доданків у рівнянні. Це в свою чергу приведе до моделі, яка гірше відповідає навчальним даним, але також по суті призводить до моделі з меншою кількістю членів у рівнянні. Вищі значення терміну в помилці регуляризації створюють більший тиск на модель, щоб мати менше членів.

Створена модель — це не просто рівняння з купою чисел. Кожен із щойно отриманих коефіцієнтів вказує на вплив незалежної змінної на залежну змінну за умови, що всі інші залишаються рівними. Це ще одна причина, чому важливо підтримувати низьку кількість доданків у рівнянні. По мірі того, як додається все більше термінів, стає все важче відстежувати фізичне значення кожного терміна. Також стає важче обґрунтувати наявність кожного терміна.

Слід також зауважити, що модель нічого не говорить про те, як параметри можуть впливати один на оден. Дивлячись на рівняння, це неможливо. Усі різні коефіцієнти пов'язані лише з одним фізичним параметром. Якщо вважати, що два терміни пов'язані, можете створити новий термін на основі комбінації цих двох. Інша можлива модифікація включає додавання нелінійних входів. Сама модель множинної регресії може бути лише лінійною, що є її обмеженням. Однак можна створити нелінійні терміни в моделі.

Множинна регресія — це розширення моделей лінійної регресії, які дозволяють прогнозувати системи з кількома незалежними змінними. Це робиться шляхом простого додавання додаткових термінів до рівняння лінійної регресії, причому кожен член представляє вплив іншого фізичного параметра.

Це все ще лінійна модель, що означає, що терміни, включені в модель, не здатні показати будь-які відносини між собою або відобразити будь-який вид нелінійної тенденції. Ці недоліки можна подолати, додавши до рівняння модифіковані терміни. Новий параметр може керуватися іншим рівнянням, яке відстежує зв'язок між змінними або, яке застосовує нелінійну тенденцію до змінної. Таким чином, незалежні лінійні тенденції в моделі множинної

регресії можуть бути змушені фіксувати відносини між двома або більше нелінійними впливами.

Оскільки в моделі більше параметрів, ніж у простій лінійній регресії, при створенні рівняння потрібна велика обережність. Додавання додаткових термінів за своєю суттю покращить відповідність між даними, але нові терміни можуть не мати жодного фізичного значення. Це небезпечно, оскільки веде до моделі, яка відповідає цим даним, але насправді не дає нічого корисного. Крім того, збільшення кількості термінів підвищує ймовірність переобладнання моделі, що призведе до потенційно катастрофічних результатів під час фактичного прогнозування значень.

Існує багато методів обмеження кількості параметрів і пов'язаних з цим недоліків у цих моделях [81]. Два включають обчислення стандартної помилки кожного коефіцієнта та регуляризацию. Розрахунок стандартної помилки дозволяє побачити, які терміни є найменш цінними для моделі, і вибрати терміни що слід видалити. Регуляризація переносить цей процес на наступний крок, додаючи термін помилки для збільшення термінів у моделі, тим самим фактично зменшуючи якість відповідності, оскільки додається більше термінів. Цей метод допомагає знайти баланс між видаленням термінів, щоб зменшити недоліки додаткових термінів, при цьому включаючи достатню кількість найбільш важливих, для покращення моделі.

Висновки до розділу 2

Було розглянуто відомі методи компенсації температурних похибок гіроскопічних датчиків кутової швидкості. Розглянуто та проаналізовано методи апроксимації температурних залежностей. Виділено їх сильні та слабкі сторони.

Прийнято рішення розглянути в роботі методи алгоритмічної компенсації двейфів гіроскопів, що використовують апроксимацію даних наступними моделями: лінійна, поліноміальна та лінійна регресійна.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДІВ АЛГОРИТМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ГІРОСКОПІВ

3.1 Дослідження методів компенсації температурних дрейфів ММГ

3.1.1 Модель ММГ для проведення досліджень

Для експериментальної перевірки алгоритмів компенсації температурних дрейфів ММГ було розроблено комп'ютерну модель ММГ використовуючи результати представлені в роботі [82].

Найпростіша модель гіроскопа яка має приймати на вході сигнал кутової швидкості, та видавати відліки виглядає наступним чином:



Рис. 3.1 – Примітивна модель гіроскопа

Звісно така схема не може хоч з якоюсь точністю відтворювати поведінку реального гіроскопа. Одна з причин цього відсутність динамічної складової ММГ. Як говорилося в першому розділі робота мікромеханічного гіроскопа базується на силі Коріоліса.

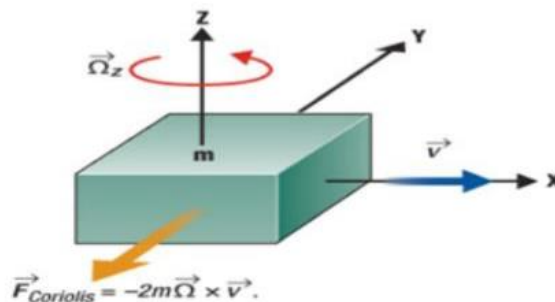


Рис. 3.2 – Сила Коріоліса

ММГ має невелику вібруючу масу. Коли на гіроскоп діє зовнішня кутова швидкість, сила Коріоліса викликає зміщення цієї маси. Гіроскоп використовує ємнісні датчики, щоб зафіксувати це зміщення та вивести пропорційну до кутової швидкості кількість відліків.

Динаміка гіроскопу представлена передатною функцією 2-го порядку [83, 84]. Блок передатої функції розміщується між входом та масштабним коефіцієнтом.

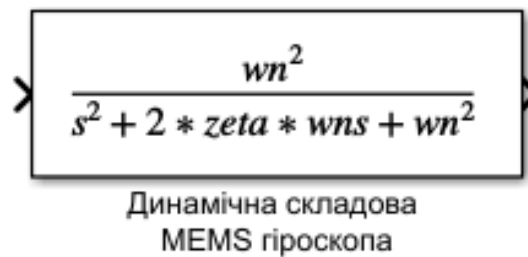


Рис. 3.3 – Передатна функція ММГ

Крім того модель мікромеханічного гіроскопа має враховувати статичну похибку та шум датчика. Статична похибка визначається як середнє значення вихідного сигналу, коли на гіроскоп не діють зовнішні кутові швидкості. Для його моделювання можна просто додати константу на вхід.

Шум датчика буде змодельовано як білий шум з обмеженою полосою пропускання. Це означає, що шум буде мати рівну потужність на всіх частотах. Це буде дуже схоже до реального шуму який присутній в мікромеханічних гіроскопах.



Рис. 3.4 - Блок SIMULINK для відтворення білого шуму

В налаштуваннях блоку ми можемо побачити 3 поля для введення. В полі що задає час вибірки має бути час вибірки гіроскопа. В нашому випадку це значення 1/95 секунд або 95 Гц. Потужність шуму як заявлено в роботі [82], має складати 0.9889. Трете поле можна залишити без змін. Воно використовується для налаштування генератора випадкових чисел.

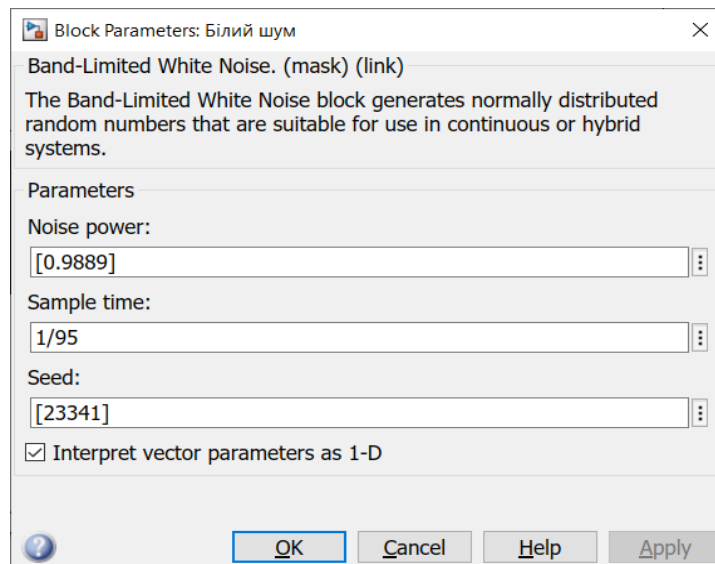


Рис. 3.5 – Налаштування для блоку білого шуму.

Гіроскоп має 16-бітний вихід, тож в модель потрібно також додати блок насичення, щоб бути впевненим в тому, що незалежно від вхідної кутової швидкості вихідний сигнал не буде більшим ніж 16-ти бітне число.

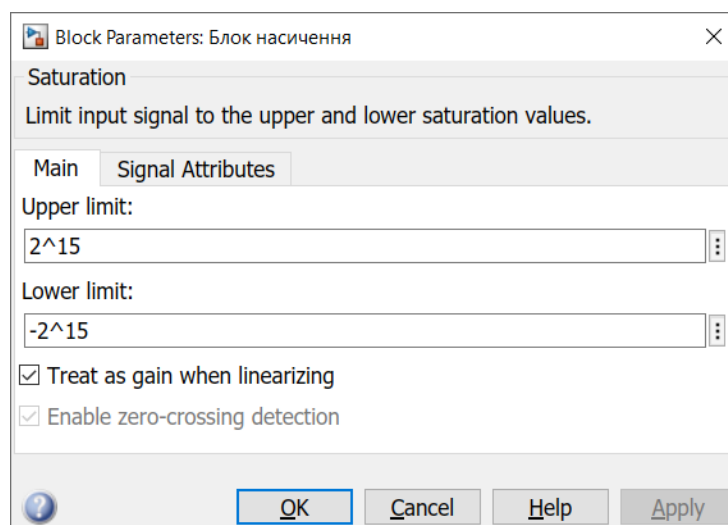


Рис. 3.6 – Налаштування блоку насичення

Ще одним елементом моделі стане фільтр частот, який наявний в ММГ, що моделюється. Частота зрізу для даного фільтра в даному гіроскопі складає 12.5 Гц. Базуючись на роботі [82], фільтр має вигляд блоку передатної функції 2-го порядку:

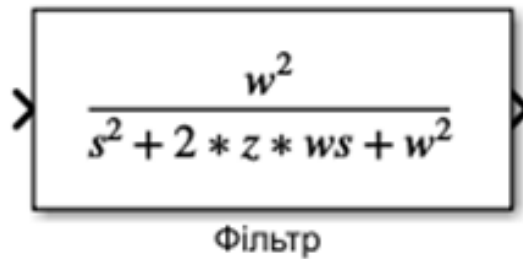


Рис. 3.7 – Блок фільтру низьких частот.

Результатом стала модель мікромеханічного гіроскопа в середовищі Matlab SIMULINK, що має наступний вигляд:

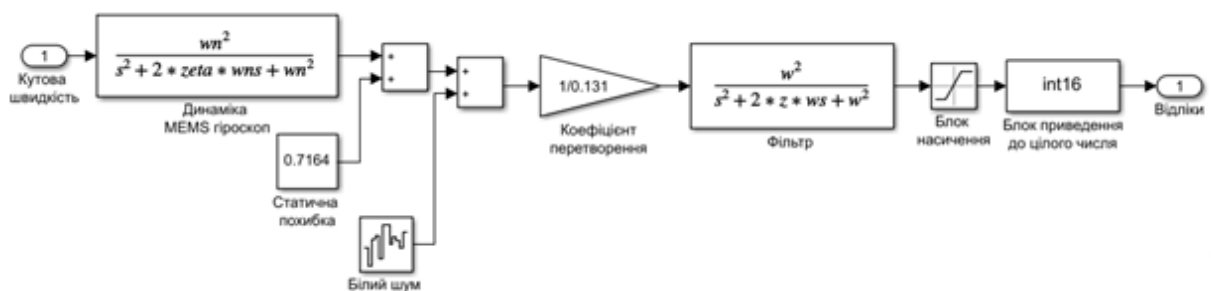


Рис. 3.8 – Модель ММГ в середовищі SIMULINK

Дана модель відрізняється від тої, що представлена у роботі [79]. Вона виправляє дві її основні помилки. Перша полягає в тому, що в референсній моделі блок насичення йшов після фільтру низьких частот що в теорії могло призвести до виведення числа розмірністю більше 16 біт. Також в модель було додано блок приведення вихідного сигналу до цілого числа. Це зроблено по причині того, що виходом гіроскопа є кількість відліків, яка є цілим числом.



Рис. 3.9 - Модель Simulink гіроскопа рівня нульової швидкості

Після проведення моделювання поведінки гіроскопа при нульовій вхідній кутовій швидкості було отримано наступні результати (рис. 3.10).

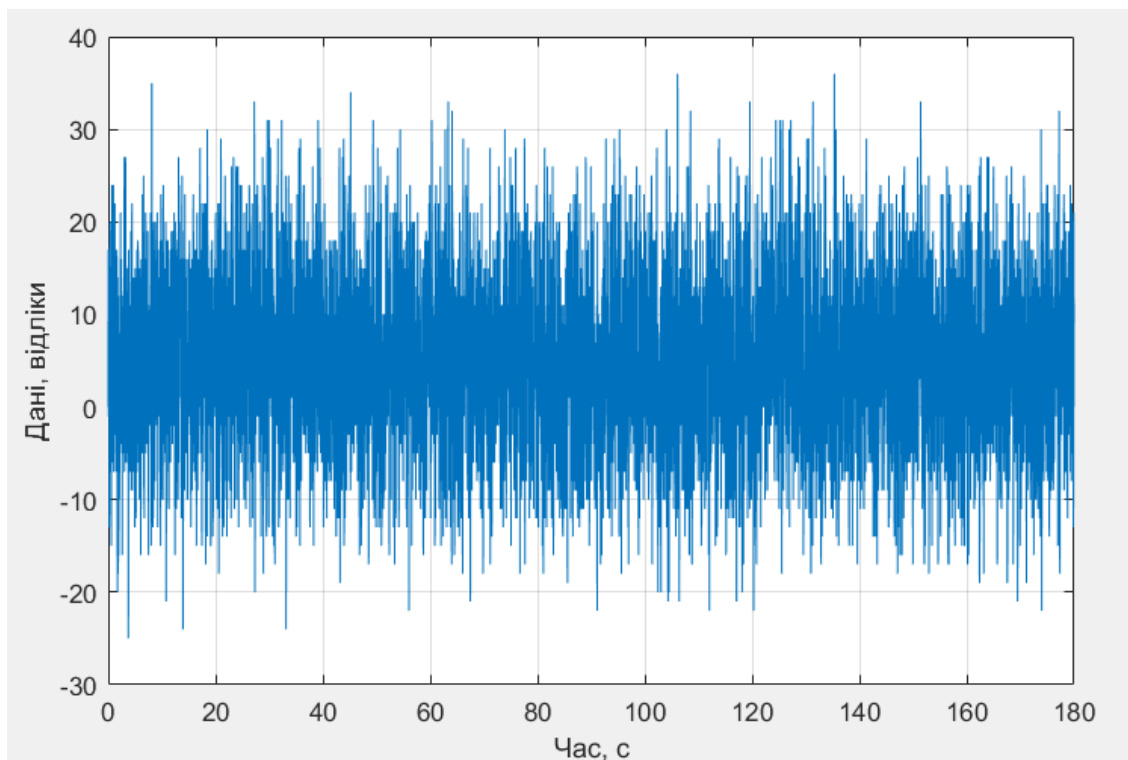


Рис. 3.10 – Вихідний сигнал гіроскопа

Роботу фільтра можна побачити побудувавши частотну характеристику (рис 3.12).

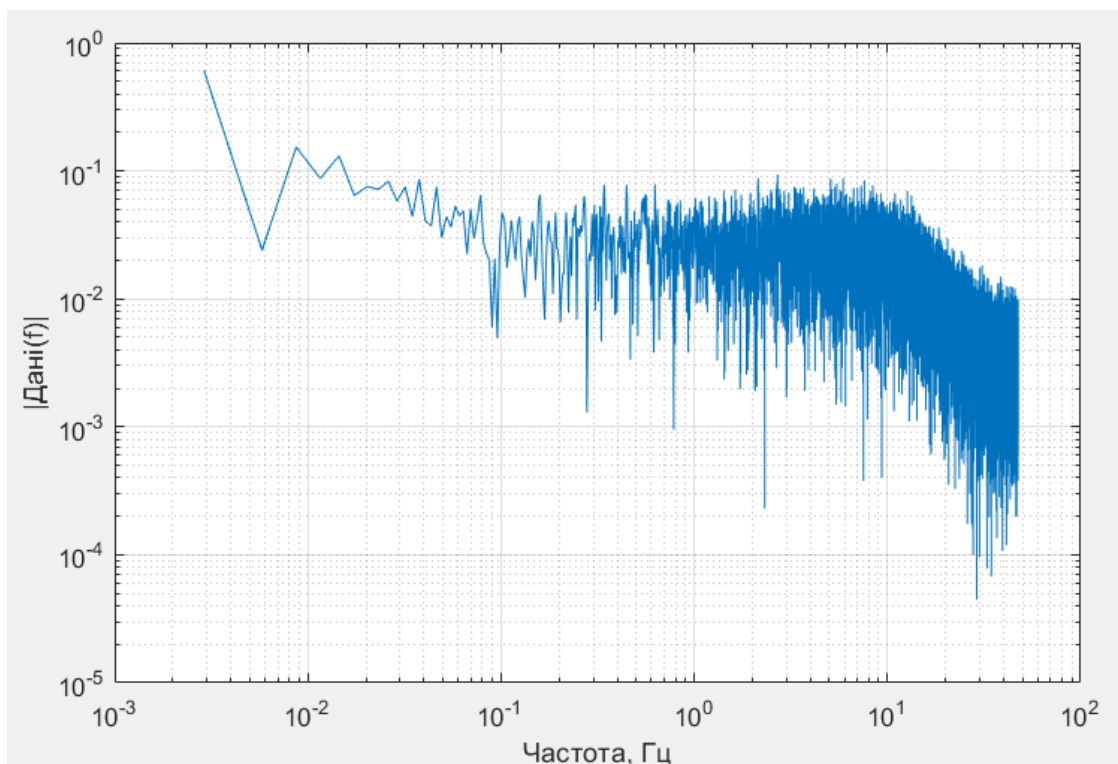


Рис. 3.11 - Дані гіроскопа, змодельовані частотною характеристикою

За результатами моделювання можна сказати, що запропонована модель з достатньою точністю відображає поведінку мікромеханічного гіроскопа та може використовуватися для подальших досліджень алгоритмів компенсації температурних дрейфів.

3.1.2 Отримання калібрувальних даних

Для того, щоб перевірити описані методи алгоритмічної компенсації дрейфів гіроскопів, потрібно отримати дані які є результатом процедури температурного калібрування. Для цього було змодельовано прохід в термокамері по наступній циклограмі (рис 3.12):

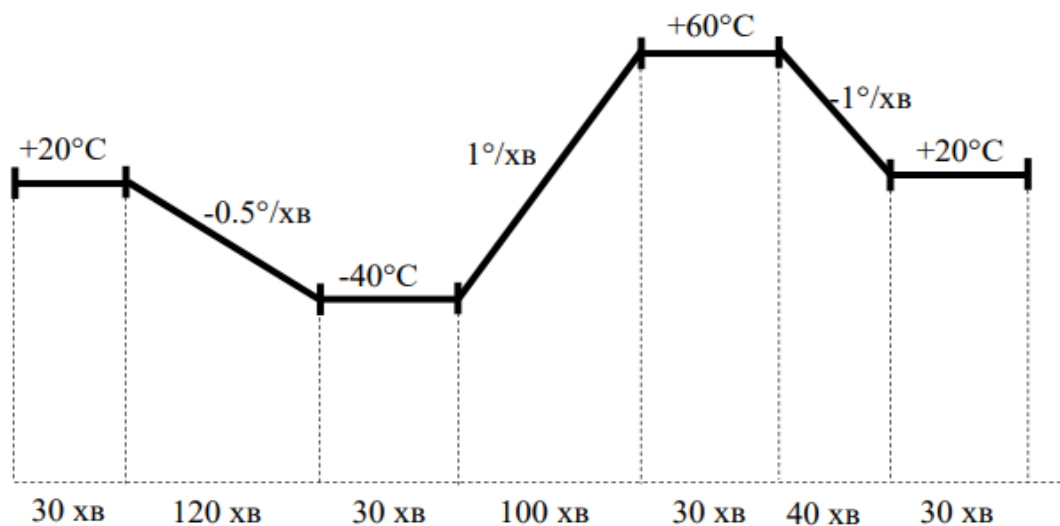


Рис. 3.12 - Циклограма роботи кліматичної камери

Результатами моделювання стали данні вихідного сигналу термодатчика (рис. 3.13) та некомпенсовані дані вихідного сигналу гіроскопа (рис. 3.14).

