

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

Приладобудівний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Прилади та системи орієнтації і навігації
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 531.383

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) _____
(код і назва спеціальності)

151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
на тему Використання методів надлишковості для забезпечення
стійкості вимірювачів системи орієнтації і навігації.

Виконав: студент 6 курсу, групи ПГ-61М
(шифр групи)

Романов Микола Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н., доц. МIRONENKO П.С. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Стартап доцент к.е.н. Бояринова К.О. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент в.о.зав.кафедри НАЕПС, ., д.т.н., проф. Защепкіна Н.М. _____
(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

Пояснювальна записка складає 97 сторінок (з них основна частина 82 сторінок), в ній міститься 38 рисунків, 8 таблиць.

Інформаційно-вимірювальні системи служать для вимірювання різних фізичних величин, в тому числі прискорень, кутових і лінійних швидкостей і переміщень об'єктів різного призначення, збору, обробки інформації, одержуваної з вимірювальних приладів, та вироблення команд управління.

Розробка перспективних систем навігації і управління рухом об'єктів різного призначення пов'язана з мініатюризацією систем, зниженням їх вартості, енергоспоживання і експлуатаційних витрат. Мініатюризація навігаційних систем вимагає створення малогабаритних датчиків - гіроскопів і акселерометрів.

Пошук нових можливостей створення інерційних датчиків з необхідними характеристиками і прогрес в області мікроелектроніки привели до появи нового класу приладів - мікромеханічних датчиків. Їх поява ознаменувало революційні зміни в інерціальній технології.

Актуальність теми. Перехід від приладів точної механіки до мікромеханіки не допускає формальної заміни одних на інші. Це пов'язано з тим, що мікромеханічні акселерометри і гіроскопи, на даному етапі розвитку мають більш низьку стабільність масштабного коефіцієнту, більшу нелінійність вихідної характеристики, підвищений рівень шумів і більш вузький діапазон вимірювання.

Тому актуальною є розробка математичних моделей, що враховують особливості протікання в мікромеханічних приладах процесів, і створення на їх основі методик синтезу мікромеханічних приладів з поліпшеними характеристиками.

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності осьових мікромеханічних акселерометрів, розробка рішень, методик аналізу і синтезу механічної, електричної, структурної та алгоритмічної підсистем з метою підвищення стійкості приладів до впливу інерційних збурень.

Об'єкт дослідження - осьові мікромеханічні акселерометри, які використовуються в інформаційно-вимірювальних системах для вирішення завдань орієнтації і навігації.

Предметом дослідження є електромеханічні процеси, що відображають специфічні особливості схемних реалізацій осьових мікромеханічних акселерометрів, взаємозв'язок параметрів цих приладів з їх похибкою в умовах вібрацій з метою корекції показань.

Методи дослідження: основні на числових методах розв'язання систем диференціальних рівнянь та теорії нелінійних коливань динамічних систем.

Наукова новизна вперше проводиться компенсація вібраційної похибки в мікромеханічному акселерометрі, по створеній математичній моделі цієї похибки, за допомогою методів надлишкових вимірювань в реальному часі.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в тому, що створені математичні моделі, алгоритми, програми, які можуть бути використані при проектуванні акселерометрів з контуром корекції за додатковою інформацією про рух чутливого елемента.

Задачі дослідження:

1. Здійснення пошуку схемно-конструктивних рішень по виконанню мікромеханічних акселерометрів, адаптованих до умов роботи підвищеним рівнем інерційних збурень. Проведення аналізу роботи чутливого елемента в умовах обраних збурень.

2. Побудова узагальненого математичного опису моделі похибки приладу в обраних умовах експлуатації. Проведення аналізу з метою визначення можливості виконання додаткових вимірів для формування контуру компенсації похибки.

3. Побудова математичних моделей мікромеханічного акселерометра для проведення імітаційного моделювання. Здійснення, за результатами імітаційного моделювання, аналізу отриманих результатів на предмет підвищення ефективності від їх застосування і вироблення напрямків можливих подальших досліджень

Апробація результатів роботи.

Положення даної роботи та проміжні результати доповідались і обговорювались на наступних конференціях:

1) XI науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ, 2018.

Публікації.

1) Компенсація похибки акселерометра за допомогою додаткової інформації про рух інерційної маси / М.О. Романов, Мироненко П.С. // Погляд у майбутнє приладобудування: збірник статей XI науково-практичної конференції студентів та аспірантів, 15-16 травня 2018р., м. Київ, Україна. – 2018. – С. 61.

2) Исследование датчиков давления резонансного типа /М.О. Романов, Мироненко П.С. // Погляд у майбутнє приладобудування: збірник тез та доповідей Том 1 X науково-

практичної конференції студентів та аспірантів, 16-17 травня 2017р., м. Київ, Україна. – 2017.