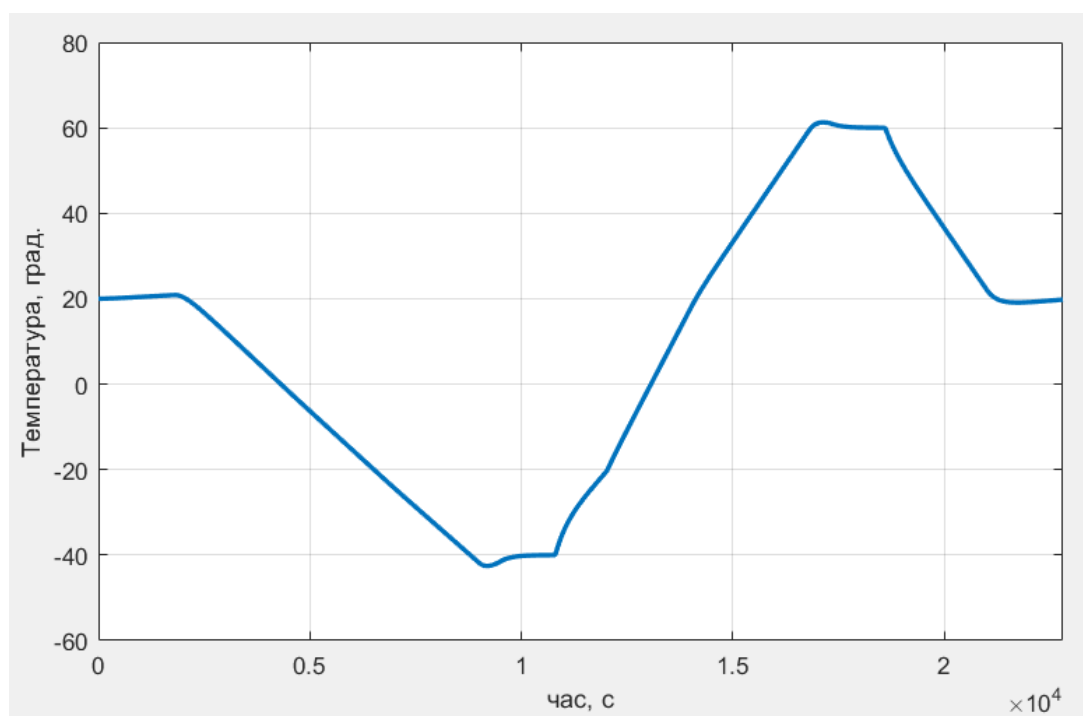


Рис. 3.13 – Змодельований сигнал термодатчика

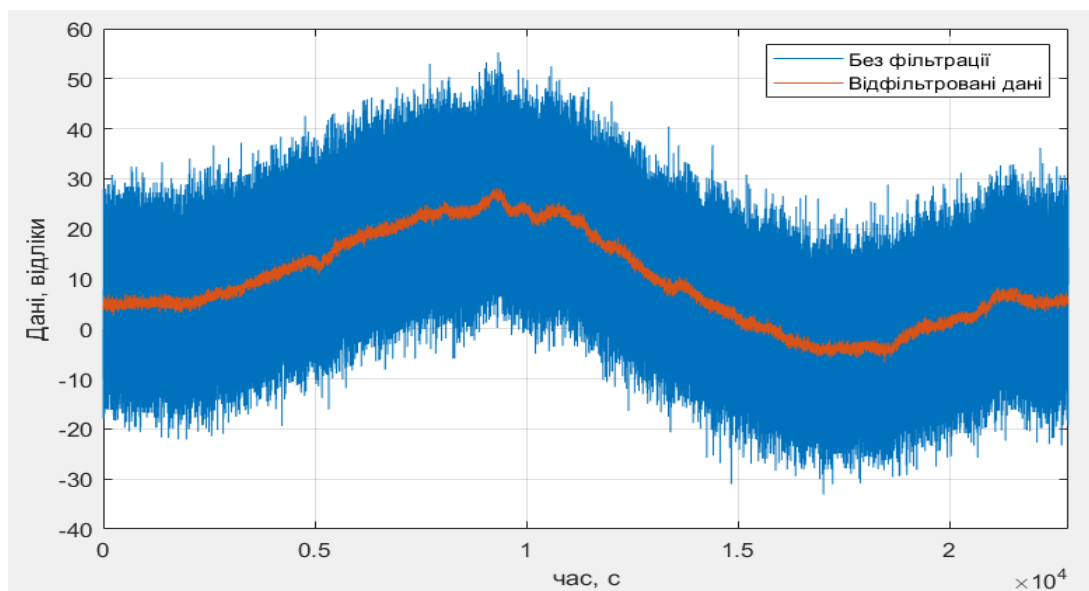


Рис. 3.14 – Змодельований вихідний сигнал гіроскопа

Отримані дані ілюструють поведінку гіроскопа, з однією віссю чутливості направленою вертикально вгору, при нульовій вхідній швидкості. Тобто отримуються дані необхідні для калібрування нульового сигналу гіроскопа.

Побудувавши залежність вихідних даних гіроскопу до зміни температури, стало можливим побачити його температурний гістерезис (рис. 3.15).

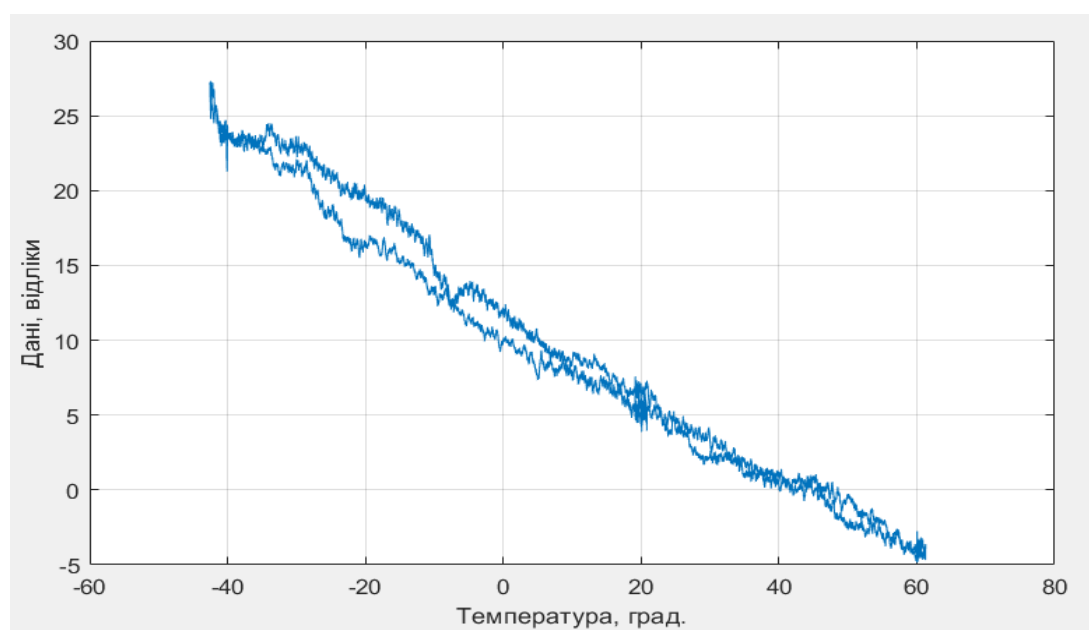
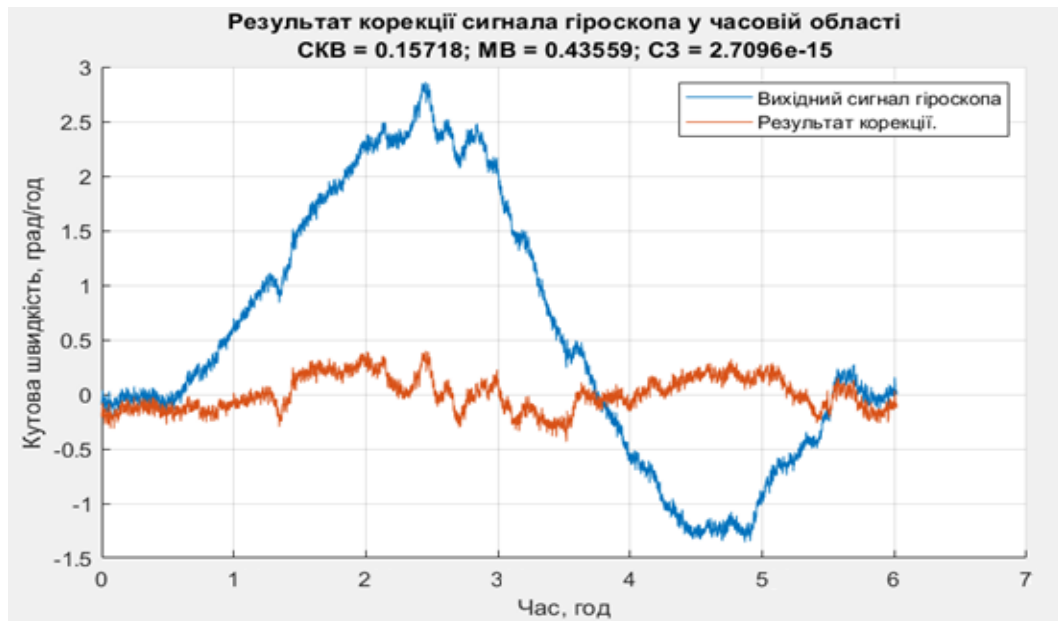


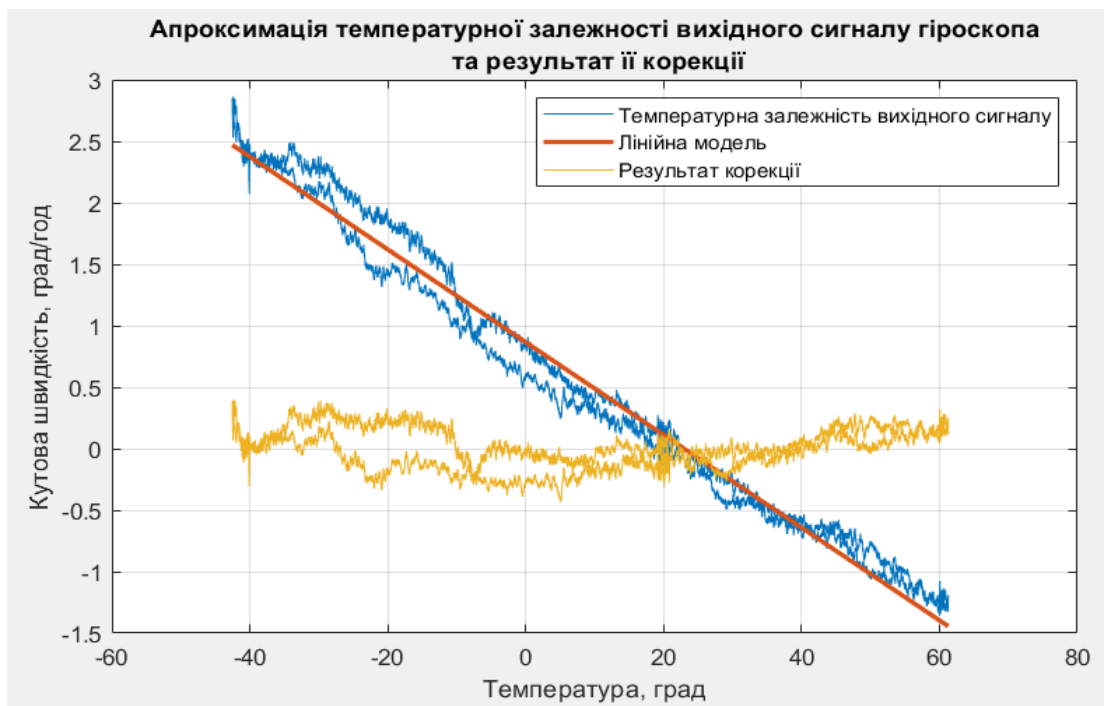
Рис. 3.15 – Температурний гістерезис гіроскопа

3.1.3 Компенсація дрейфів ММГ з використанням лінійної апроксимації

Результати роботи алгоритму компенсації температурних дрейфів гіроскопів, можна побачити нижче (рис. 3.16):



а)



б)

Рис. 3.16 – а) Результат компенсації вихідного сигналу гіроскопа в часовій області б) Апроксимація та компенсація температурної залежності гіроскопа.

Результати дослідження було оформлено в таблицю (табл. 3.1):

Табл. 3.1 – Результати проведення алгоритмічної компенсації

№ п/п	Апроксимуюча ф-ція	СКВ	МВ	СЗ
1	Нескомпенсовані дані	1.1904	2.8659	0.5275
2	Лінійна	0.15718	0.43559	2.7096e-15

З таблиці (табл. 3.1) можна зробити такі висновки. Величина середньоквадратичного відхилення зменшилася до 0.1572 град/год, (на 86%) максимальне відхилення скомпенсованого сигналу зменшилося до 0.4331 град/год (на 84%), а середнє значення після компенсації дорівнює 8.59×10^{-15} град/год, що на 14 порядків менше початкового значення.

Однак використовуючи лінійну модель для апроксимації температурної залежності гіроскопу не вдалося прибрати гістерезис.

3.1.4 Компенсація дрейфів ММГ з використанням поліноміальної апроксимації

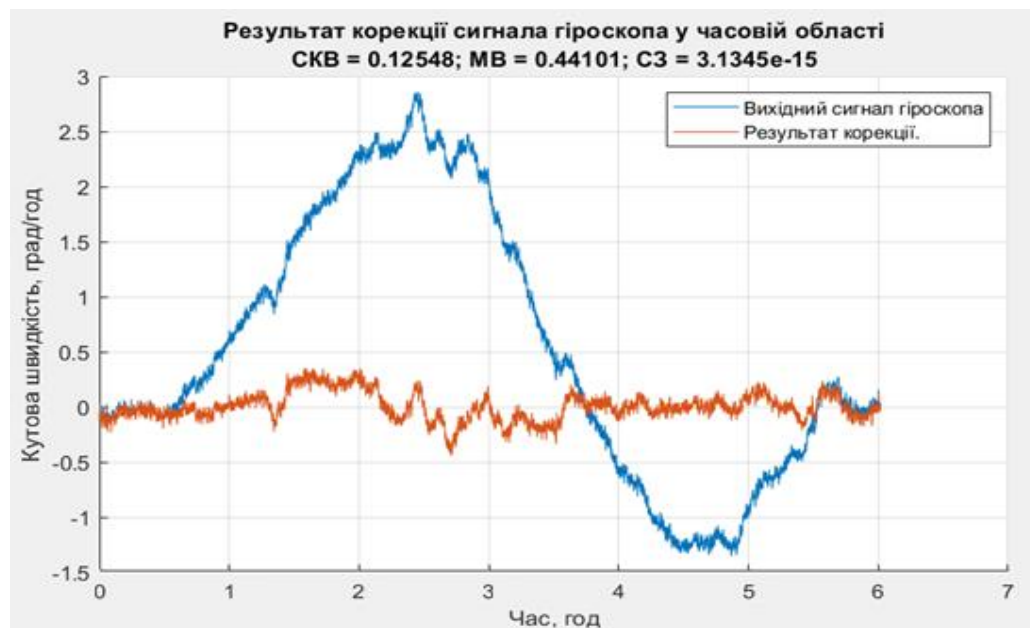


Рис. 3.17 - Результат компенсації вихідного сигналу використовуючи поліном 2-го степеня в часовій області

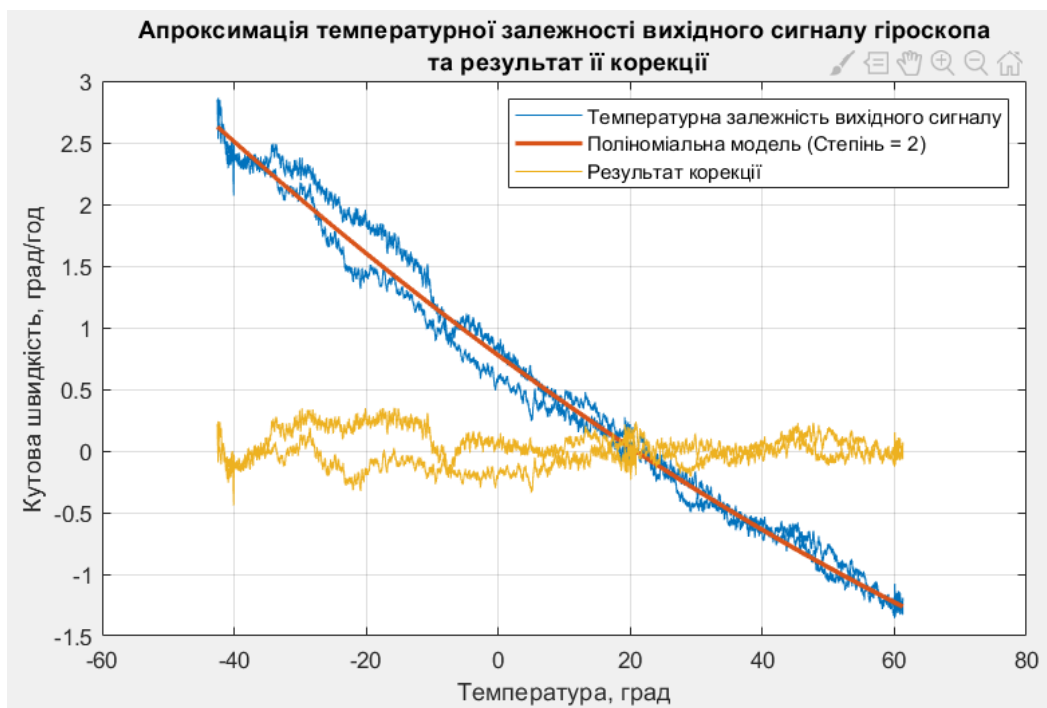


Рис. 3.18 – Результати апроксимації поліномом 2-го степеня та компенсації температурної залежності гіроскопа

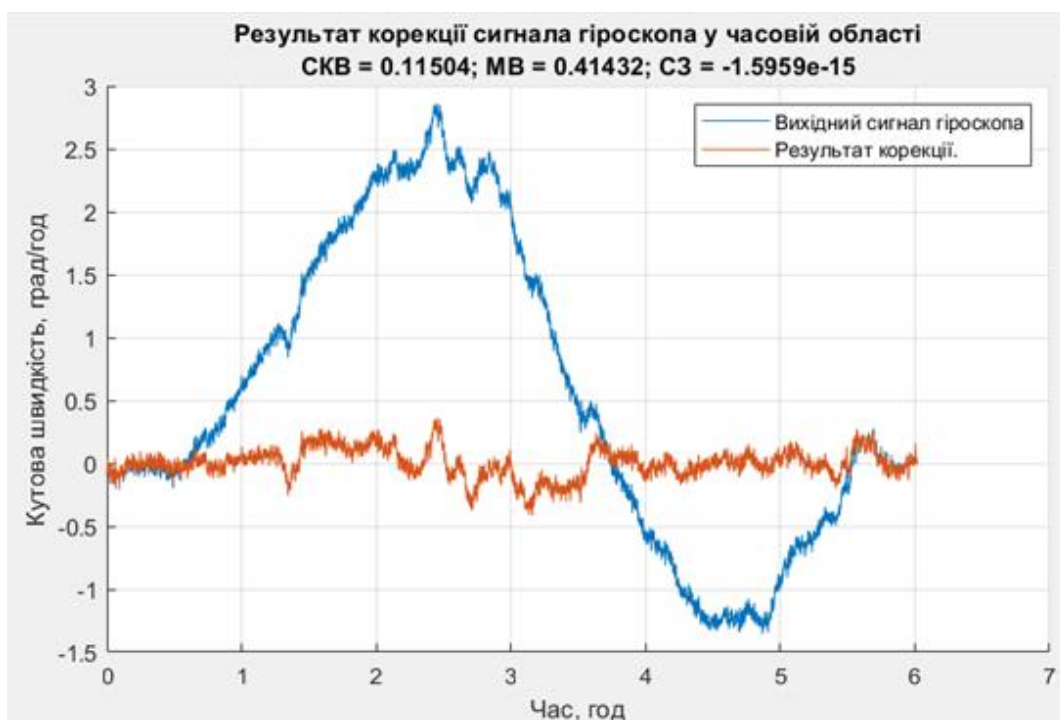


Рис. 3.19 - Результат компенсації вихідного сигналу використовуючи поліном 4-го степеня в часовій області

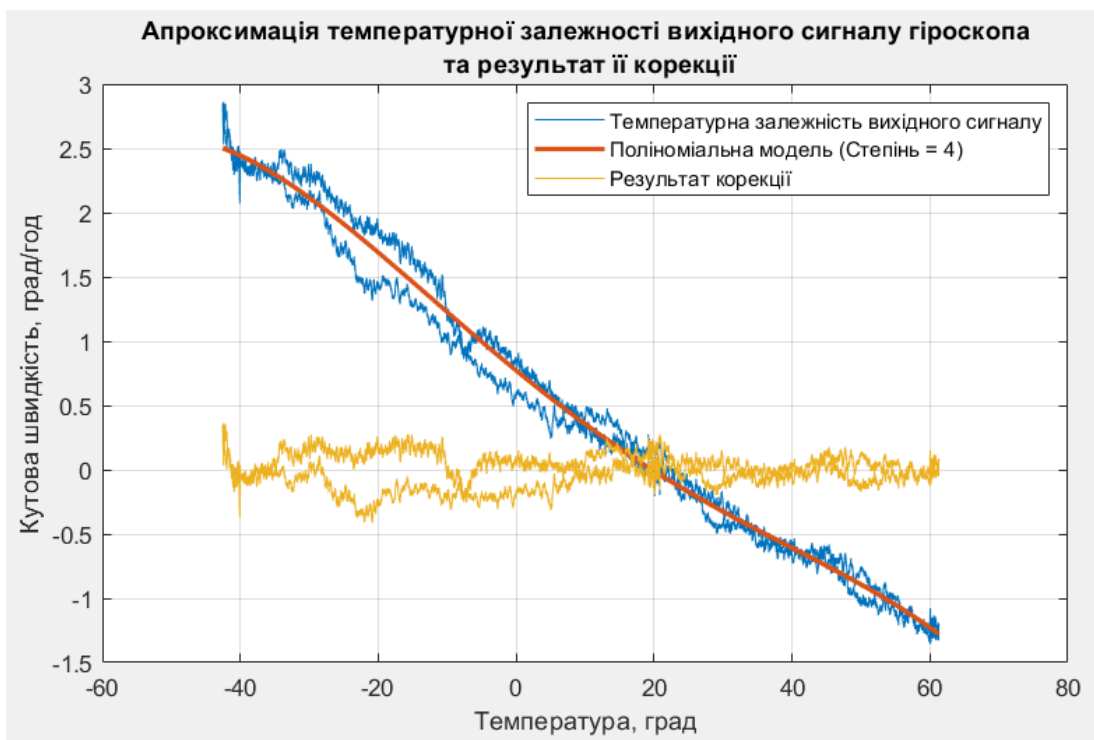


Рис. 3.20 – Результати апроксимації поліномом 4-го степеня та компенсації температурної залежності гіроскопа



Рис. 3.21 - Результат компенсації вихідного сигналу використовуючи поліном 5-го степеня в часовій області

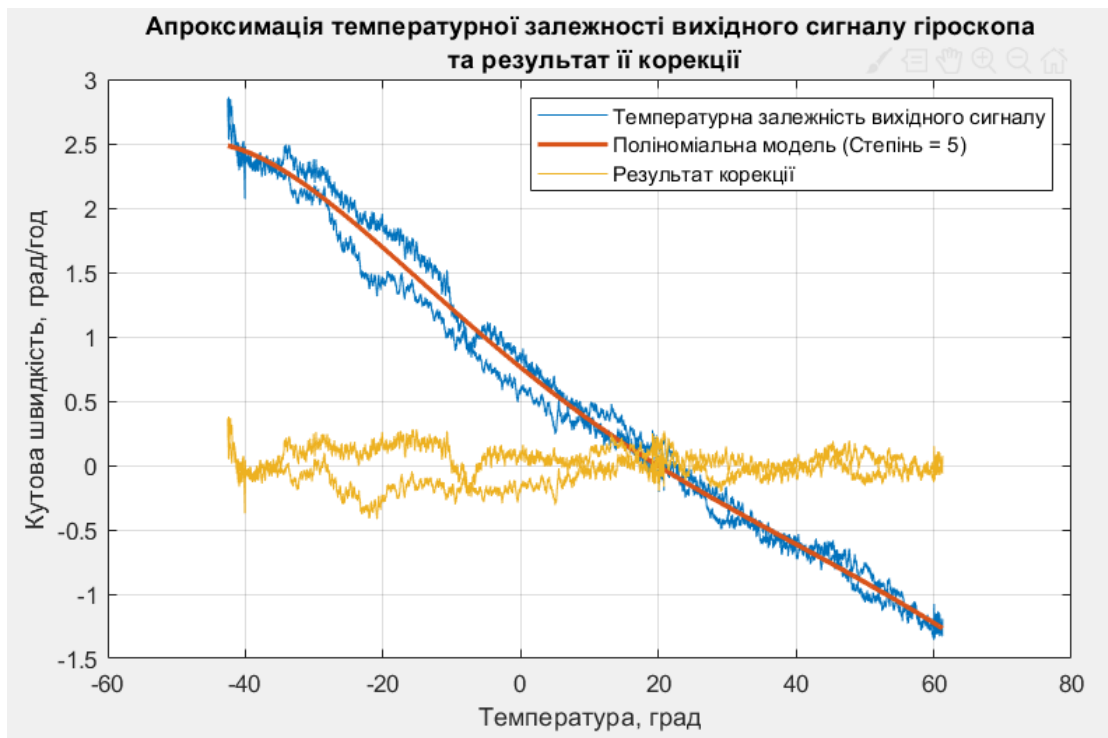


Рис. 3.22 - Результати апроксимації поліномом 4-го степеня та компенсації температурної залежності гіроскопа



Рис. 3.23 - Результат компенсації вихідного сигналу використовуючи поліном 7-го степеня в часовій області

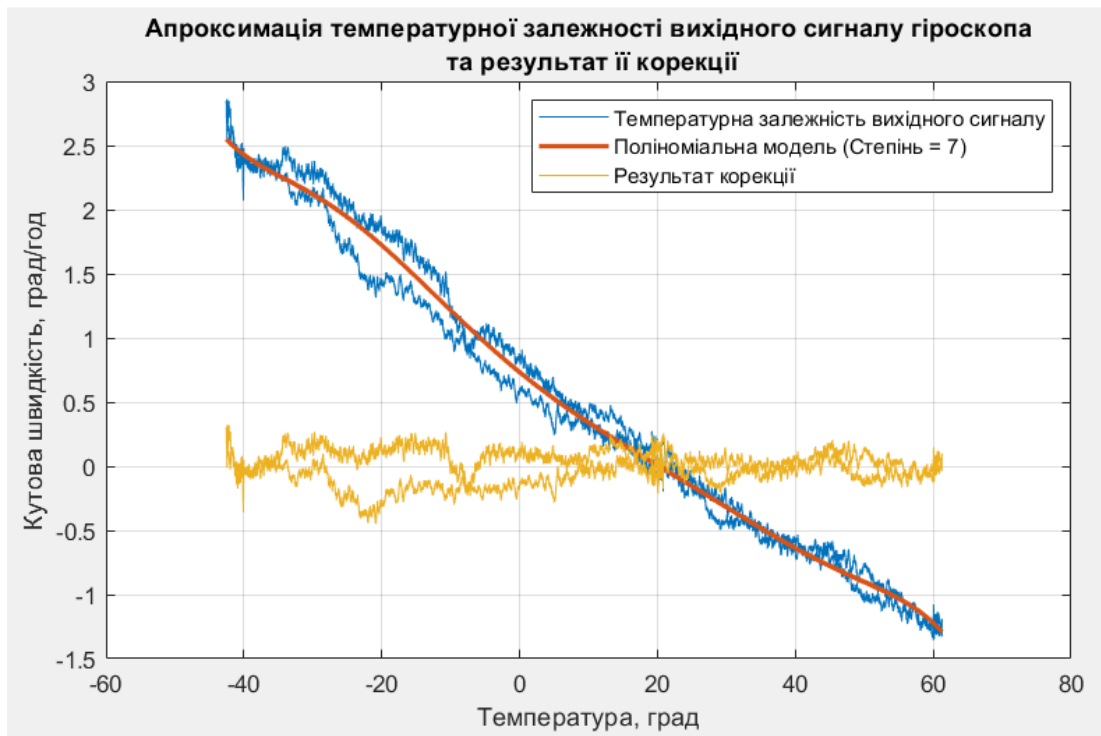


Рис. 3.24 - Результати апроксимації поліномом 7-го степеня та компенсації температурної залежності гіроскопа



Рис. 3.25 - Результат компенсації вихідного сигналу використовуючи поліном 10-го степеня в часовій області

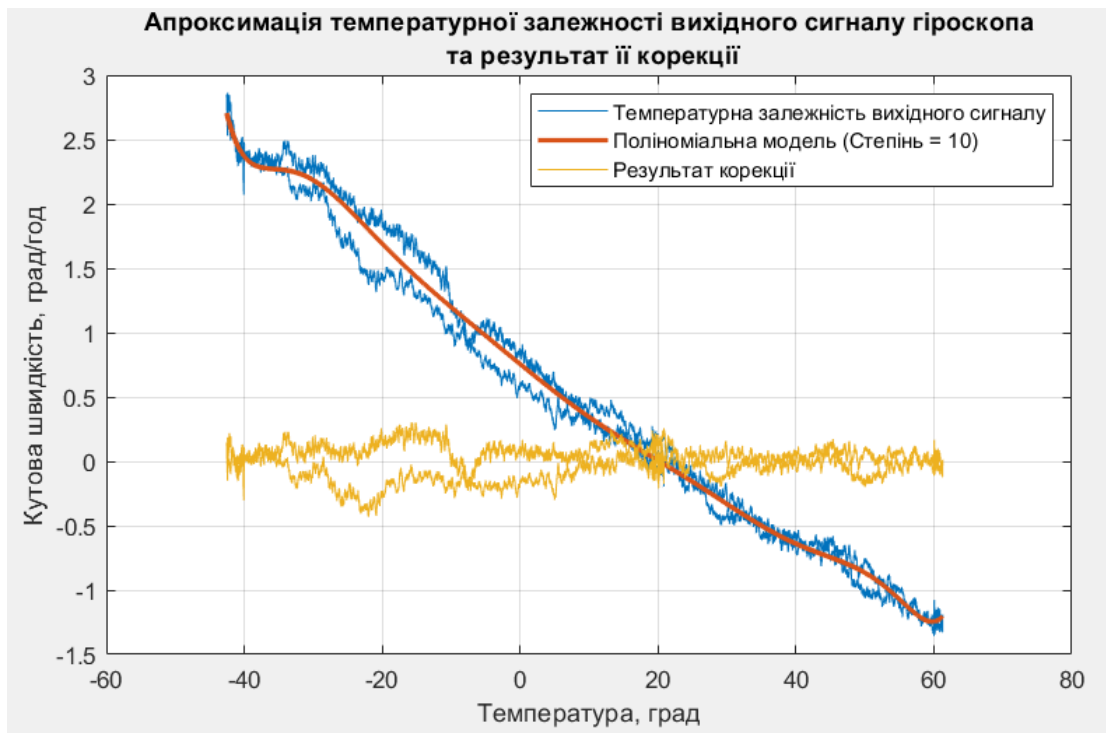


Рис. 3.26 - Результати апроксимації поліномом 10-го степеня та компенсації температурної залежності гіроскопа

Порівняння результатів калібрування (табл. 3.2):

Табл. 3.2 – Порівняння результатів калібрування

№ п/п	Степінь поліному	СКВ	МВ	СЗ
1	Нескомпенсовані дані	1.1904	2.8629	0.5275
2	Лінійна	0.15718	0.43559	2.7096e-15
3	2	0.12548	0.44101	3.1345e-15
4	4	0.11504	0.41432	-1.5959e-16
5	5	0.11475	0.41669	2.5379e-15
6	7	0.11304	0.4787	2.8531e-15
7	10	0.10763	0.42985	5.67e-13

По даним таблиці було створено графіки залежності похибок скомпенсованого сигналу ДКШ від степеня апроксимуючого поліному (рис. 3.27 – 3.29):

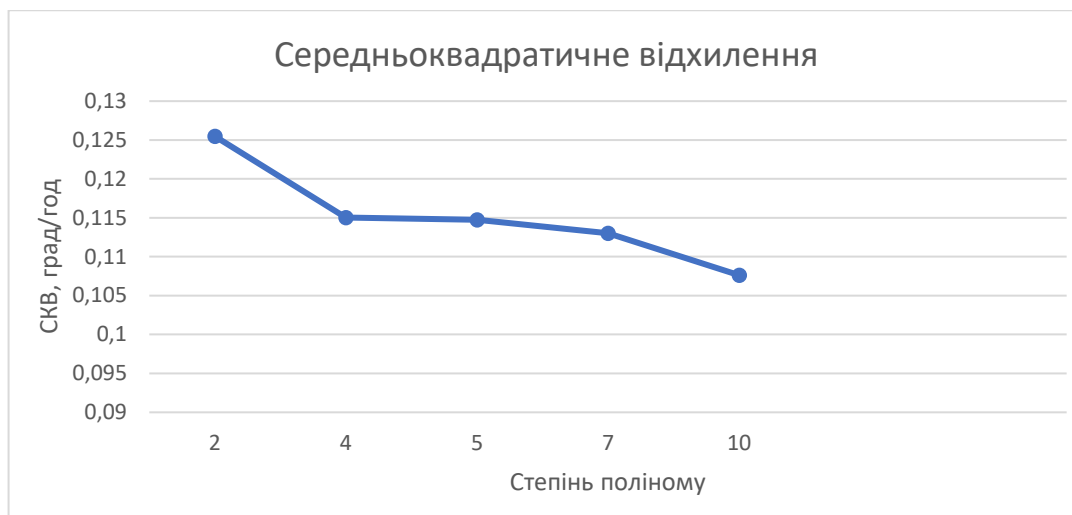


Рис. 3.27 – Графік залежності середньоквадратичного відхилення від степені апроксимуючого поліному



Рис. 3.28 – Графік залежності максимального відхилення від степені апроксимуючого поліному



Рис. 3.29 – Графік залежності середнього значення від степені апроксимуючого поліному

По даним отриманим в ході експериментальної перевірки методів алгоритмічної компенсації можна зробити висновок, що зі збільшенням степеня апроксимуючого поліному середньоквадратичне відхилення зменшується, в той час як найменше максимальне відхилення вдається досягти поліномом всього 4 степеня, а подальше його збільшення призводить тільки до росту цієї похибки. Слід зауважити, що збільшення порядку поліному веде до підвищення складності розрахунків, та в свою чергу швидкодії алгоритму, та може призвести до осциляції поліноміальної функції, що призведе до ще більших похибок.

На основі цього можна сказати, що по результатам дослідження залежності степеня апроксимуючого поліному від похибок вихідного сигналу, найкращим рішенням буде використання поліноміальної функції 4-го степеня.

Це дозволяє зменшити середньоквадратичну похибку до 0,11504 град/год (на 90%), максимальне відхилення до 0,41432 град/год (на 86%), та середнє значення до $-1.5959e-16$ град/год, що на 15 порядків менше початкового значення.

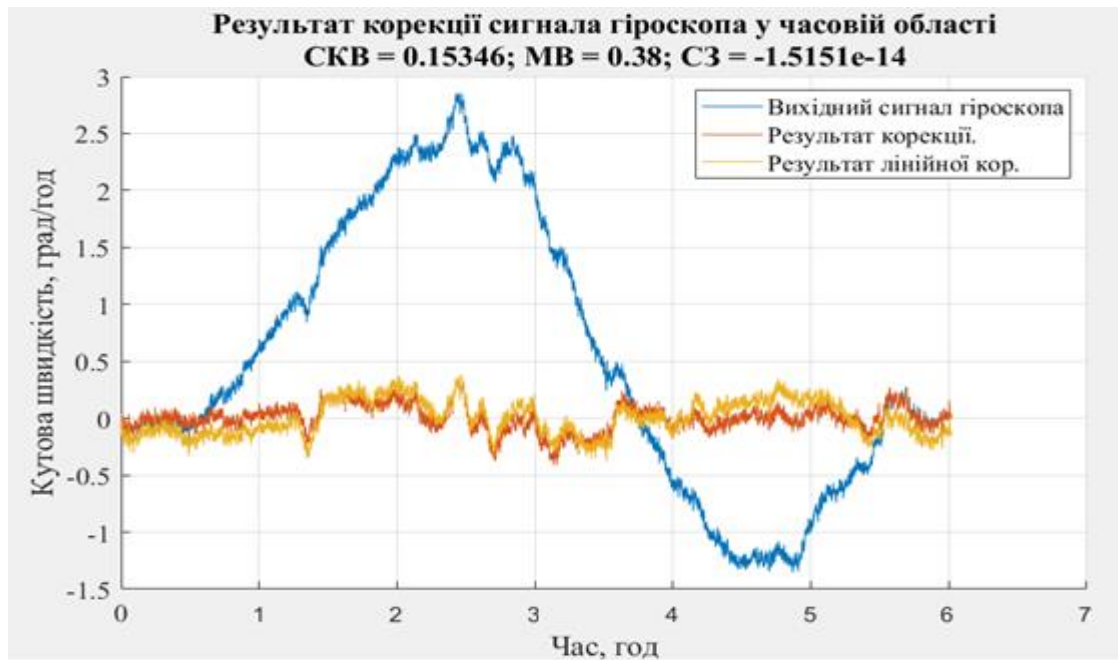
Порівнюючи з методом компенсації заснованим що використовує лінійну модель для апроксимації величину середньоквадратичної похибки вдалося зменшити на 26%, величину максимальної похибки на 4%, а середнє значення вихідного сигналу вдалося зменшити, ще на порядок.

Як і в випадку з лінійною апроксимацією, використовуючи поліноміальну модель не вдалося повністю позбутися від гістерезису температурної залежності.

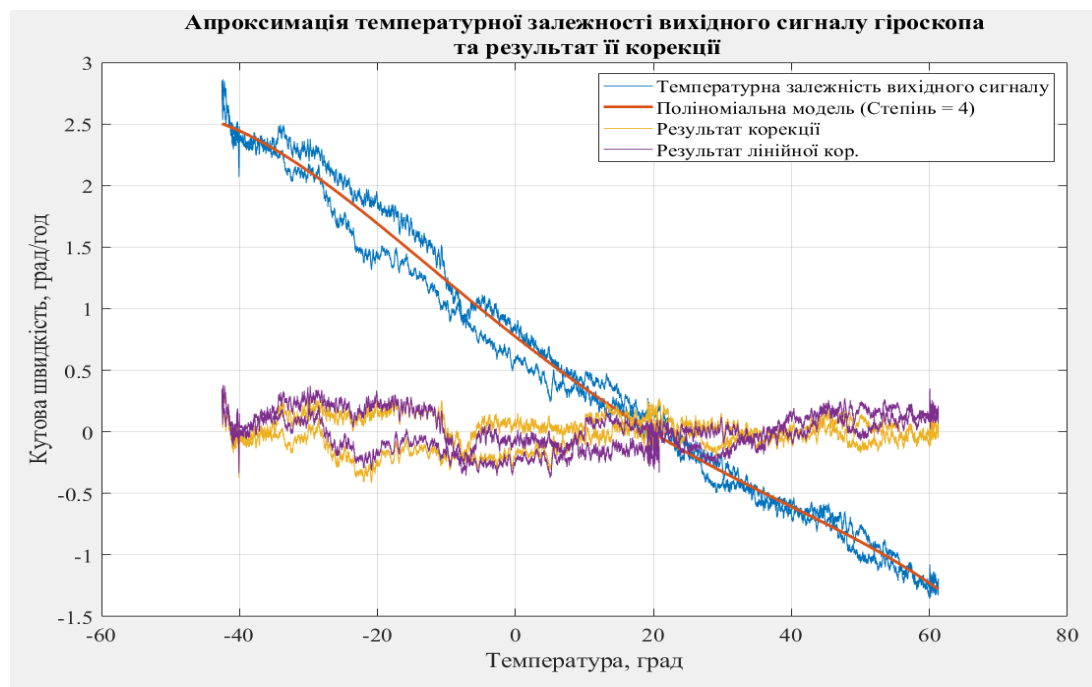
3.1.5 Компенсація дрейфів гіроскопа з використанням лінійної багатопараметричної регресійної моделі

Корекція вихідного сигналу ММГ за допомогою лінійної регресійної багатопараметричної моделі вихідного сигналу проводилася на основі даних

про поточну температуру, потужність білого шуму, та даних моделі дрейфу гіроскопа. Отримані результати корекції та їх порівняння з результатами отриманими за допомогою поліноміальної апроксимації ілюструють графіки (рис. 3.30).



а)



б)

Рис. 3.30 – а) Результат компенсації вихідного сигналу гіроскопа в часовій області б) Апроксимація та компенсація температурної залежності гіроскопа

За отриманими результатами можна зробити висновок, що використання лінійної багатопараметричної моделі для апроксимації вихідних даних ММГ з ціллю подальшої компенсації температурних дрейфів дає результати схожі з використанням, для тих самих цілей, поліноміальних моделей малих степенів.

Хоча варто зазначити, що використовуючи лінійну регресійну модель вдалося зменшити величину максимального відхилення до 0,38 град/год (на 87%). Це найменше значення порівнюючи з результатами попередніх досліджень (на 7.3% краще за результат отриманий з допомогою поліному та на 11% порівняно з апроксимацією лінійною моделлю).

В теорії застосування більш складної комп'ютерної моделі гіроскопа з більшою кількістю модельованих вихідних даних, та подальше їх використання для корекції вихідного сигналу може дати кращі результати корекції.

3.2 Дослідження методів компенсації температурних дрейфів ХТГ

3.2.1 Постановка досліду

Представлені в роботі методи, також підлягали тестуванню на хвильових твердотільних гіроскопах моделі ТВГ-25М виробництва АТ «Елміз» [85] (рис. 3.23)



Рис. 3.23 – Зовнішній вигляд ТВГ-25М

Отримання тестових даних було виконано проведенням процедури температурного калібрування та відбувалася наступним чином:

Спочатку було підготовано та зібрано робоче місце для зйому даних з ТВГ, що знаходився в кліматичній камері (рис. 3.24):

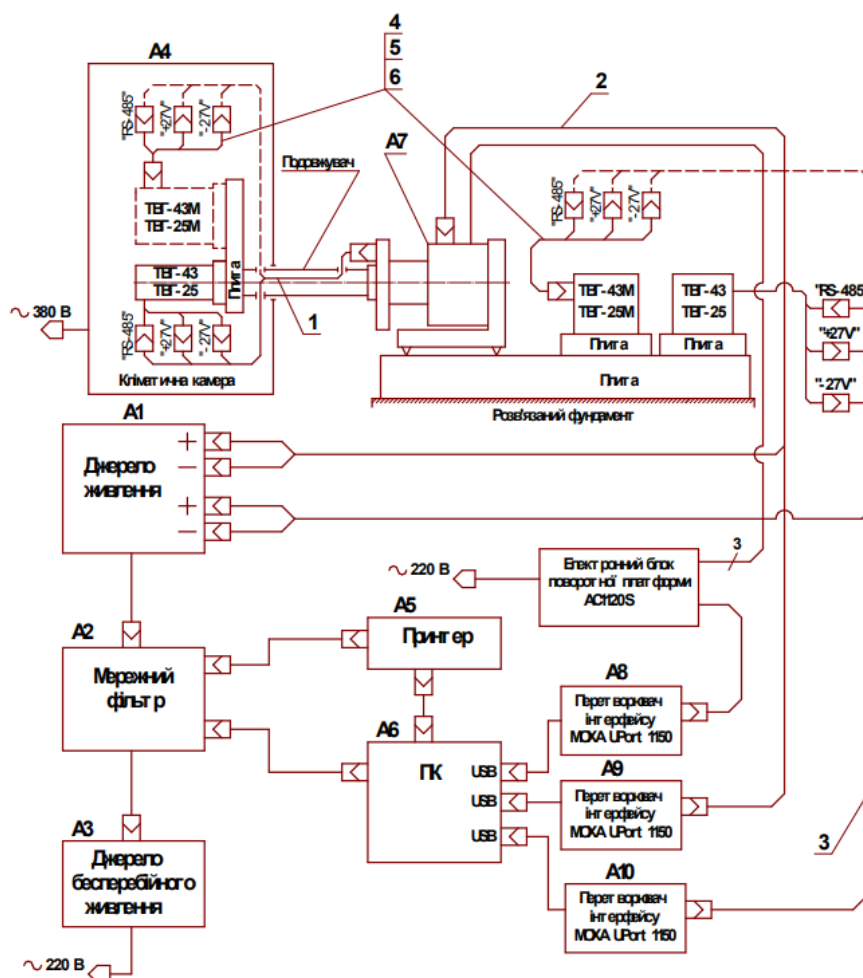


Рис. 3.24 – Схема робочого місця для зйому даних ТВГ

Спершу зйом даних проводився по циклограмі в якій температура якийсь час тримається на рівні нормальної (20°C), після чого з заданим рівнем спадання температури опускається до -40°C , залишається такою певний час після чого підіймається до відмітки 60°C , та через деякий час повертається до рівня нормальної.