3) Сапегін О.М., Романов М.О., Бугайов Д.В. Безплатформова інерціальна навігаційна система на основі динамічно налагоджених гіроскопів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – №6 – С. 94 – 100. doi: 10.20535/1810-0546.2016.6.81064

Ключові слова: інтелектуальний датчик, осьовий мікромеханічний акселерометр, математична модель, систематична похибка вібрації, програмна модель.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка составляет 97 страниц (из них основная часть 82 страниц), в ней содержится 38 рисунков, 8 таблиц.

Информационно-измерительные системы служат для измерения различных физических величин, в том числе ускорений, угловых и линейных скоростей и перемещений объектов различного назначения, сбора, обработки информации, получаемой с измерительных приборов, и выработки команд управления.

Разработка перспективных систем навигации и управления движением объектов различного назначения связана с миниатюризацией систем, снижением их стоимости, энергопотребления и эксплуатационных расходов. Миниатюризация навигационных систем требует создания малогабаритных датчиков - гироскопов и акселерометров.

Поиск новых возможностей создания инерционных датчиков с требуемыми характеристиками и прогресс в области микроэлектроники привели к появлению нового класса приборов - микромеханических датчиков. Их появление ознаменовало революционные изменения в инерциальной технологии.

Актуальность темы. Переход от приборов точной механики к микромеханике не допускает формальной замены одних на другие. Это связано с тем, что микромеханические акселерометры и гироскопы, на данном этапе развития имеют более низкую стабильность масштабного коэффициента, большую нелинейность выходной характеристики, повышенный уровень шумов и более узкий диапазон измерения.

Поэтому актуальной является разработка математических моделей, учитывающих особенности протекающих в микромеханических устройствах процессов и создание на их основе методик синтеза микромеханических приборов с улучшенными характеристиками.

Целью диссертационной работы является повышение точности осевых микромеханических акселерометров, разработка решений, методик анализа и синтеза механической, электрической, структурной и алгоритмической подсистем с целью повышения устойчивости приборов к воздействию инерционных возмущений.

Объект исследования - осевые микромеханические акселерометры, которые используются в информационно-измерительных системах для решения задач ориентации и навигации.

Предметом исследования является электромеханические процессы, отражающие специфические особенности схемных реализаций осевых микромеханических

акселерометров, взаимосвязь параметров этих приборов с их погрешностью в условиях вибраций с целью коррекции показаний.

Методы исследования: основные на числовых методах решения систем дифференциальных уравнений и теории нелинейных колебаний динамических систем.

Научная новизна - впервые проводится компенсация вибрационной погрешности в микромеханических акселерометров по созданной математической модели этой погрешности, с помощью методов избыточных измерений в реальном времени.

Задачи исследования:

1. Осуществление поиска схемно-конструктивных решений по выполнению микромеханических акселерометров, адаптированных к условиям работы повышенным уровнем инерционных возмущений. Проведение анализа работы чувствительного элемента в условиях избранных возмущений.

2. Построение обобщенного математического описания модели погрешности прибора в избранных условиях эксплуатации. Проведение анализа с целью определения возможности выполнения дополнительных измерений для формирования контура компенсации погрешности.

3. Построение математических моделей микромеханического акселерометра для проведения имитационного моделирования. Осуществления, по результатам имитационного моделирования, анализа полученных результатов на предмет повышения эффективности от их применения и выработки направлений возможных дальнейших исследований

Апробация результатов работы.

Положения данной работы и промежуточные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- 1) XII научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Взгляд в будущее приборостроения», г.. Киев, 2018.

Публикации.

1) Компенсация погрешности акселерометра с помощью дополнительной информации о движении инерционной массы / Н.А. Романов, Мироненко П.С. // Взгляд в будущее приборостроения: сборник статей XII научно-практической конференции студентов и аспирантов, 15-16 мая 2018р., Г. Киев, Украина.. - 2018. - С. 61.

2) Исследование датчиков давления резонансного типа /М.О. Романов, Мироненко П.С. // Взгляд в будущее приборостроения: сборник тезисов и докладов Том 1 X научно-практической конференции студентов и аспирантов, 16-17 мая 2017г., Г. Киев, Украина.. - 2017.

3) Сапегин А.Н., Романов Н.А., Бугаев Д.В. Безплатформова инерциальная навигационная система на основе динамично настроенных гироскопов // Научные вести НТУУ «КПИ». - 2016. - №6 - С. 94 - 100. doi: 10.20535 / 1810-0546.2016.6.81064

Ключевые слова: интеллектуальный датчик, осевой микромеханический акселерометр, математическая модель, систематическая погрешность вибрации, программная модель.

ABSTRACT

The explanatory note is 97 pages (of which the main part is 82 pages), it contains 38 figures, 8 tables.

Information-measuring systems serve for measuring various physical quantities, including accelerations, angular and linear velocities and displacements of objects for various purposes, collecting, processing information obtained from measuring devices, and developing control commands.

The development of advanced navigation and motion control systems for various objects is associated with miniaturization of systems, a reduction in their cost, energy consumption and operating costs. Miniaturization of navigation systems requires the creation of small sensors - gyroscopes and accelerometers.