Детально цей процес показаний на рисунку нижче (рис. 3.25):

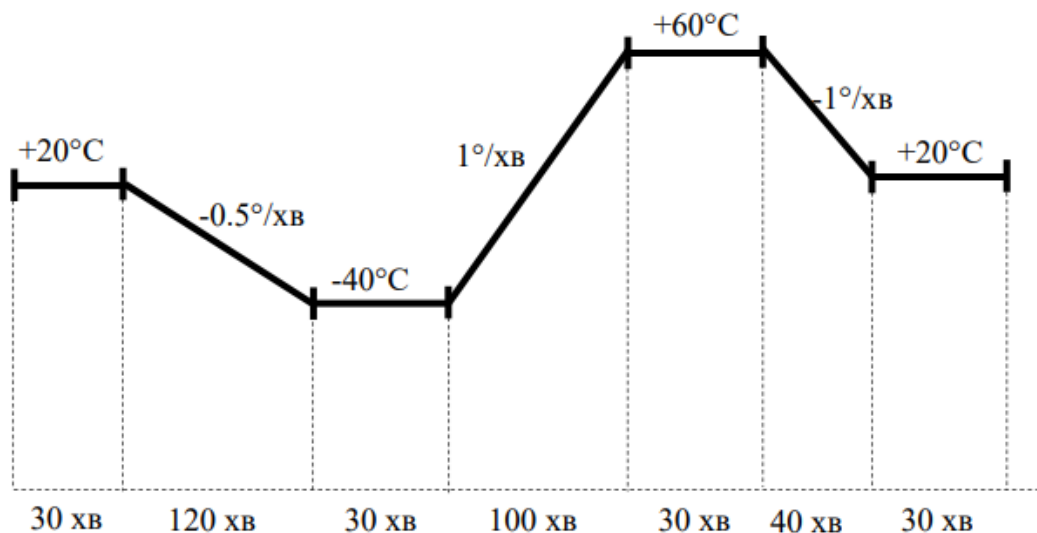


Рис. 3.25 – Циклограма роботи кліматичної камери «termo1» для регулювання параметрів температурної компенсації ТВГ

Після закінчення роботи кліматичної камери згідно циклограми процес накопичення даних зупинявся, а ТВГ відмикався від джерела живлення. В такому стані ТВГ мав бути витриманий не менше однієї години до проведення другого етапу досліджень.

На другому етапі кліматична камера була налаштована на роботу по наступній циклограмі (рис 3.26):

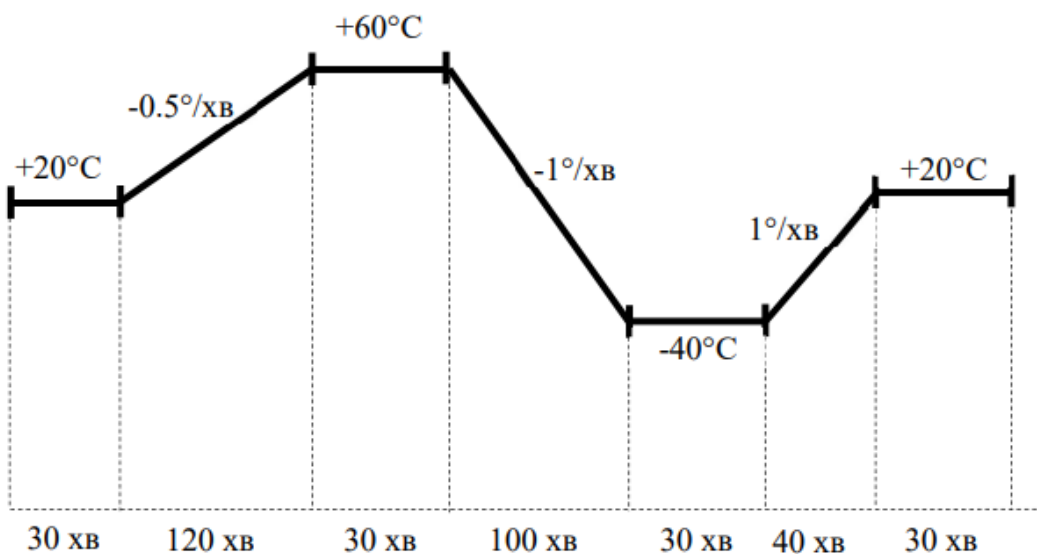


Рис. 3.26 – Циклограма роботи кліматичної камери «termo2» для регулювання параметрів температурної компенсації ТВГ

Як видно цього разу процес нагрівання передував процесу охолодження, а крайні значення температури залишалися такими ж як і в попередній циклограмі.

Дані які було отримано після закінчення процесу температурного калібрування оформлялися в файл формату .txt та мали наступний вигляд (рис. 3.27):

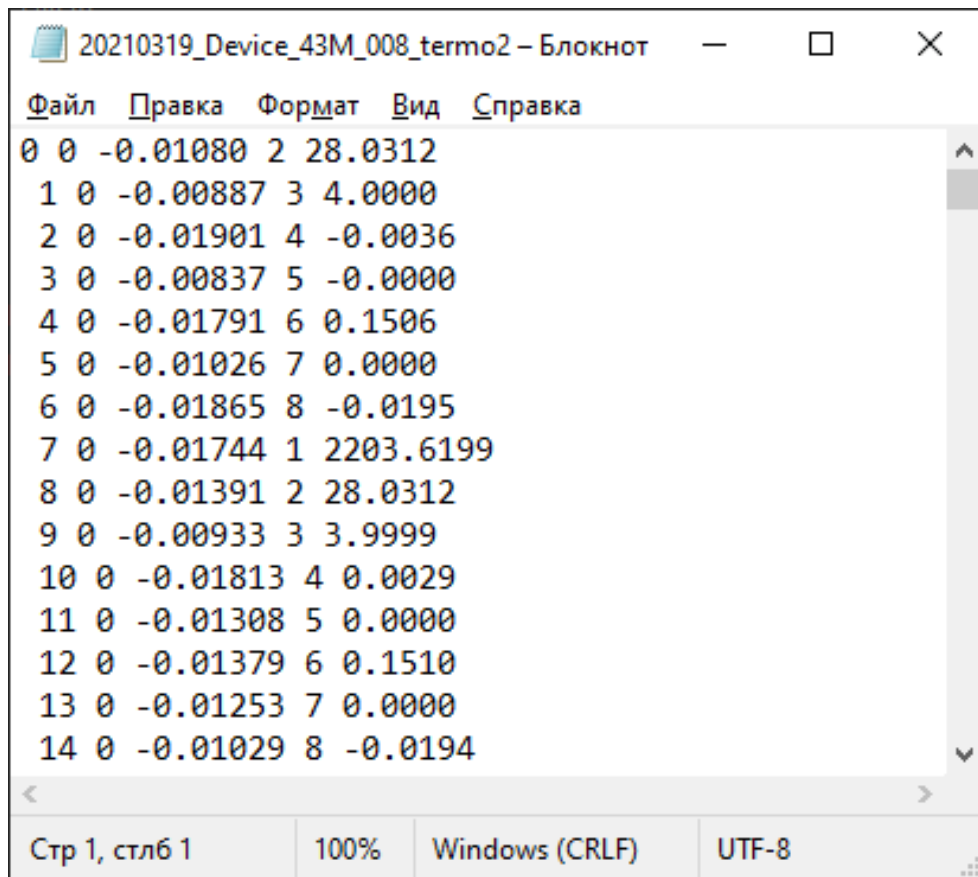


Рис. 3.27 – Наповнення файлу з даними отриманими в процесі температурного калібрування

Дані з цього файлу слід розшифровувати наступним чином: Перший стовбець відповідає номеру посилки даних. В нашому випадку дані знімалися з частотою в 1 Гц. В третій стовбець записується значення кутової швидкості. Четвертий стовбець містить номери телеметрії. Кожному номеру відповідають свої данні. В останній стовбець відповідно записуються значення телеметрії.

3.2.2 – Розробка програмно-математичного апарату та обробка експериментальних даних

Для обробки даних отриманих після процедури температурного калібрування та представлення результатів у графічному вигляді було створено скрипт Matlab *TempCalibr.m*.

Якщо говорити коротко, то програма приймаючи на дані калібрування спершу виконує їх первинну обробку. А конкретніше виділяє дані телеметрії до окремих векторів (Fres, Temp, Ampl, Phase, Quad, A_PID_Out, Ph_PID_Out, Q_PID_Out), які відповідають значенням реальних характеристик ДКШ (відповідно: резонансна частота, сигнал термодатчика, амплітуда, фаза, квадратура, сигнал управління амплітудою збуджень, сигнал управління фазою, сигнал управління квадратурою). Після цього вектори приводяться до одного розміру з вектором в якому знаходяться дані про вимірюну кутову швидкість (GyroOut), та проводиться обробка цих даних.

Результати роботи програми приведено на графіках (рис. 3.28 – 3.??). Під час проведення досліджень було прийнято рішення обмежитися методами температурної компенсації які використовують поліноміальну та лінійну багатопараметричну модель для апроксимації даних.

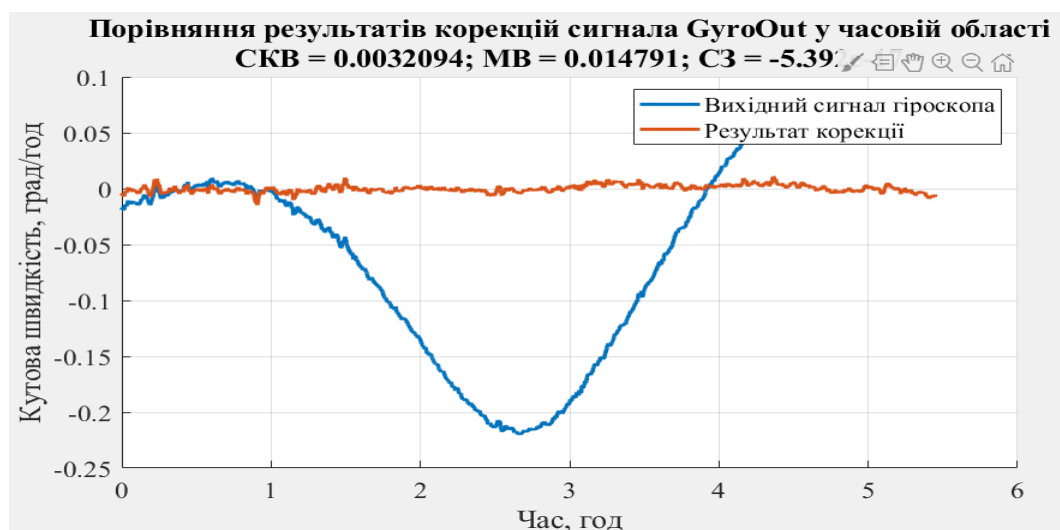


Рис. 3.31 - Результат компенсації вихідного сигналу по характеристиці GyroOut/Fres, використовуючи поліном 3-го степеня, в часовій області.

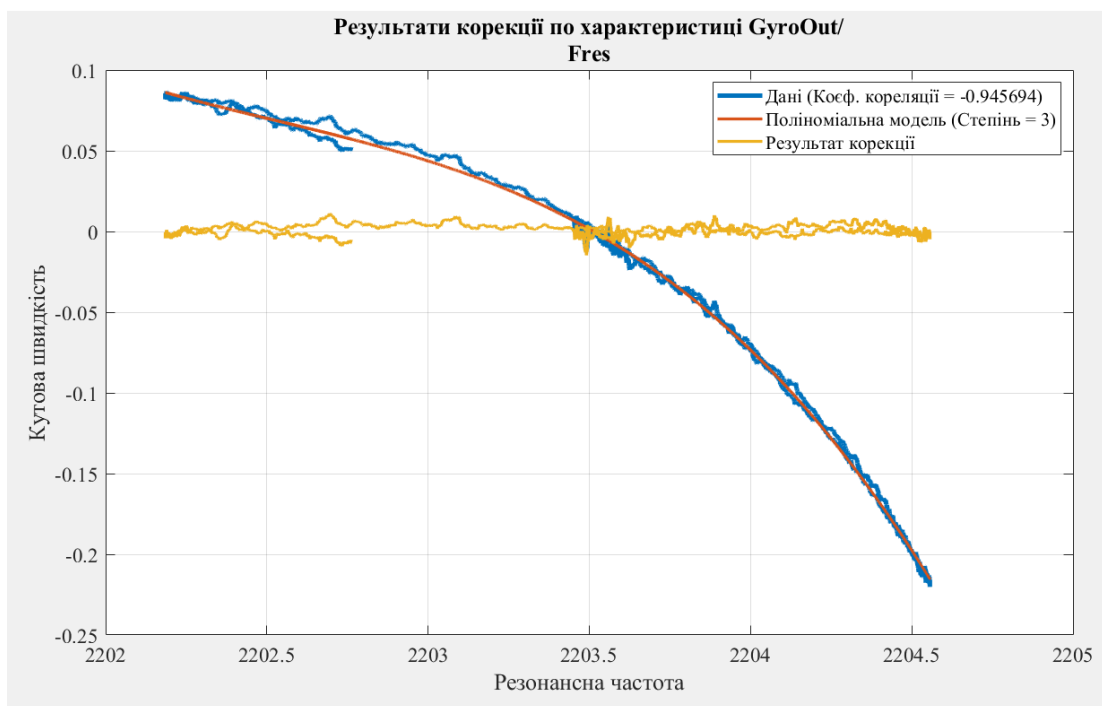


Рис. 3.32 – Результат корекції по характеристиці GyroOut/Fres на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt

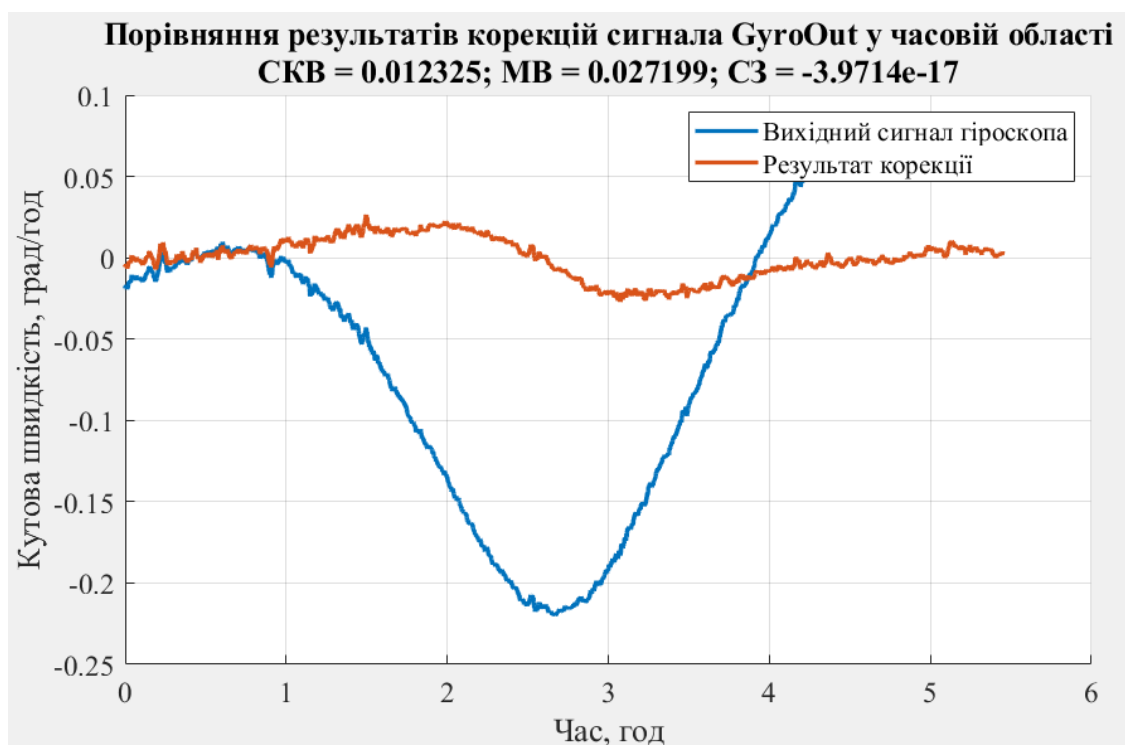


Рис. 3.32 - Результат компенсації вихідного сигналу по характеристиці GyroOut/Temp, використовуючи поліном 3-го степеня, в часовій області.

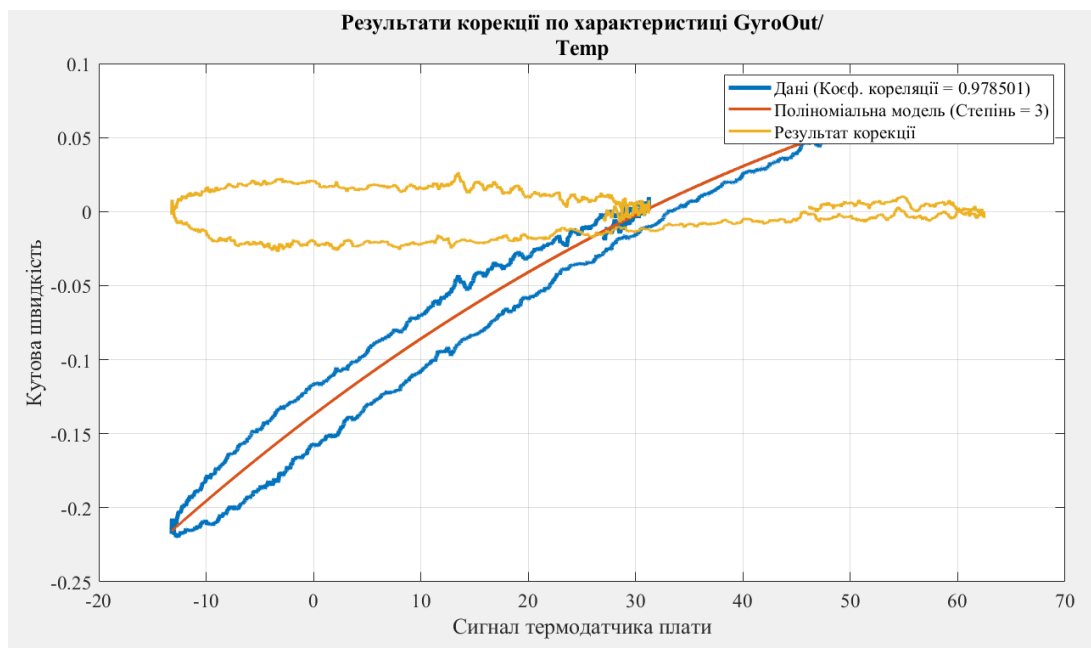


Рис. 3.33 – Результат корекції по характеристиці GyroOut/Temp на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt

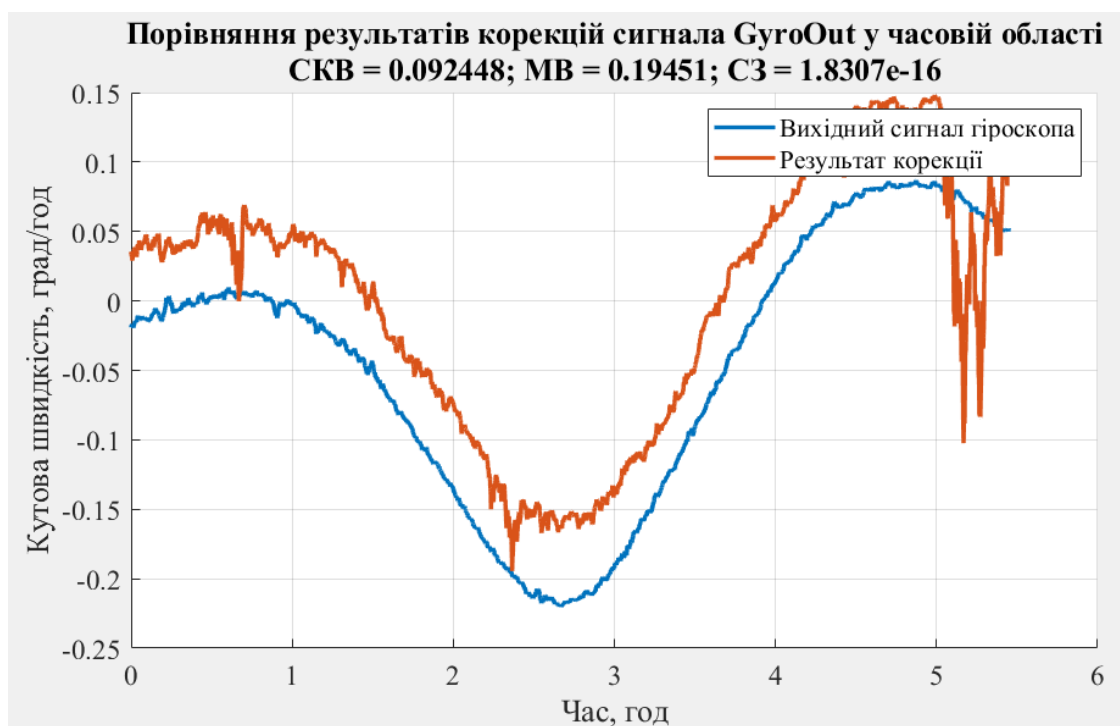
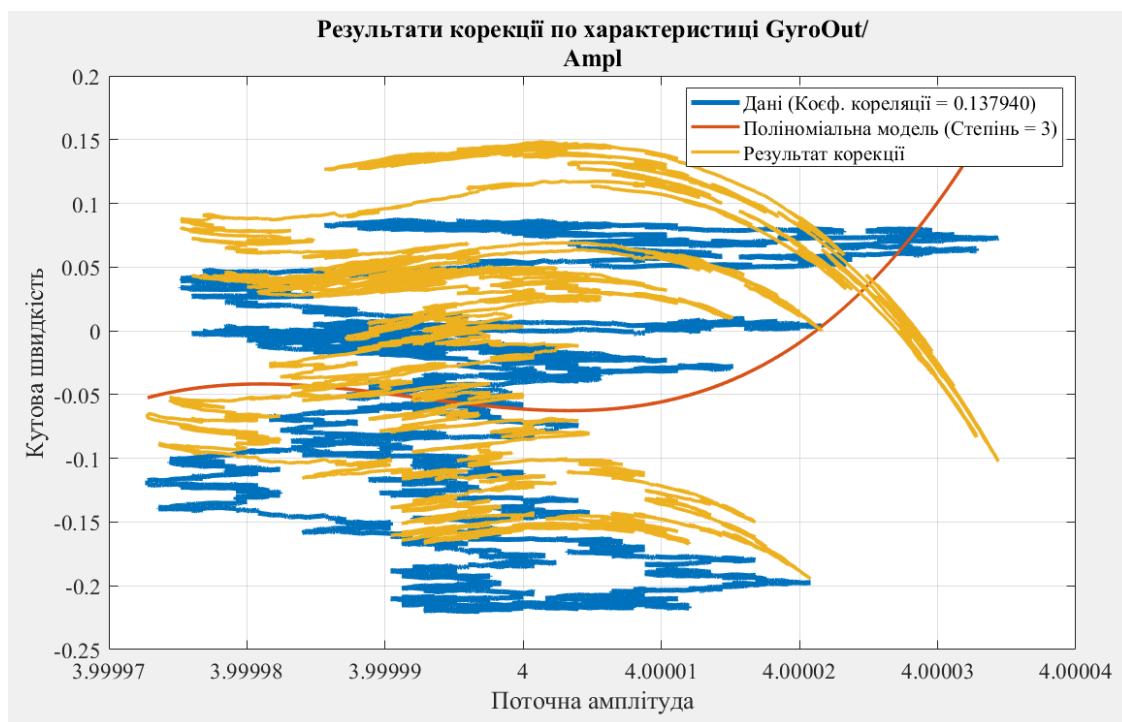


Рис. 3.34 - Результат компенсації вихідного сигналу по характеристиці GyroOut/Ampl, використовуючи поліном 3-го степеня, в часовій області.



б)

Рис. 3.35 – Результат корекції по характеристиці GyroOut/Ampl на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt

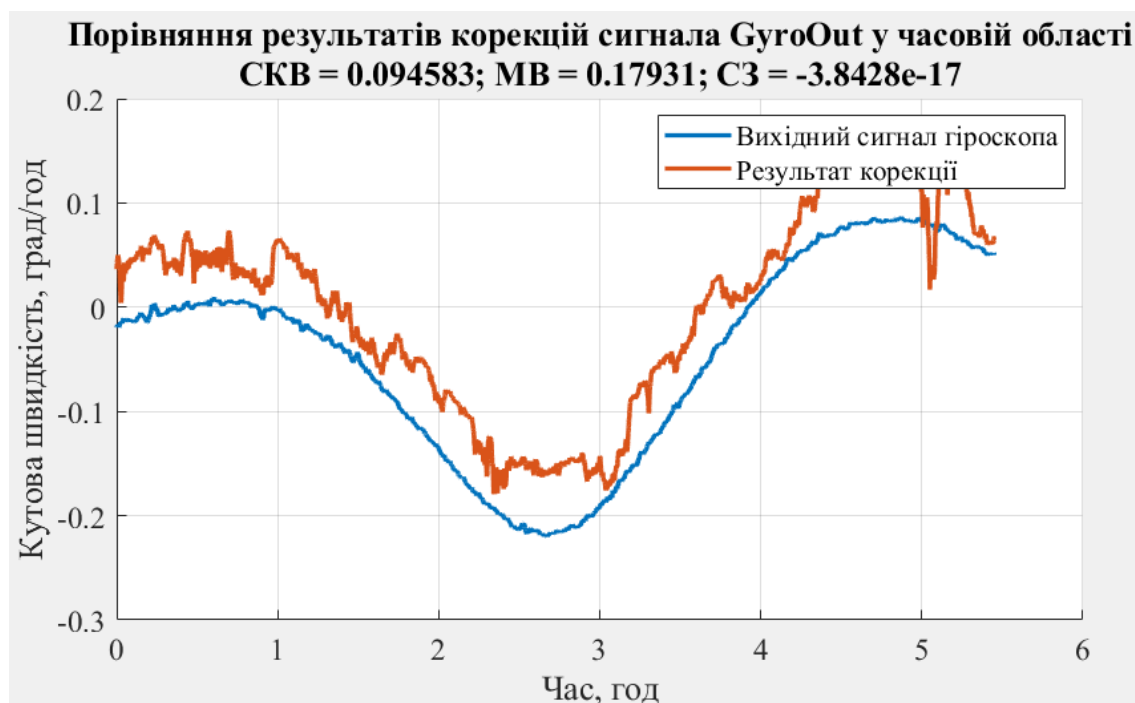


Рис. 3.36 - Результат компенсації вихідного сигналу по характеристиці GyroOut/Phase, використовуючи поліном 3-го степеня, в часовій області.

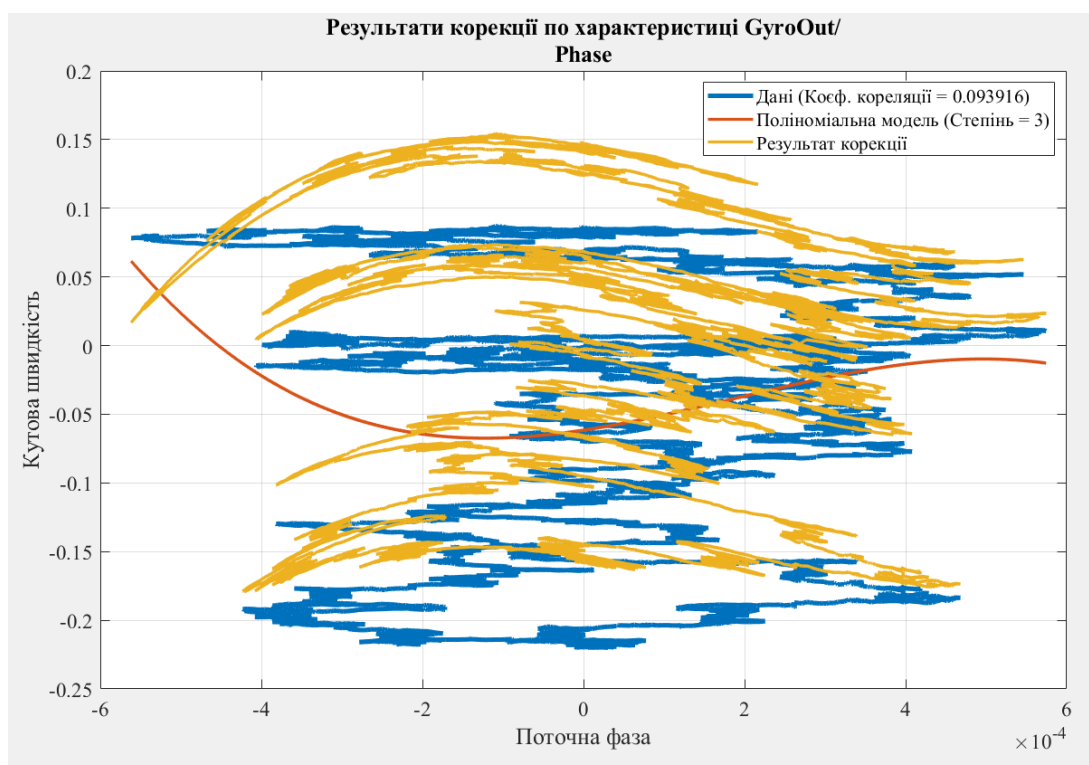


Рис. 3.37 –Результат корекції по характеристиці GyroOut/Phase на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt

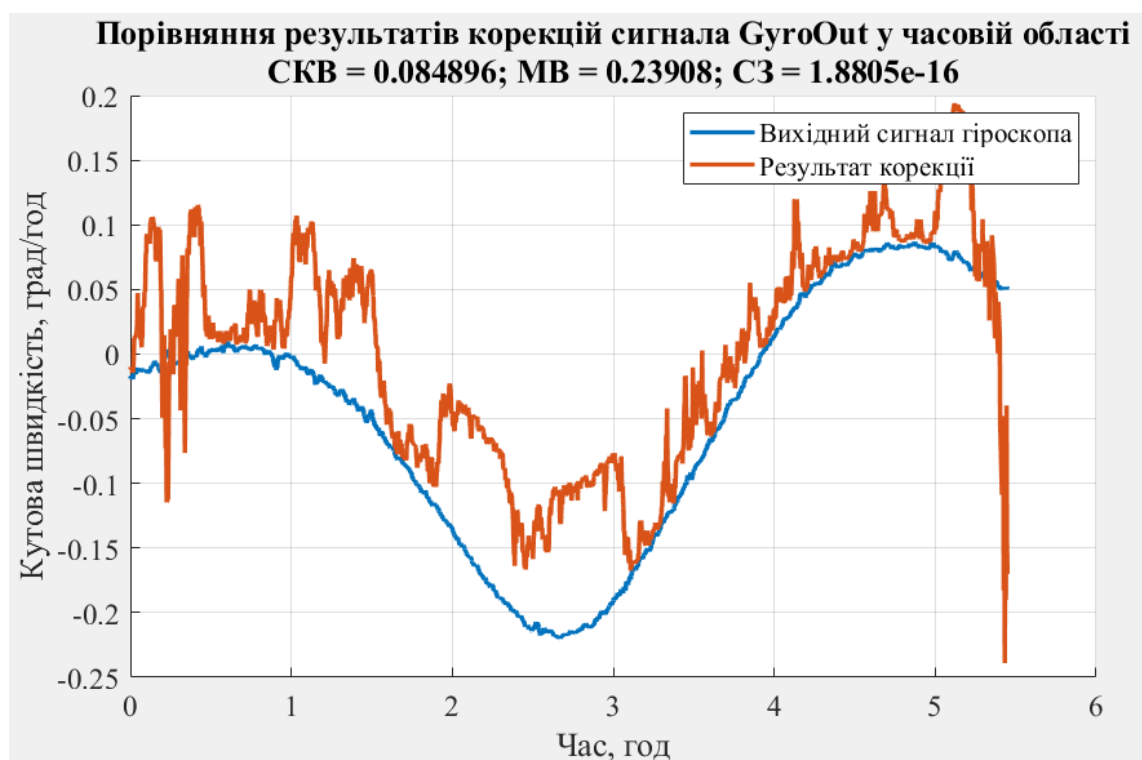


Рис. 3.38 - Результат компенсації вихідного сигналу по характеристиці GyroOut/Quad, використовуючи поліном 3-го степеня, в часовій області.

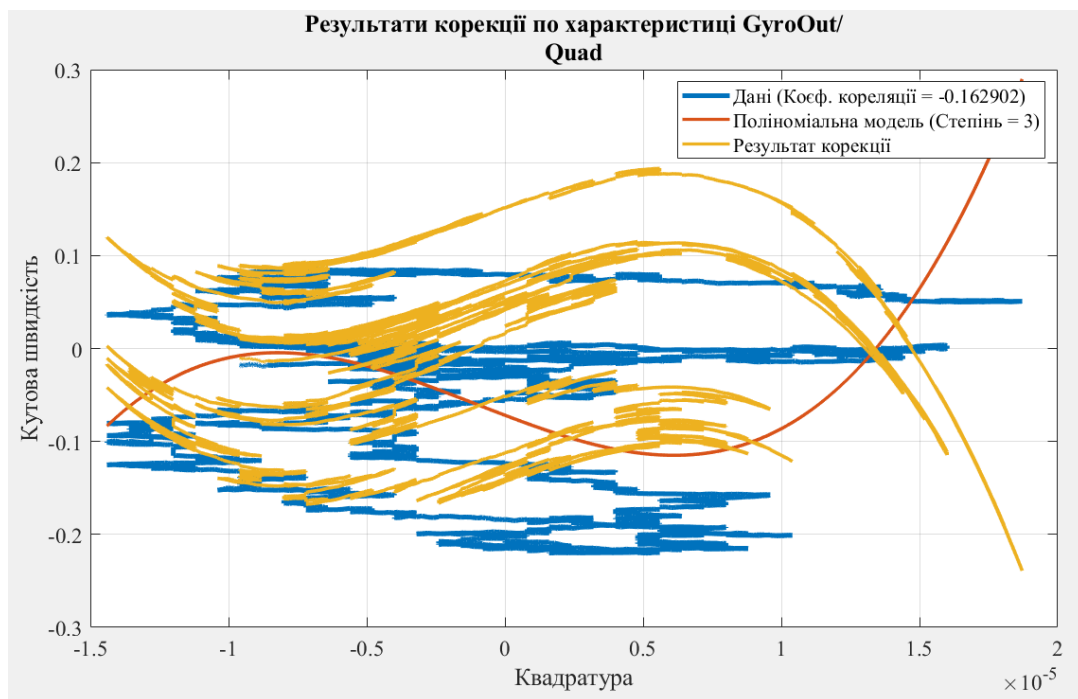


Рис. 3.39 – Результат корекції по характеристиці GyroOut/Quad на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt



Рис. 3.40 - Результат компенсації вихідного сигналу по характеристиці GyroOut/A_PID_Out, використовуючи поліном 3-го степеня, в часовій області.

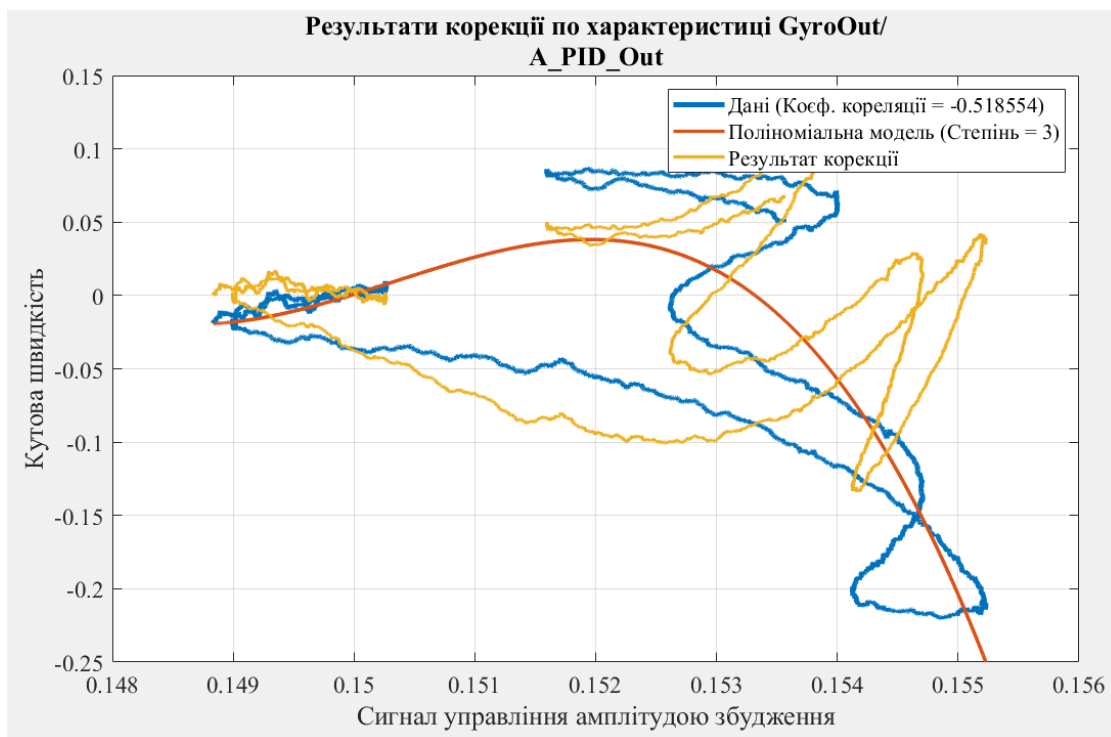


Рис. 3.41 – Результат корекції по характеристиці GyroOut/A_PID_Out на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt



Рис. 3.42 - Результат компенсації вихідного сигналу по характеристиці GyroOut/Q_PID_Out, використовуючи поліном 3-го степеня, в часовій області.

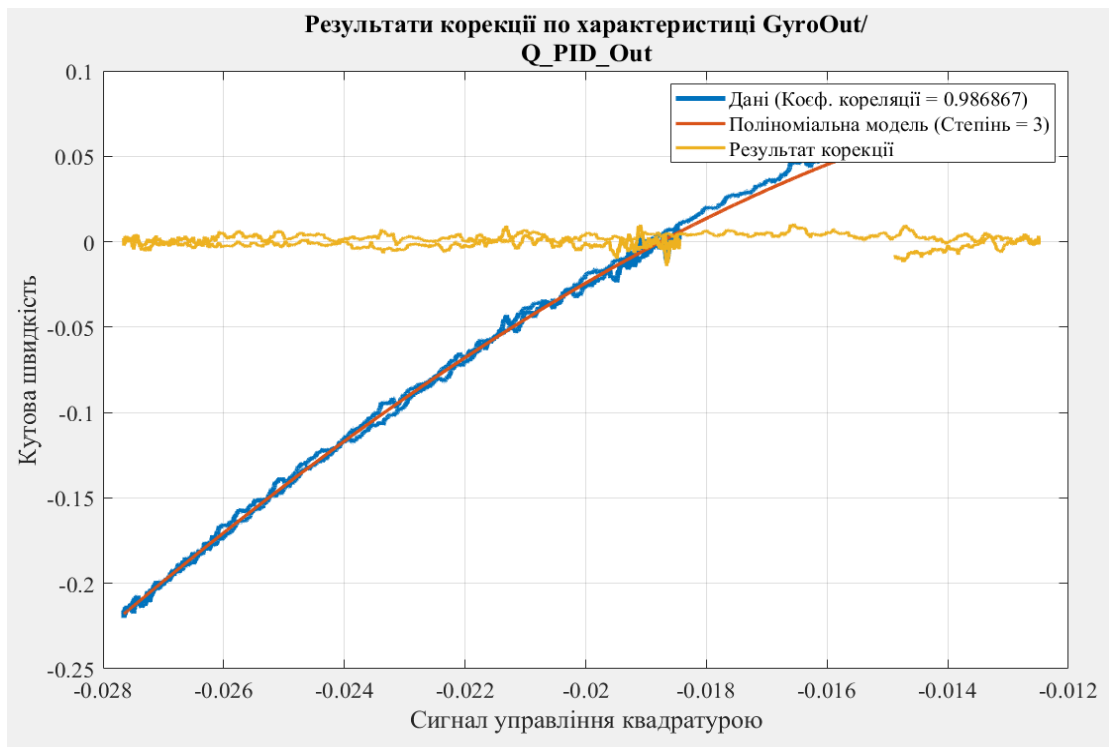


Рис. 3.43 – Результат корекції по характеристиці GyroOut/Q_PID_Out на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt

З графіків отриманих після закінчення роботи програми стає зрозуміло, що найбільша кореляція між даними телеметрії та виміряною кутовою швидкістю спостерігається в випадку побудови її характеристики від даних резонансної частоти, температури та сигналу управління квадратурою. В інших випадках кореляції даних не спостерігається. З цього можна зробити висновок, що застосування поліноміальної апроксимації для обробки даних з ціллю їх подальшої корекції має сенс лише для даних з високим коефіцієнтом кореляції.

В зв'язку з цим прийнято рішення, подальші дослідження проводити на основі цих даних.

Далі було проведено, ще декілька тестових пусків програми для визначення оптимального степеня поліному апроксимуючої функції. Результати дослідження було оформлено в таблицю (табл. 3.3):

Табл. 3.3 – Порівняння результатів калібрування

№ п/п	Степінь поліному	СКВ	МВ	СЗ
1	Нескомпенсовані дані	0.09654	0.22019	-0.04596
2	3	0.0032	0.01479	-5.392e-17
3	4	0.0030152	0.013803	1.2458e-17
4	5	0.0029674	0.013889	-2.5035e-17
5	6	0.0029606	0.014033	-1.074e-17
6	7	0.0028909	0.014057	-2.7867e-17
7	10	0.00027401	0.013266	5.102e-16

Варто зазначити, що в кожному випадку найкращих результатів корекції вдалося досягти апроксимуючи залежність вихідного сигналу від власної частоти гіроскопа. Тому саме ці дані було занесено в таблицю.

По даним таблиці можна зробити наступні висновки. Найкращий результат температурного калібрування вдається досягти використовуючи поліном 5-го степеня. Подібні результати по СКВ та МВ також можна отримати застосувавши поліном 10-го степеня але це є небажаним оскільки поліном такого степеня потребує великої кількості обчислень, що буде сильно навантажувати процесор.

В загальному величину середньоквадратичної похибки вдалося зменшити до 0,0029674 град/год (на 96%), величину максимального відхилення до 0,013889 град/год (на 93%), а середнє значення до -2,503e-17 град/год, що на 15 порядків менше початкового значення.

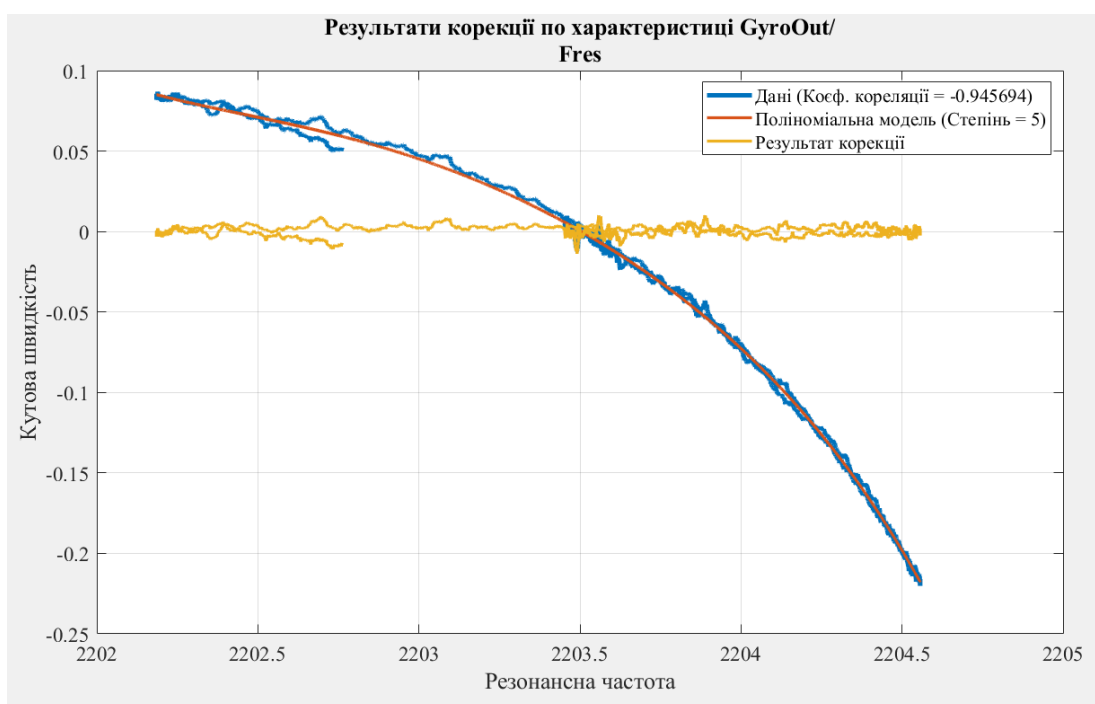
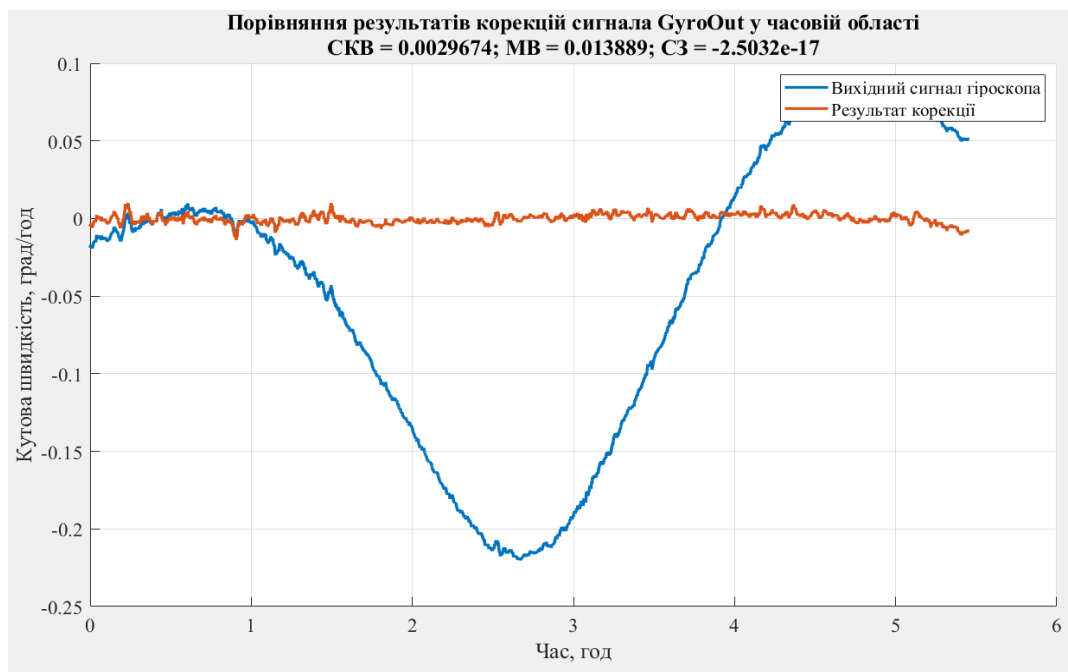
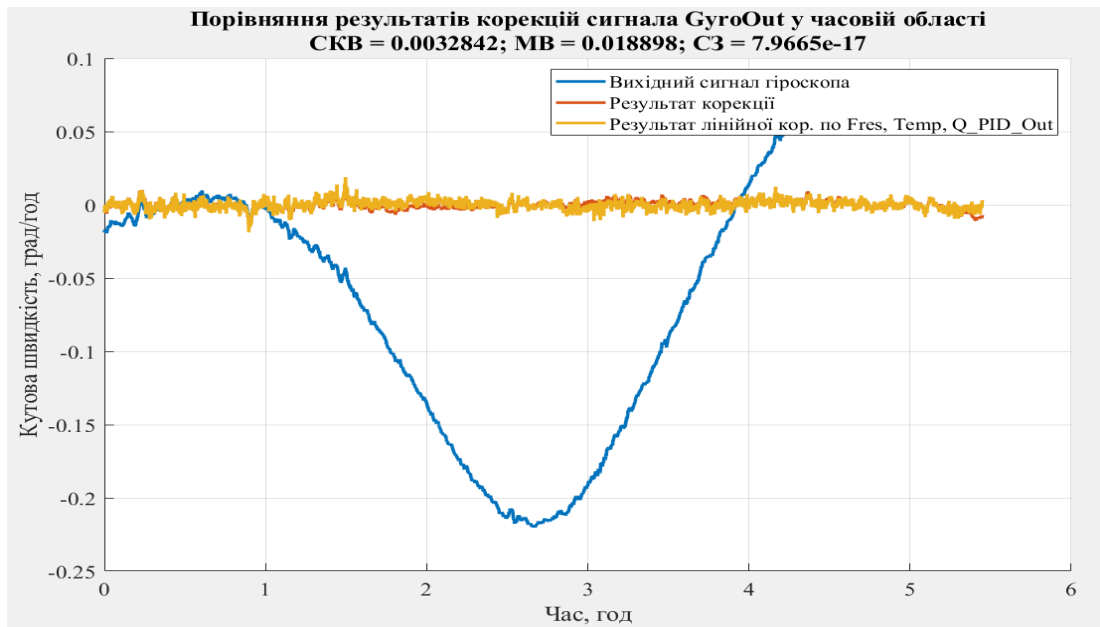


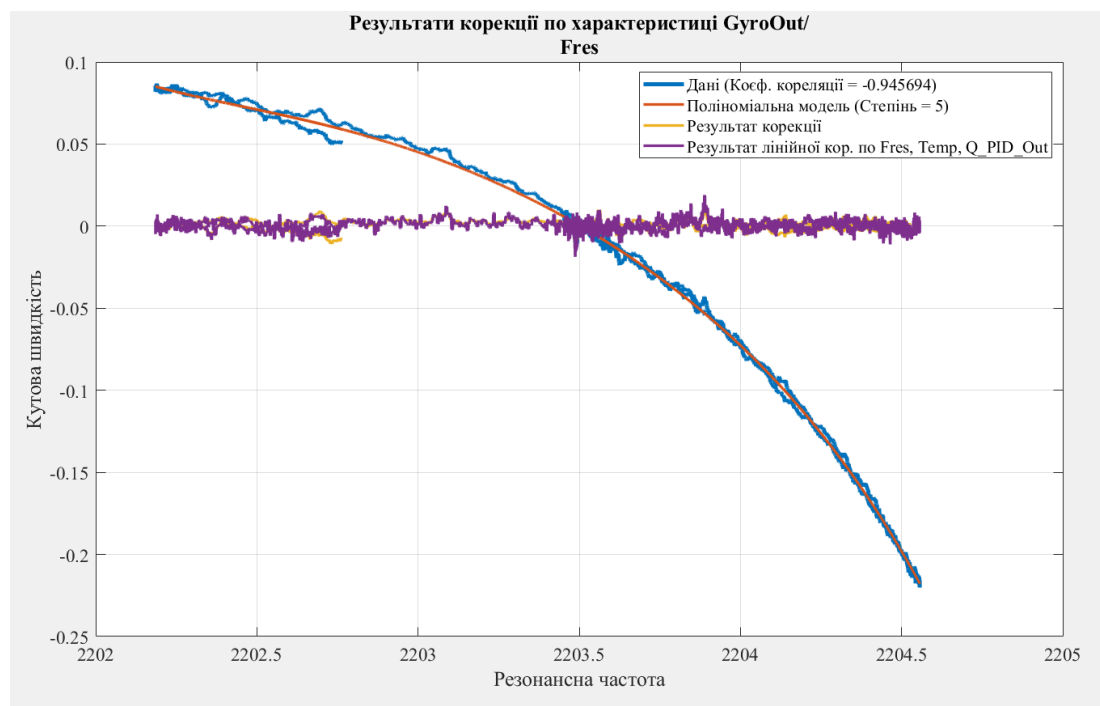
Рис. 3.44 – а) Результат компенсації вихідного сигналу гіроскопа в часовій області б) Результат корекції по характеристиці GyroOut/Fres, що ілюструють найкращі отримані результати корекції за поліномом

Далі було проведено дослідження роботи алгоритму компенсації на основі апроксимації даних лінійною багатопараметричною моделлю.

Корекцію було проведено по тим векторам які показали найбільші результати кореляції в попередніх дослідженнях, та порівняно з результатом корекції отриманим з застосуванням поліноміальної моделі 5-го степеня.

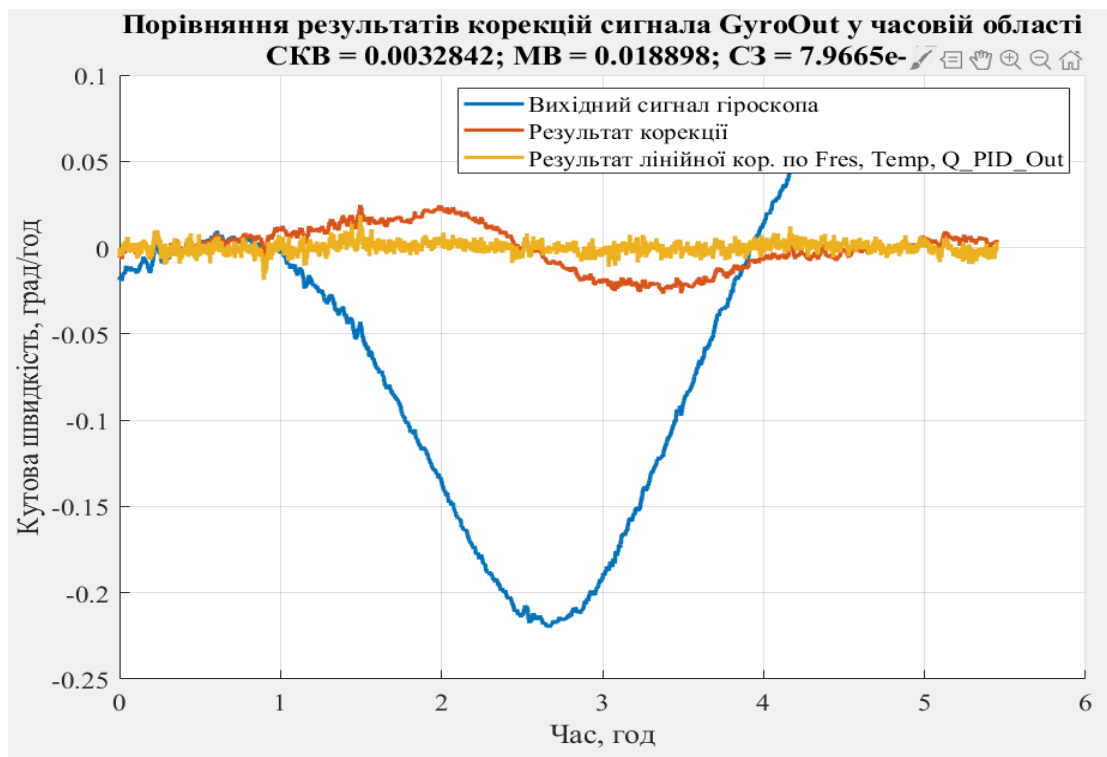


а)

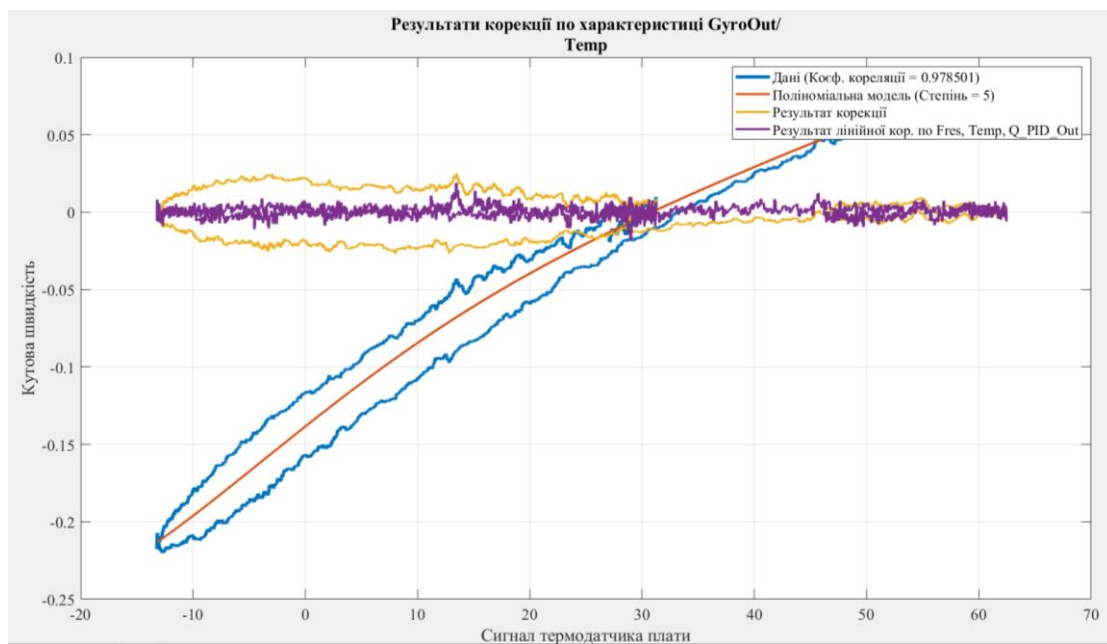


б)

Рис. 3.45 – а) Результат компенсації вихідного сигналу гіроскопа в часовій області б) Результат корекції по характеристиці GyroOut/Fres на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt

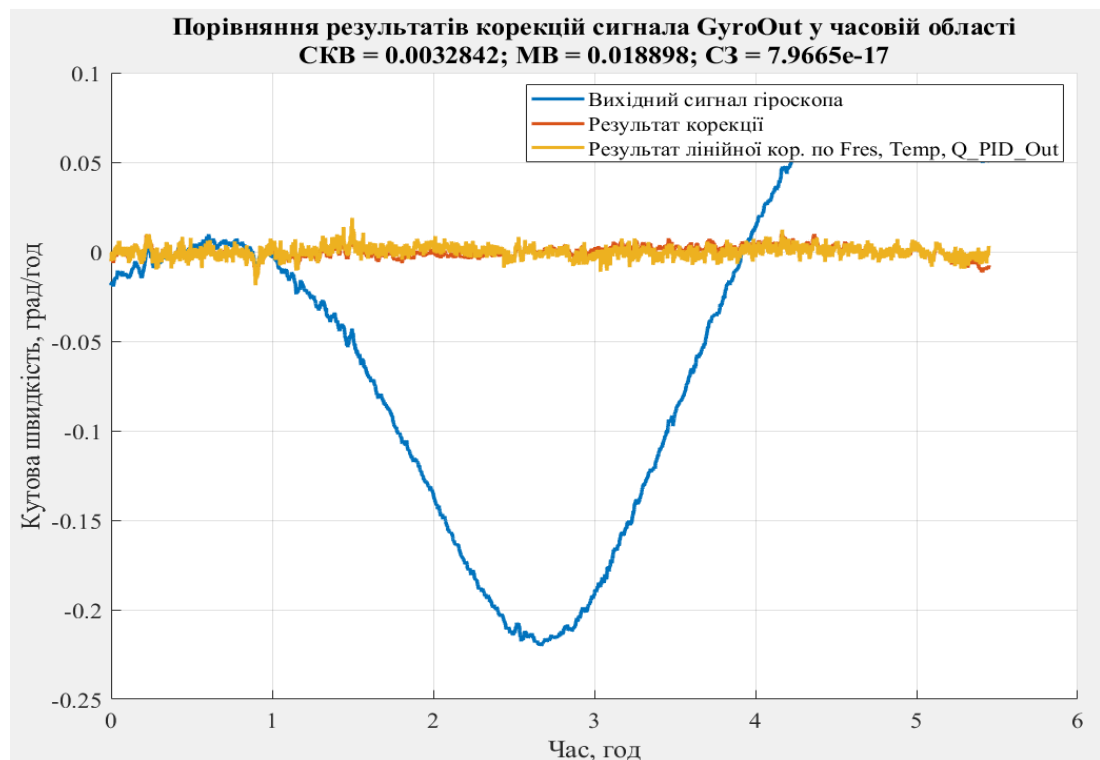


а)

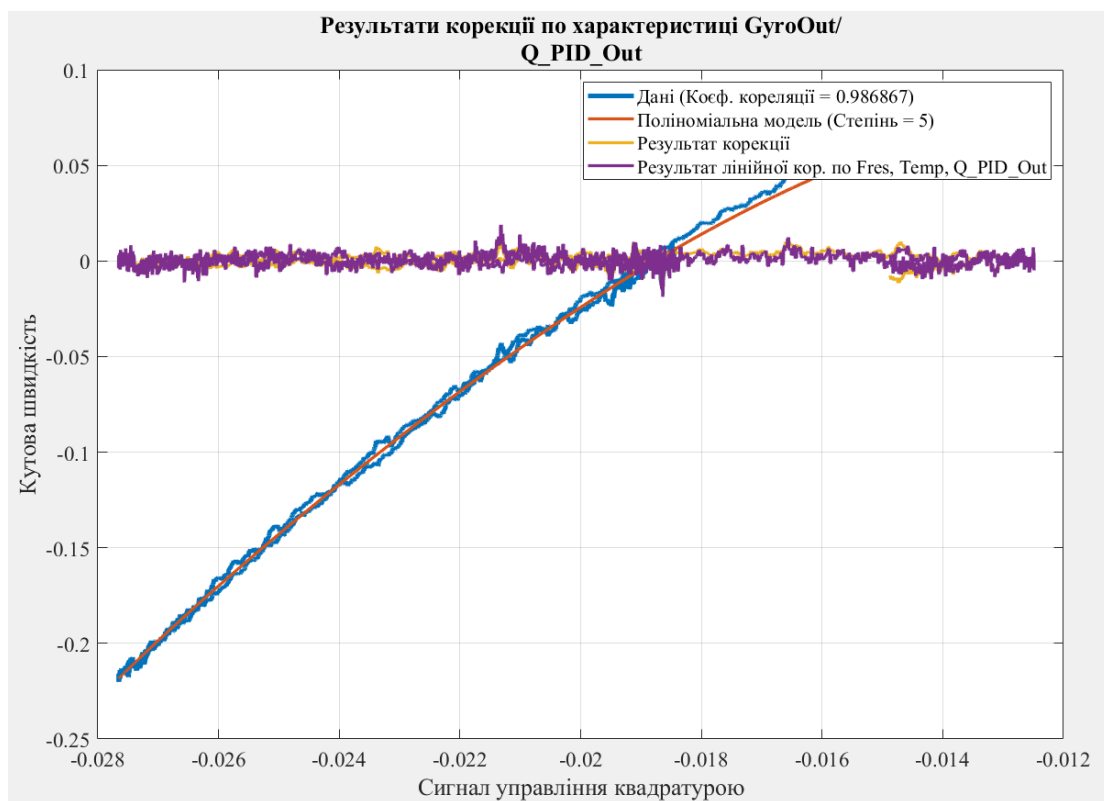


б)

Рис. 3.46 – а) Результат компенсації вихідного сигналу гіроскопа в часовій області б) Результат корекції по характеристиці GyroOut/Temp на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt



а)



б)

Рис. 3.47 – а) Результат компенсації вихідного сигналу гіроскопа в часовій області б) Результат корекції по характеристиці GyroOut/Q_PID_Out на основі даних файлу 20210319_Device_43M_008_termo1.txt

По отриманим даним можна зробити висновок, що застосування лінійної регресійної багатопараметричної моделі дає схожі результати похибок з результатами отриманими в процесі апроксимації даних поліномом 3-го степеня.

Однак очевидним плюсом даного методу є те, що завдяки йому вдалося майже повністю позбутися гістерезису в температурній залежності кутової швидкості гіроскопа.

Висновки до розділу 3

В ході проведення досліджень ефективності алгоритмів компенсації температурних дрейфів гіроскопів, з ціллю їх подальшого покращення, було зроблено наступні висновки

Використання лінійної моделі для апроксимації вихідних сигналів ДКШ з ціллю їх подальшої компенсації дало найгірші результати серед усіх випробовуваних методів. Причиною тому є нелінійний характер вихідних даних гіроскопа. Тому слід вважати недоцільним використання лінійної моделі вихідних сигналів ДКШ для методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів.

Використання поліноміальної моделі, змогло дати набагато вищі показники точності скомпенсованого сигналу. В ході проведення досліджень було визначено, що найкраще для апроксимації вихідних сигналів ДКШ підходять поліноми 4 – 5 ступенів. Використання апроксимуючих функції дає найкращі результати калібрування вихідних сигналів, та не вимагають великої кількості обчислень порівняно з поліномами старших степенів, що є очевидним плюсом.

В ході проведення тестів роботи алгоритмів на хвильових датчиках кутової швидкості, було виявлено, що найбільша кореляція між даними досягається у випадку побудови залежності між даними про вимірювану кутову швидкість та значення поточної частоти гіроскопа, температури, та сигналу

управління квадратурою. Також в ході досліджень було підтверджено, що використовуючи ці дані для компенсації температурних дрейфів, можна досягти найменших похибок скомпенсованого сигналу ХТГ. Найкращі результати корекції з використанням поліноміальної апроксимації досягалися в випадку апроксимації залежності виміряної кутової швидкості від власної частоти гіроскопу.

Крім того цей висновок дозволив побудувати лінійну регресійну модель на основі цих даних. Використання такої моделі дало результати схожі з використанням апроксимуючих функцій малих степенів. Але в той же час застосовуючи регресійну модель вдалося майже повністю позбутися гістерезису температурної залежності вихідного сигналу датчика.

В загальному випадку розглянуті методи дозволяють досягти значного зменшення похибок компенсації температурних сигналів.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «КОМПЕНСАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДРЕЙФІВ ГІРОСКОПІВ»

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

Ідея проекту полягає в розробці та впровадженню алгоритму компенсації температурного дрейфу гіроскопів задля покращення їх характеристик точності. Було проведено аналіз та виділено основні напрямки застосування даної розробки, а також оцінено її користь для потенційних користувачів, за різними напрямками застосування, що уточнено наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Користь для користувача
Алгоритм компенсації температурних дрейфів гіроскопів	Авіація	Покращення точності навігаційного та стабілізаційного обладнання літака
	Суднобудування	Покращення точності навігаційного та стабілізаційного обладнання судна
	Пристрої навігації та орієнтації	Збільшення точності вимірювання вхідних величин необхідних для визначення поточних координат, та втримання напрямку руху
	Робототехніка	Покращення систем орієнтації роботів
	Військова промисловість	Покращення точності систем ведення вогню та ракетної зброї
	Автомобілебудування	Покращення систем навігації та активних систем безпеки
	Побутова техніка	Покращення стабілізації фото та відео обладнання. Покращення систем орієнтації VR пристроїв та роботів пілососів
	Медичні пристрої	Підвищення точності хірургічних інструментів та приладів діагностики

Висновки: Отже пропонується новий спосіб компенсації дрейфів гіроскопічних датчиків кутової швидкості. До потенційних споживачів можна віднести: авіапромисловість, суднобудування, пристрої орієнтації та навігації, медицина, автомобільна промисловість, робототехніка, побутові прилади та особливо військова промисловість.

Аналіз потенційних технічних та економічних переваг ідеї, її основні відмінності від аналогів, а також продуктів-замінників (табл. 4.2). порівняння з конкурентами має на увазі:

- визначення техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначення кола конкурентів та збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для запропонованої ідеї;
- порівняння продуктів за принципом: а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні).

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик розробки

№ п/п	Техніко-економічні Характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Всі виробники гіроскопів			
1	Вартість програмного забезпечення	450 ум.од	3500 - 4200 ум.од.	-	-	+
2	Гарантійний термін	До 5 років без калібрування	До 3 років без калібрування	-	-	+
3	Швидкодія	0.1 с	0.6-1.1 с	-	-	+
4	Точність показників (наявність похибок)	Найвища/похибки відсутні	Висока/зведені до мінімуму	-	-	+

Висновки: Було визначено, що потенційними конкурентами проекту можуть виступати всі виробники гіроскопічних датчиків кутової швидкості. Було проведено порівняння основних техніко-економічних характеристик. Як видно з таблиці 4.2, проект має значні переваги по всім розібраним показникам, що не дивно беручи до уваги, що він був створений з метою покращення пристроїв, що виготовляють компанії конкуренти. З цієї ж причини можна сказати, що потенційні конкуренти розробки водночас виступають і потенційними клієнтами.

Проведено аудит технології за допомогою якою можна реалізувати ідею створення проекту (табл. 4.3). Це передбачає аналіз наступних складових:

- Технологію за якою буде виготовлено товар;
- Наявність таких технологій;
- Доступність цих технологій.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Отримання патенту	Офіційні права на розробку ідеї, підтвердження авторства	Наявна	Доступна
2	Підвищення точності системи	Вдосконалення алгоритму роботи системи	Потрібно вдосконалити наявну розробку	Доступна
3	Спрощення реалізації алгоритмів на практиці	Вдосконалення програмного коду, розробка спеціальних інструкцій	Розробити	Доступна
4	Підвищити точність обробки вхідних даних	Оптимізація програмного коду	Розробити	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Підвищення точності компенсації температурних дрейфів гіроскопічних датчиків кутової швидкості.				

Висновки: Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок, що підвищення точності системи, є найбільш оптимальною технологією реалізації. Водночас вона є найбільш привабливою для користувачів, тому що таким чином система матиме можливість підлаштовуватися під різні вхідні дані, що збільшує коло обладнання на якому може застосовуватися представлена розробка. Цю технологію потрібно розробити, що тим самим підвищує унікальність. Всі описані технології є доступними.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначено ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту (табл. 4.4), та ринкові загрози, які можуть негативно вплинути на реалізацію проекту. Це дозволяє правильно спланувати напрямки розвитку проекту з урахуванням стану ринкового середовища.

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	6500000 ум.од
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Якщо розглядати військову, авіа- та суднобудовну сферу, медицину, то це сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують (якщо розглядати військову, авіа- та суднобудовну сферу, медицину)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	51%

Висновки: Ринок є дуже привабливим для входження. Це пов'язано з гарною рентабельністю і загальними обсягами продаж. Говорячи про ринок військової та медичної продукції, слід зауважити, що існують певні обмеження, пов'язані з виконанням специфічних для цих сфер умов стандартизації та сертифікації. Кількість основних гравців на ринку дорівнює 6, що є досить оптимальною конкуренцією.

Визначено потенційні групи клієнтів, їх основні характеристики, та сформовано основний список вимог до товару (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Підвищення точності показників приладів (компенсація дрейфів ДКШ)	Військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина	- Для військової та медичної сфери особливості пов'язані з стандартизацією і сертифікацією. - Для авіаційної і морської техніки важливішою є точність. - Для автомобільної промисловості, розробки навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніки, важливішим є простота впровадження	Точність показників - Швидкодія алгоритму - Надійність - Адаптивність - Простота та легкість у використанні.

Висновки: Було визначено цільові аудиторії (військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина) та їх головні особливості. Також було визначено відмінності між вимогами до точності показників системи у різних груп аудиторії. Було визначено основні вимоги споживачів до товару, які полягають у точності компенсації, швидкодії алгоритму, надійності, адаптивності, простоті та легкості у використанні.

Аналіз ринкового середовища. Складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому

перешкоджають (табл. № 4.6-4.7). Фактори в таблиці подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Зріст конкуренції	Вихід на ринок нових конкурентів, які будуть пропонувати більш дешевий або більш точний аналог за такою ж вартістю	Втрата клієнтів
2	Зменшення попиту	Оскільки товар не орієнтований на широкий загал, він може швидко перенасити ринок	Пошук нових клієнтів або можливостей адаптації алгоритмів під інші сфери
3	Вартість процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів	Подорожчання процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів, що призведе до подорожчання самого приладу	Відмова від товару внаслідок подорожчання
4	Зміни у сертифікації	Змінення стандартів сертифікації	Втрата клієнтів, для яких потрібен сертифікований товар
5	Точність	Погана точність продукту, товар не є надійний	Відмова від товару

Висновки: У таблиці 4.6 описані основні види загроз. Головною загрозою на погляд автора є зріст конкуренції, що може призвести до відмови клієнтів від товару внаслідок появи на ринку дешевших або більш точних аналогів, які зможуть запропонувати потенційному користувачу кращі або близькі характеристики. Не слід забувати і про інші загрози. Їх врахування є дуже важливим, оскільки вони також можуть призвести до втрати клієнтів.

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реалізація компанії
1	Зростання попиту	Можуть з'явитись нові потенційні покупці, або компанії-конкуренти вийдуть з ринку	Зростання прибутку, можливість подальшого розвитку та вдосконалення
2	Необхідність модифікацій та вдосконалення	Розширення можливостей системи за потребою користувачів	Вдосконалення та розширення можливостей системи за бажанням потенційних або постійних клієнтів
3	Розробка нових допоміжних алгоритмів в якості додатків	Розширення можливостей системи	Розширення можливостей системи, збільшення появи нових клієнтів, можливість освоювати нові галузі
4	Нові потенційні групи клієнтів	Поява нових потенційних груп покупців	Аналіз потреб нової групи покупців
5	Здешевлення вартості процедури впровадження алгоритмів до програмного забезпечення приладів	Вдосконалення та спрощення процедури, що призведе до її здешевлення	Зменшення ціни на готову систему

Висновки: У таблиці 4.7 описані основні види можливостей. Найголовнішою серед них автор вважає збільшення попиту. Очевидно, через те, що воно призводить до зростання прибутку, можливості подальшого розвитку та вдосконалення. А також, як наслідок цього, перед проектом відкриваються всі інші можливості описані в таблиці. Вони в свою чергу відкривають потенціал для вдосконалення та розширення можливостей алгоритму, а також до зменшення ціни на вже готову продукцію.

Аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8).

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції - чиста	Практично відсутня конкуренція у галузі	- Можливість швидко проводити вдосконалення, випереджаючи конкурентів - Можливості прогнозування змін на ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Потенційні клієнти є у всьому світі	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Товар може використовуватись у різноманітних галузях	Аналіз зміни потреб для кожної потенційної групи клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція товарів одного виду.	- Задоволення потреб клієнтів - Відповідність ринку
4. За характером конкурентних переваг - цінова	Варіювання ціни внаслідок вибору користувачем функціональних особливостей	Вдосконалення та спрощення процедури, що призведе до її здешевлення

Висновки: Було проаналізовано основні риси конкуренції на ринку, їх вплив на діяльність підприємства, а також можливі дії компанії, для забезпечення постійної конкурентоспроможності. Визначено, що конкуренція у галузі є невеликою (практично відсутня), і вона існує між товарами одного виду, є можливості виходу на міжнародний ринок, використання товару можливе у різноманітних сферах, а довіра до товару будується на репутації бренду.

Після проведення аналізу конкуренції проводиться аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю М. Портера) (табл. 4.9).

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
Складові аналізу	Відсутні	Поки що відсутні	Всі виробники ДКШ	Військові, розробка авіаційної і морської техніки, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніка, медицина	Всі наявні на ринку гіроскопи
Висновки:	Конкуренція у галузі поки що практично відсутня	Можливо ті виходу на ринок є, і вони не важкі. Можуть з'явитись потенційні конкуренти	Постачальники не диктують умови ринку	Клієнти практично не диктують умов, окрім військової промисловості та медицини, де існує обов'язкова сертифікація	Обмежень немає, тому що товарзамінник не є настільки точним, як запропоновані алгоритми.

Висновки: За результатами аналізу, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренція у галузі поки що практично відсутня, хоча з часом можуть з'явитись потенційні конкуренти. Постачальники не диктують умов на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів. Товари-замінники не зможуть задовольнити потреби користувачів. Проект повинен мати наступні сильні сторони: точність, високу швидкодію, надійність, відповідність потрібним стандартам, щоб отримувати сертифікацію.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в п. 3.5 (табл. 4.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до

товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №4.6-4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 4.10).

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність	Алгоритми компенсації дрейфів ДКШ, що забезпечують необхідну точність систем
2	Адаптивність	Можливість використання системи при різноманітних умовах
3	Швидкодія	Висока швидкодія системи, як наслідок – якість вихідного корисного ефекту
4	Надійність	Система працює стабільно при різноманітних зовнішніх чинниках
5	Сертифікованість	Відповідність необхідним стандартам, для отримання сертифікатів за потребою потенційних клієнтів

Висновки: Визначено основні фактори конкурентоспроможності, які полягають у точності, адаптивності, швидкодії, надійності та сертифікованості. Також наведено обґрунтування, яке показує сильні сторони проекту і те, як ці сильні сторони можуть бути корисними потенційному клієнту при використанні товару в порівнянні з товарами-конкурентами.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з виробниками ДКШ						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність патентів	19		+					
2	Точність	18			+				
3	Надійність	19					+		
4	Технічна підтримка	18							+
5	Сертифікованість	19						+	

Висновки: З таблиць 5.10 та 5.11 бачимо, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний внесок при впровадженні нового методу компенсації температурних дрейфів гіроскопів. Основною перевагою та головним досягненням є висока якість продукту та технічна підтримка на протязі всього терміну його використання споживачем.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 4.12).

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Найвища точність серед всіх існуючих аналогів 2. Відповідність необхідним стандартам, для проходження сертифікації 3. Можливість застосування у військовій сфері та медицині	Слабкі сторони: 1. Оскільки продукт новий, його надійність до кінця не перевірена 2. Немоżliвість забезпечити всіх користувачів повною технічною підтримкою на початкових етапах
Можливості: 1. Збільшення продажу; 2. Отримання державних замовлень на отримання послуг; 3. Вдосконалення системи 4. Вихід на міжнародний ринок	Загрози: 1. Цінова конкуренція в зв'язку з появою нових гравців на ринку. 2. Втрата потенційних клієнтів через недостатню технічну підтримку

Висновки: Проведено SWOT-аналіз, за яким були визначені можливі загрози і можливості, які передбачаються сильними та слабкими сторонами проекту. Загрози є, але вони більш пов'язані з тим, що продукт досить новий, і максимальна технічна підтримка нових користувачів не є головною метою, оскільки вся увага приділяється в першу чергу точності, адаптивності до різних факторів і легкості у використанні запропонованими алгоритмами.

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок. Та визначено оптимальний термін реалізації. (табл. 4.13).

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	12 міс.
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	18 міс.
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	6 міс.

Висновки: Після проведеного аналізу було обрано альтернативу – стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Це пов’язано з високою ймовірністю отримання ресурсів, а також досить стислих строків на реалізацію. Інші альтернативи значно програють по ймовірності отримання ресурсів, а виграш по часу, якщо розглядати таку альтернативу як стратегія виходу з ринку не корелює з ймовірністю отримання ресурсів.

4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Військова промисловість	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	високий	низька	важко

2	Авіаційне будівництво	Готові, якщо буде сертифікація	високий	низька	середньо
3	Суднобудівництво	Готові, якщо буде сертифікація	високий	низька	середньо
4	Автомобільна промисловість	Готові	високий	низька	просто
5	Робототехніка	Готові	високий	низька	просто
6	Медицина	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	високий	низька	важко
7	Розробка навігаційного обладнання та побутової електроніки	Готові	високий	низька	просто
Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення, що компанія буде працювати із автомобільною промисловістю, компаніями, що займаються розробкою навігаційного обладнання та побутової електроніки, робототехніки, із суднобудівною та авіаційною промисловістю.					

Висновки: За результатами аналізу потенційних груп споживачів було обрано цільові групи: автомобільна промисловість, компанії, що займаються розробкою навігаційного обладнання, робототехніки, побутової електроніки, а також суднобудівна та авіапромисловість. Конкуренція в галузях низька. Оскільки буде проводитися робота відразу у декількох сферах, то обирається стратегія диференційованого маркетингу.

Формування базової стратегії розвитку (табл. 4.15)

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Стратегія диференційованого маркетингу.	- Використання нових досягнень - Задоволення вимог користувачів - Постійне вдосконалення	Стратегія диференціації

Висновки: Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації, яка передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар особливим в порівнянні з товарами-конкурентами за певними характеристиками, іноді зважаючи на не досить важливі характеристики товару. Так буде більше уваги приділятися високій точності, адаптивності та спрощенню у використанні, але менше технічній підтримці (оскільки цей фактор буде не суттєвим при виконанні трьох попередньо зазначених).

Вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Проект є «першопрохідцем» на ринку	Так, будуть вестися пошуки нових споживачів, аналізуватися нові групи потенційних клієнтів, а також переманюватися у конкурентів, за допомогою пропонування кращого продукту.	Ні	Стратегія виклику лідера

Висновки: За стратегію конкурентної поведінки було обрано стратегію виклику лідера, суть якої полягає у протистоянні лідеру. Завдяки створенню конкурентоспроможного товару, який у загальній кількості характеристик може зайняти найвищу позицію на ринку, і стати одним із найпривабливіших

для клієнтів. Також проект є першопрохідцем на ринку. Основні характеристики товару конкурента не будуть копіюватись, а навпаки вдосконалюватись.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розроблено стратегію позиціонування яка визначається у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект. (табл. 4.17).

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Точність системи	Стратегія диференціації	Найвища точність.	Високоточна, стабільна.
2	Адаптивність до різноманітних умов	Стратегія диференціації	Універсальність	Адаптивна до будь-яких обставин, універсальна
3	Надійність впродовж часу роботи	Стратегія диференціації	Якість	Надійна
4	Простота у використанні	Стратегія диференціації	Простота	Проста, легка, зрозуміла
5	Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Якість. Ціна. Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка.

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку

4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 4.18 підсумовано результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Необхідність компенсації дрейфів ДКШ з метою отримання максимально точних даних	Алгоритм має найвищі показники точності серед всіх можливих аналогів. Він також є адаптивним до різноманітних факторів, простим у використанні.	Максимальна точність, адаптивність, надійність, проста у використанні, підтримка споживача, можливість широкого використання.

Висновки: Як видно з табл. 4.18, для потенційного споживача існує досить багато переваг, які полягають у максимальній точності, адаптивності, надійності, прості у використанні, підтримці споживача, можливості широкого використання. відносно товарів конкурентів. Деякі характеристики і можливості товари-конкуренти взагалі не можуть запропонувати у такій якості потенційному користувачеві.

Трирівнева маркетингова модель товару: (табл. 4.19).

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
I. Товар за задумом	1. Точність компенсації 2. Швидкість роботи алгоритмів 3. Надійність впродовж часу роботи 4. Простота у використанні	1. 0.03°/с 2. Залежить від роботи мікропроцесора 3. - 4. Нм	1. Тх 2. Тх 3. Тх 4. Тл
II. Товар у реальному виконанні	Якість: відповідає нормам ISO		
	Пакування: програмне забезпечення		
	Марка: проект «Алгоритми компенсації дрейфів мікромеханічних гіроскопів»		

III. Товар із підкріпленням	До продажу: отримання спеціальної консультації щодо встановлення програмного забезпечення та його використання
	Після продажу: Гарантійне обслуговування, сервісна підтримка
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Завдяки патентуванню винаходу.	

Висновки: Зроблено опис трьох рівнів моделі товару, за яким легко зрозуміти призначення товару та які проблемні задачі він вирішує, основні властивості та технічні характеристики які може запропонувати даний товар, основні сертифікації товару, а також яка підтримка може очікувати цільового користувача до та після покупки. Захист товару від копіювання буде зроблено завдяки патентуванню.

Визначення цінових меж для встановлення ціни на потенційний товар (табл. 4.20).

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	1000-200 ум.од	500 – 4000 ум.од.	10000-15000 ум.од.	Нижня межа: 2500 ум.од. Верхня межа: 3500 ум.од

Висновки: Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною для запропонованих користувачу характеристик, і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Ціна базувалась на собівартості розробки програмного забезпечення, а також враховано унікальність даних алгоритмів. Визначено рівень доходів цільової групи споживачів, але треба зазначити, що ці системи не на широку аудиторію, тобто їх основними споживачами є великі компанії.

Визначення оптимальної системи збуту (табл. 4.21).

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Роздрібна закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача.	Канал одного рівня	Підприємства роздрібно́ї торгівлі
2	Оптова закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача, з додатковими умовами і бонусами.	Дворівневий канал	Підприємства оптової торгівлі
3	Орендування	Консультація щодо використання обладнання	Канал нульового рівня	Підприємства від виробника

Висновки: Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту за специфікою закупівельної поведінки цільових клієнтів. Основні це роздрібна закупівля, оптова закупівля та орендування. Визначено функції збуту, які повинен виконувати постачальник товару. Визначено, через що оптимально реалізовувати збут при різних специфіках закупівельної поведінки цільових клієнтів.

Розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 4.22).

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
-----	---------------------------------------	--	--	----------------------------------	--------------------------------

1	Знайти можливість швидко та зручно компенсувати дрейфи ММГ для отримання більш точних вихідних даних	Інтернет, телефон, відвідування наукових форумів, презентацій	Точність, швидкість, адаптивність	Приваблення нових цільових клієнтів	Розповісти про новий підхід до компенсації дрейфів ММГ та отримання з їх допомогою більш точних даних = вдосконалення роботи всіх гіроскопів.
---	--	---	-----------------------------------	-------------------------------------	---

Висновки: Розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів, за допомогою інтернету, телефону та проведенні спеціальних наукових форумів і презентацій, які обрані основними каналами комунікацій, шляхом розміщення рекламного звернення, де буде розповідатись про новий підхід до компенсації дрейфів гіроскопів та отримання з їх допомогою більш точних даних.

Висновки до розділу 4

При розробці стартап-проекту було пророблено всі етапи, необхідні для правильного аналізу ринку, потенційних клієнтів, конкурентоспроможності, факторів ризику та можливостей, вибору правильних стратегій для впровадження стартап проекту на ринок, для того, щоб він став успішним. Визначено основні напрямки застосування та вигоду для користувачів, а також сильні та слабкі сторони проекту у порівнянні з товарами-конкурентами. На основі цього було виявлено, що на товар існує досить великий попит у різноманітних сферах, таких, як авіабудування, морська справа, військова промисловість, автомобільна промисловість, розробка навігаційного обладнання, робототехніка, медицина. Проведено технологічний аудит проекту для вибору правильної технології реалізації ідеї проекту. Було обрано технологію - підвищення точності системи, що є більш привабливим для користувачів, тому що отримані показники будуть максимально точними.

Проведено аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, за яким було виявлено, що ринок є дуже привабливим для входу, а середній рівень рентабельності у галузі є високим. Визначено основні цільові аудиторії клієнтів, а також головні відмінності між ним. Основним ризиком загроз обрано зріст конкуренції, внаслідок чого може початися втрата клієнтів. А основною можливістю є зростання попиту, що призведе до збільшення виробництва. Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку і визначено, що конкуренція у галузі є невеликою, є можливості виходу на міжнародний ринок, а використання товару можливе у різноманітних сферах. За результатами аналізу за моделлю М. Портера, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренції у галузі практично не існує, проте в майбутньому можуть з'явитись потенційні конкуренти. Постачальники не диктують умов на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів. Товари-замінники не зможуть задовольнити потреби користувачів. Визначено фактори конкурентоспроможності за якими проведено аналіз сильних та слабих сторін проекту: наявність патентів, висока точність. Більш слабкі сторони полягають у сертифікованості і надійності, оскільки неможливо передбачити абсолютно всі впливи. Загалом товар є повністю конкурентоспроможним з існуючих. Після проведеного SWOT – аналізу було обрано альтернативу ринкової поведінки – стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу. Розроблено ринкову стратегію проекту. Як цільові групи обрано: автомобільну промисловість, компанії, що займаються розробкою навігаційного обладнання, робототехніки, авіаційне будівництво, суднобудівництво. Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації. Обрано стратегію конкурентної поведінки – стратегія лідера. Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові поняття: високоточний, надійний і простий у використанні алгоритм. Розроблено маркетингову програму стартап-проекту, за якою встановлено, що для

потенційного користувача товару є багато переваг, які не можуть запропонувати конкуренти.

Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту і розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів. Із зазначеного вище зроблено висновки, що подальша імплементація проекту є цілком доцільна.

ВИСНОВКИ

1. Було проведено огляд стану проблеми компенсації температурних дрейфів гіроскопічних датчиків кутової швидкості. Провівши аналіз попередніх досліджень в цій сфері, було виявлено, що методи алгоритмічної компенсації вихідних сигналів ДКШ знаходять найбільше розповсюдження серед усіх інших завдяки їх ефективності, відносній простоті реалізації, що не веде до збільшення розмірів та енерговитрат гіроскопів. Також стало зрозуміло, що покращення даних методів є актуальною темою та має великі перспективи щодо подальших досліджень в даній сфері.

2. Проведено аналіз існуючих сучасних методів алгоритмічної компенсації дрейфів ДКШ. В ході його проведення виявлено, що одним з основних етапів роботи алгоритмів компенсації є етап апроксимації вихідних даних. Згідно з цим було зроблено висновок, що проведення експериментів пов'язаних з застосуванням різних типів апроксимації, з ціллю визначення їх сильних та слабких сторін для подальшого покращення, може в цілому суттєво підвищити точність компенсації температурних похибок гіроскопів.

Використовуючи отримані дані для подальшого проведення досліджень було розроблено алгоритми компенсації, що використовують різні типи апроксимації вихідних даних та температурних залежностей.

3. Експериментальна перевірка методів проводилася на двох типах датчиків кутової швидкості, а саме мікромеханічних гіроскопах та хвильових твердотільних гіроскопах.

Для проведення досліджень на ММГ було побудовано його комп'ютерну модель, модель похибки, та температурної залежності. Дослідження роботи алгоритмів на ХТГ проводилися на реальних даних отриманих після процедури температурного калібрування.

Таким чином також вдалося оцінити доцільність досліджень проведених на комп'ютерній моделі та на реальних даних. Виділити їх сильні сторони та недоліки

4. Результати досліджень показали, що застосування сучасних методів апроксимації дозволяє значно підвищити точність алгоритмічної компенсації температурних дрейфів гіроскопів. В ході проведення досліджень також було встановлено залежності різних параметрів гіроскопа на вихідний сигнал а також визначено зміна яких параметрів апроксимуючих моделей температурних залежностей призводить до покращення точності компенсації вихідних сигналів ДКШ. Таким чином поставлене завдання покращення точності гіроскопічних датчиків кутової швидкості за рахунок покращення методів алгоритмічної компенсації температурних дрейфів було виконано.

В майбутньому результати даної роботи можуть використовуватися для розробки нових алгоритмів компенсації температурних дрейфів, та досліджень роботи наявних на інших (не розглянутих в рамках роботи) типах гіроскопічних датчиків кутової швидкості з ціллю їх покращення.

5. За результатами роботи було проведено розробку стартап-проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Barbour N.M. Inertial Navigation Sensors // RTO Lecture Series Supporting Papers. – 2011. – С. 2-1 - 2-28.
2. Prikhodko I.P. Achieving long-term bias stability in high-Q inertial MEMS by temperature self-sensing with a 0.5 millicelcius precision / Prikhodko I.P., Trusov A.A., Shkel A.M. // Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop. – 2012. – Т. 1. – С. 287-290.
3. Унтилов А.А. Исследование и разработка упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического гироскопа : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.03. – СПб., 2005. – 147 с.
4. Kaajakari V. Stability of wafer level vacuum encapsulated single-crystal silicon resonators / Kaajakari V., Kiihamaki J., Pietikainen S., Oja A., Seppa H., Pietikainen S., Kokkala V., Kuisma H. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2006. – Т. 130. – С. 42-47.
5. Kim B. Investigation of MEMS resonator characteristics during long-term and wide temperature variation operation / Kim B., Candler R.N., Hopcroft M., Agarwal M., Park W.T., Li J.T., Kenny T. // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. – 2004. – С. 413-416.
6. Kim B. Frequency stability of wafer-scale film encapsulated silicon based MEMS resonators / Kim B., Candler R.N., Hopcroft M.A., Agarwal M., Park , Kenny T.W. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2007. – Т. 136. – №. 1. – С. 125-131.
7. Feng R. A theoretical and experimental study on temperature dependent characteristics of silicon MEMS gyroscope drive mode / Feng Rui, Qiu An-ping, Shi Qin, Su Yan // Advanced Materials Research. – 2012. – Т. 403. – С. 4237-4243.
8. Liu G. Effects of environmental temperature on the performance of a micromachined gyroscope / Guangjun Liu, Anlin Wang, Tao Jiang, Jiwei

- Jiao, Jong-Bok Jang // *Microsystem Technologies*. – 2008. – T. 14. – №. 2. – C. 199-204.
9. Song J. Effect of die-bonding process on MEMS device performance: system-level modeling and experimental verification / Jing Song, Qing-An Huang, Ming Li, Jie-Ying Tang // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2009. – T. 18. – №. 2. – C. 274-286.
 10. Royce B.S.H. Differential thermal expansion in microelectronic systems // *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*. – 1988. – T. 11. – №. 4. – C. 454-463
 11. Chiu S.R. An integrated thermal compensation system for MEMS inertial sensors / Sheng-Ren Chiu, Li-Tao Teng, Jen-Wei Chao, Chung-Yang Sue, Chih-Hsiou Lin, Hong-Ren Chen, Yan-Kuin Su // *Sensors*. – 2014. – T. 14. – №. 3. – C. 4290-4311.
 12. Ferguson M.I. Effect of temperature on MEMS vibratory rate gyroscope / Ferguson M.I., Keymeulen D., Peay C., Yee K. // *IEEE Aerospace Conference*. – 2005. – C. 1-6.
 13. Guan R. A temperature control system used for improving resonant frequency drift of MEMS gyroscopes / Rui Guan, Chunhua He, Dachuan Liu, Qiancheng Zhao, Zhenchuan Yang, Guizhen Yan // *Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*. – 2015. – C. 397-400.
 14. Feng S. Research on thermal characteristic in slow-small temperature changing for MEMS linear vibration gyroscope / Sun Feng, Guo Qiufen, Ge Yuansheng, Li Junshan // *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. – 2006. – C. 475-479.
 15. Chiang C.F. A novel, high-resolution resonant thermometer used for temperature compensation of a cofabricated pressure sensor / Chiang C.F., Graham A.B., Ng E.J., Ahn C.H., O'Brien G.J., Kenny T.W. // *Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop*. – 2012. – C. 54-57.

- 16.Melamud R. Temperature-compensated high-stability silicon resonators / Melamud R., Kim B., Chandorkar S.A., Hopcroft M.A., Agarwal M., Jha C.M., Kenny T.W. // Applied physics letters. – 2007. – T. 90. – №. 24. – C. 244107-1-3.
- 17.Kim B. Frequency stability of wafer-scale film encapsulated silicon based MEMS resonators / Kim B., Candler R.N., Hopcroft M.A., Agarwal M., Park , Kenny T.W. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2007. – T. 136. – №. 1. – C. 125-131.
- 18.Hsu W.T. Geometric stress compensation for enhanced thermal stability in micromechanical resonators / Hsu W.T., Nguyen C.T.C. // IEEE Ultrasonics Symposium. – 1998. – T. 1. – C. 945-948.
- 19.Hsu W.T. Mechanically temperature-compensated flexural-mode micromechanical resonators / Hsu W.T., Clark J.R., Nguyen C.T.C. // IEEE International Electron Devices Meeting. – 2000. – C. 399-402.
- 20.Ho G.K. Temperature compensated IBAR reference oscillators / Ho G.K., Sundaresan K., Pourkamali S., Ayazi F. // 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. – 2006. – C. 910-913.
- 21.Hsu W.T. Stiffness-compensated temperature-insensitive micromechanical resonators / Hsu W.T., Nguyen C.T.C. // The 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. – 2002. – C. 731-734.
- 22.Lu X. On-chip temperature-control technology for silicon micro-gyroscope / Lu X., Bo Yang, Shourong Wang, Hongsheng Li, Libin Huang // Key Engineering Materials. – 2011. – T. 483. – C. 228-231.
- 23.Nguyen C.T.C. Microresonator frequency control and stabilization using an integrated micro oven / Nguyen C.T.C., Howe R.T. // Proc. Transducers. – 1993. – T. 93. – C. 7-10.
- 24.Lee S.H. A low-power oven-controlled vacuum package technology for high-performance MEMS / Lee S.H., Cho J., Lee, Zaman M.F., Ayazi F., Najafi K. // IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. – 2009. – C. 753-756.

25. Lee S.H. A low-power oven-controlled vacuum package technology for high-performance MEMS / Lee S.H., Cho J., Lee, Zaman M.F., Ayazi F., Najafi K. // IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. – 2009. – С. 753-756.
- Hopcroft M.A. A high-stability MEMS frequency reference / Hopcroft M.A., Lee H.K., Kim B., Melamud R., Chandorkar S., Agarwal M., Jha C.M., Salvia J., Bahl G., Mehta H., Kenny T.W. // The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. – 2007. – С. 1307-1309.
26. Chandorkar S.A. Non-isothermal micromechanical resonators / Chandorkar S.A., Mehta H., Agarwal M., Hopcroft M.A., Jha C.M., Candler R.N., Yama G., Bahl G., Kim B., Melamud R., Goodson K.E., Kenny T.W. // IEEE 20th International Conference on MEMS. – 2007. – С. 211-214.
27. Малютин Д.М. Алгоритмическая компенсация изменения нулевого сигнала микромеханического гироскопа от температуры / Малютин Д.М., Малютина М.Д. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – №. 2. – С. 187-191.
28. Johnson B. Tuning fork MEMS gyroscope for precision northfinding / Johnson B., Christ K., Endean D., Mohr B., Supino R., French H., Cabuz E. // DGON Inertial Sensors and Systems Symposium. – 2015. – С. 1-10.
29. Zhu X.-H. Experimental study of compensation for the effect of temperature on a silicon micromachined gyroscope / X-H Zhu, H-J Chu, Q Shi, A-P Qiu, Y Su // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems. – 2008. – Т. 222. – №. 2. – С. 49- 55
30. Люкшонков Р.Г. Инерциальный измерительный модуль разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Методика калибровки и результаты испытаний / Люкшонков Р.Г., Куликова О.Н., Ефремов Р.С. // Материалы XIV Конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – 2012. – С. 440-446.

- 31.Боронахин А.М. Исследование погрешностей триады микромеханических гироскопов с использованием малогабаритного двухосного стенда / Боронахин А.М., Иванов П.А., Суров И.Л. // Нано-и микросистемная техника. – 2010. – №. 1. – С. 35-41.
- 32.Gulmammadov F. Analysis, modeling and compensation of bias drift in MEMS inertial sensors // 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies. – 2009. – С. 591-596.
- 33.Cao H. A novel temperature compensation method for a MEMS gyroscope oriented on a periphery circuit / Huiliang Cao, Hongsheng Li, Xia Sheng, Shourong Wang, Bo Yang, Libin Huang // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2013. – Т. 10. – С. 1-10.
- 34.Bin Z. Online self-compensation for enhanced the scale factor stability of a micromachined gyroscope / Zhou Bin, Zhang Rong, Chen Zhiyong // Journal of Physics: Conference Series. – 2009. – Т. 188. – №. 1. – С. 1-6.
- 35.Yeşim Günhan, Derya Ünsal, “Polynomial Degree Determination for Temperature Dependent Error Compensation of Inertial Sensors”, IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014, pp. 1209-1212, 2014.
- 36.Baiqiang Zhanga, Hairong Chua, Tingting Suna, Lihong Guoa, “Thermal calibration of a tri-axial MEMS gyroscope based on Parameter-Interpolation method”, Sensors and Actuators A: Physical Vol. 261, pp. 103-116, 1 July 2017.
- 37.Yang H., Zhou B., Wang L., Xing H., Zhang R., “A Novel Tri-Axial MEMS Gyroscope Calibration Method over a Full Temperature Range”, Sensors, Vol. 18, pp. 3004, 2018 Sep.
- 38.Rita Fontanella, Domenico Accardo, Rosario Schiano Lo Moriello, Leopoldo Angrisani, Domenico De Simone, “MEMS Gyros Temperature Calibration through Artificial Neural Networks”, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 279, pp. 553- 565, 15 August 2018.

39. Qintuo Zhang, Zhenfan Tan, Lidong Guo. "Compensation of temperature drift of MEMS gyroscope using BP neural network", 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, pp. 1-4, 2009. 92 Київ – 2018 року
40. J. K. Shiau et al., "MEMS Gyroscope Null Drift and Compensation Based on Neural Network", Advanced Materials Research, Vols. 255-260, pp. 2077-2081, 2011.
41. Rita Fontanella, Domenico Accardo, Egidio Caricati, Stefano Cimmino, Domenico De Simone, "An extensive analysis for the use of back propagation neural networks to perform the calibration of MEMS gyro bias thermal drift" 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), pp. 672-680, 2016.
42. Golrokh Araghi, René Jr Landry, "Temperature compensation model of MEMS inertial sensors based on neural network", 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), pp. 301-309, 2018.
43. Shen Chong, Song Rui, Li Jie, Zhang Xiaoming, Tang Jun, Shi Yunbo, Liu Jun, Cao Huiliang, "Temperature drift modeling of MEMS gyroscope based on genetic Elman neural network", Mechanical Systems and Signal Processing, Vols. 72–73, pp. 897-905, May 2016.
44. Muhammad Ali, "Compensation of Temperature and Acceleration effects on MEMS Gyroscope", 2016 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), pp. 274-279, 2016.
45. Farid Gulmammadov, "Analysis, modeling and compensation of bias drift in MEMS inertial sensors", 2009 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, pp. 591-596, 2009.
46. Q.J. Tang, X.J. Wang, Q.P. Yang, C.Z. Liu, "Static temperature analysis and compensation of MEMS gyroscopes", Int. J. Metrol. Qual. Eng. Vol. 4, Num. 3, pp. 209-214, 06 March 2014.
47. Liu G. Effects of environmental temperature on the performance of a micromachined gyroscope / Guangjun Liu, Anlin Wang, Tao Jiang, Jiwei

- Jiao, Jong-Bok Jang // *Microsystem Technologies*. – 2008. – T. 14. – №. 2. – C. 199-204.
48. Lu X. On-chip temperature-control technology for silicon micro-gyroscope / Lu X., Bo Yang, Shourong Wang, Hongsheng Li, Libin Huang // *Key Engineering Materials*. – 2011. – T. 483. – C. 228-231.
49. M'Closkey R.T. Analysis of a microsensor automatic gain control loop / M'Closkey R.T., Vakakis A. // *Proceedings of the American Control Conference*. – 1999. – T. 5. – C. 3307-3311.
50. Marinis T.F. Isolation of MEMS devices from package stresses by use of compliant metal interposers / Marinis T.F., Soucy J.W., Hanson D.S. // *56th Electronic Components and Technology Conference*. – 2006. – C. 1108-1117.
51. Melamud R. Temperature-compensated high-stability silicon resonators / Melamud R., Kim B., Chandorkar S.A., Hopcroft M.A., Agarwal M., Jha C.M., Kenny T.W. // *Applied physics letters*. – 2007. – T. 90. – №. 24. – C. 244107-1-3.
52. Myers D.R. Passive substrate temperature compensation of doubly anchored double-ended tuning forks / Myers D.R., Azevedo R.G., Chen L., Mehregany M., Pisano A.P. // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2012. – T. 21. – №. 6. – C. 1321-1328.
53. Nesterenko T.G. Temperature error compensation in two-component microelectromechanical gyroscope / Nesterenko T.G., Koleda A.N., Barbin E.S., Uchaikin S.V. // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. – 2014. – T. 4. – №. 10. – C. 1598-1605.
54. Ng E.J. Stability measurements of silicon MEMS resonant thermometers / Ng E.J., Lee H.K., Ahn C.H., Melamud R., Kenny T.W. // *Sensors*. – 2011. – C. 1257-1260.
55. Nguyen C.T.C. Microresonator frequency control and stabilization using an integrated micro oven / Nguyen C.T.C., Howe R.T. // *Proc. Transducers*. – 1993. – T. 93. – C. 7-10.

56. Nguyen C.T.C. The harsh environment robust micromechanical technology (HERMiT) program: success and some unfinished business // IEEE International Microwave Symposium Digest. – 2012. – C. 1-3.
57. Northemann T. A digital interface for gyroscopes controlling the primary and secondary mode using bandpass sigma–delta modulation / Northemann T., Maurer M., Rombach S., Buhmann A., Manoli Y. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2010. – T. 162. – №. 2. – C. 388-393.
58. Omar A. A new versatile hardware platform for closed-loop gyro / Omar A., Elshennawy A., Ismail A., Nagib M., Elmala M., Elsayed A. // 2015 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium. – 2015. – C. 1-14.
59. Park S. Oscillation control algorithms for resonant sensors with applications to vibratory gyroscopes / Sungsu Park, Chin-Woo Tan, Haedong Kim, Sung Kyung Hong // Sensors. – 2009. – T. 9. – №. 8. – C. 5952-5967.
60. Patent 8783103 United States, Int. Cl. G01C 19/56. Offset detection and compensation for micromachined inertial sensors / Clark W.A., Geen J.A. ; assignee Analog Devices, Inc. – Appl. No. 12/545334 ; filed 21.08.2009 ; published 22.07.2014. – 19 p. : fig.
61. Peshekhonov V.G. Test results of an RR-type micromechanical gyroscope / Peshekhonov V.G., Nekrasov Y.A., Pfluger P., Haddara H., Elsayed A. // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2011. – T. 1. – №. 26. – C. 14-21.
62. Prikhodko I.P. Achieving long-term bias stability in high-Q inertial MEMS by temperature self-sensing with a 0.5 millicelcius precision / Prikhodko I.P., Trusov A.A., Shkel A.M. // Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop. – 2012. – T. 1. – C. 287-290.
63. Prikhodko I.P. Compensation of drifts in high-Q MEMS gyroscopes using temperature selfsensing / Prikhodko I.P., Trusov A.A., Shkel A.M. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2013. – T. 201. – C. 517-524.
64. Prikhodko I.P. High and moderate-level vacuum packaging of vibratory MEMS / Prikhodko I.P., Simon B.R., Sharma G., Zotov S.A., Trusov A.A.,

- Shkel A.M. // 46th International Symposium on Microelectronics. – 2013. – C. 705-710.
65. Prikhodko I.P. Sub-degree-per-hour silicon MEMS rate sensor with 1 million Q-factor / Prikhodko I.P., Zotov S.A., Trusov A.A., Shkel A.M. // IEEE 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. – 2011. – C. 2809-2812.
66. Prikhodko I.P. Thermal calibration of silicon MEMS gyroscopes / Prikhodko I.P., Zotov S.A., Trusov A.A., Shkel A.M. // IMAPS 8th International Conference and Exhibition on Device Packaging. Scottsdale. – 2012.
67. Raman J. A closed-loop digitally controlled MEMS gyroscope with unconstrained sigma-delta force-feedback / Raman J., Cretu E., Rombouts P., Weyten L. // IEEE Sensors Journal. – 2009. – T. 9. – №. 3. – C. 297-305.
68. Royce B.S.H. Differential thermal expansion in microelectronic systems // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. – 1988. – T. 11. – №. 4. – C. 454-463.
69. Rubach R. Dual mode digitally temperature compensated crystal oscillator // 36th Annual Frequency Control Symposium. – 1982. – C. 571-575.
70. Salvia J. Exploring the limits and practicality of Q-based temperature compensation for silicon resonators / Salvia J., Messana M., Ohline M., Hopcroft H.A., Melamud R., Chandorkar S., Lee H.K., Bahl G., Murmann B., Kenny T.W. // IEEE International Electron Devices Meeting. – 2008.
71. Salvia J. Phase lock loop based temperature compensation for MEMS oscillators / Salvia J., Melamud R., Chandorkar S., Lee H.K., Qu Y.Q., Lord S.F., Murmann B., Kenny T.W. // IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. – 2009. – C. 661-664.
72. Shcheglov K. Temperature dependent characteristics of the JPL silicon MEMS gyroscope / Shcheglov K., Evans C., Gutierrez R., Tang T.K. // IEEE Aerospace Conference Proceedings. – IEEE, 2000. – T. 1. – C. 403-411.
73. Song J. Effect of die-bonding process on MEMS device performance: system-level modeling and experimental verification / Jing Song, Qing-An Huang,

- Ming Li, Jie-Ying Tang // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2009. – T. 18. – №. 2. – C. 274-286.
74. Sun X. Stability and resolution analysis of a phase-locked loop natural frequency tracking system for MEMS fatigue testing / Sun X., Horowitz R., Komvopoulos K. // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 2002. – T. 124. – №. 4. – C. 599-605.
75. Trusov A.A. Investigation of Factors Affecting Bias Stability and Scale Factor Drifts in Coriolis Vibratory MEMS Gyroscopes : Ph.D. Dissertation. Irvine: University of California. – 2009. 255 pp.
76. Trusov A.A. Performance characterization of a new temperature-robust gain-bandwidth / Trusov A.A., Schofield A.R., Shkel A.M. // Sensors and Actuators A: Physical. – 2009. – T. 155. – №. 1. – C. 16-22.
77. Trusov A.A. Study of substrate energy dissipation mechanism in in-phase and anti-phase micromachined vibratory gyroscopes / Trusov A.A., Schofield A.R., Shkel A.M. // IEEE Sensors. 2008. – 2008. – C. 168-171.
78. Weinberg M.S. Energy loss in MEMS resonators and the impact on inertial and RF devices / Weinberg M.S., Candler R.N., Chandorkar S.A., Varsanik J.S., Kenny T.W., Duwel A.E. // 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems. – 2009. – C. 688-695.
79. Xia D. Microgyroscope temperature effects and compensation-control methods / Dunzhu Xia, Shuling Chen, Shourong Wang, Hongsheng Li // Sensors. – 2009. – T. 9. – №. 10. – C. 8349-8376.
80. Yang B. The on-chip temperature compensation and temperature control research for the silicon micro-gyroscope / Bo Yang, Bo Dai, Xiaojun Liu, Lu Xu, Yunpeng Deng, Xingjun Wang. // Microsystem Technologies. – 2015. – T. 21. – №. 5. – C. 1061-1072.
81. Yasumura K.Y. Quality factors in micron-and submicron-thick cantilevers / Yasumura K.Y., Stowe T.D., Chow E.M., Pfafman T., Kenny T.W., Stipe B.C., Rugar D. // Journal of microelectromechanical systems. – 2000. – T. 9. – №. 1. – C. 117-125. 122

- 82.Nakamura, S., "MEMS inertial sensor toward higher accuracy & multi-axis sensing" Sensors, 2005 IEEE, vol., no., pp.4 pp., Oct. 30 2005-Nov. 3 2005.
- 83.P. Ngana, J. Koning, P. French, J. Bontemps, K. Seetharaman, "Design, modeling and Simulation of a high frequency MEMS Gyroscope in 1.5 μ m SOI", Proceedings of the Euro sensors XXIII conference, Lausanne, Switzerland, Sept. 2009.
- 84.Sungsu Park and Roberto Horowitz, "Adaptive Control for the Conventional Mode of Operation of MEMS Gyroscopes,"Journal of Microelectromechanical Systems. vol. 12, No. 1, February 2003, pp.101-8.
- 85.Сайт АТ «Елміз» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.elmiz.com/>.
- 86.Феоклістов Д.О. Методи компенсації температурних дрейфів мікромеханічних гіроскопів". XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених "Погляд у майбутнє приладобудування", 18-19 травня 2021 року, м. Київ, ст. 69-71