The search for new opportunities for creating inertial sensors with the required characteristics and progress in the field of microelectronics led to the emergence of a new class of instruments - micromechanical sensors. Their appearance marked revolutionary changes in inertial technology.

Relevance of the topic. The transition from precision mechanics to micromechanics does not allow a formal replacement of some by others. This is due to the fact that micromechanical accelerometers and gyroscopes, at this stage of development, have a lower scale factor stability, greater nonlinearity of the output characteristic, an increased noise level and a narrower measurement range.

Therefore, it is actual to develop mathematical models that take into account the features of processes occurring in micromechanical devices and the creation on their basis of techniques for the synthesis of micromechanical devices with improved characteristics.

The aim of the thesis is to improve the accuracy of axial micromechanical accelerometers, develop solutions, methods of analysis and synthesis of mechanical, electrical, structural and algorithmic subsystems in order to improve the stability of instruments to the effects of inertial disturbances.

The object of research is axial micromechanical accelerometers, which are used in information and measurement systems for solving orientation and navigation problems.

The subject of the study is electromechanical processes that reflect the specific features of the circuit implementations of axial micromechanical accelerometers, the interrelation of the parameters of these devices with their error in vibration conditions for the purpose of correction of indications.

Research methods: basic on numerical methods for solving systems of differential equations and the theory of nonlinear oscillations of dynamical systems.

Scientific novelty - for the first time the vibration error in micromechanical accelerometers is compensated for the created mathematical model of this error, using methods of excessive measurements in real time.

Objectives of the study:

1. Implementation of search for circuit-constructive solutions for the implementation of micromechanical accelerometers, adapted to the operating conditions by an increased level of inertial disturbances. Analyzing the operation of a sensitive element under conditions of selected perturbations.

2. Construction of a generalized mathematical description of the instrument error model under selected operating conditions. Carrying out of the analysis with the purpose of definition of an opportunity of performance of additional measurements for formation of a contour of indemnification of an error.

3. Construction of mathematical models of micromechanical accelerometer for simulation simulation. Implementation, based on the results of simulation modeling, analysis of the results obtained to improve efficiency from their application and development of directions for possible further research

Approbation of the results of work.

The provisions of this work and interim results were reported and discussed at the following conferences:

1) HI scientific and practical conference of students and graduate students "A glance at the future of instrument engineering," Kiev, 2018.

Publications.

1) Compensation of the error of the accelerometer with additional information on the motion of the inertial mass / N.A. Romanov, P. Mironenko // A glance at the future of instrument engineering: a collection of articles by the CI scientific and practical conference of students and graduate students, May 15-16, 2018, G. Kiev, Ukraine .. - 2018. - P. 61.

2) Investigation of pressure sensors of resonance type / M.O. Romanov, P. Mironenko // A glance at the future of instrument engineering: a collection of abstracts and reports Volume 1 of the scientific and practical conference of students and graduate students, May 16-17, 2017, G. Kiev, Ukraine .. - 2017.

3) Sapegin AN, Romanov NA, Bugaev DV Platformless inertial navigation system based on dynamically tuned gyroscopes // Scientific reports of NTUU "KPI". - 2016. - No. 6 - P. 94 - 100. doi: 10.20535 / 1810-0546.2016.6.81064

Key words: intelligent sensor, axial micromechanical accelerometer, mathematical model, systematic error of vibration, software model.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	24
ВСТУП.....	25
1. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЧІВ СОН В УМОВАХ ІНЕРЦІЙНИХ ЗБУРЕНЬ.....	27
1.1 Сучасні підходи для забезпечення стійкості вимірювачів СОН	27
1.2 Інтелектуалізація приладів СОН як засіб підвищення їх інформаційних характеристик.....	30
1.3 Аналіз сучасних проектних рішень по використанню інформаційно-надлишкових датчиків.....	35
Висновки до розділу	42
2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ОМА В УМОВАХ ВІБРАЦІЇ 43	
2.1 Конструктивні схеми побудови ОМА	43
2.2 Рівняння руху ЧЕ ОМА.....	50
2.3 Модель систематичної похибки ОМА в умовах інерційних збурень.....	56
Висновки до розділу	59
3. МОДЕЛЮВАННЯ ОМА З КОНТУРОМ КОМПЕНСАЦІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ПОХИБКИ 60	
3.1 Програмна модель акселерометра.....	60
3.2 Перевірка адекватності програмної моделі.....	64
3.3 Дослідження програмної моделі ОМА в умовах вібрації.....	69
3.3.1 Вплив вібрації на ОМА.....	69
3.3.2 Дослідження похибки ОМА з контуром компенсації.	76
Висновки до розділу	79
4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ " ОСЬОВИЙ МІКРОМЕХАНІЧНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР З ДОДАТКОВИМИ ДАТЧИКАМИ ПЕРЕМІЩЕНЬ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ "	80

	23
4.1 Опис ідеї проекту	80
4.1.1 Технологічний аудит ідеї проекту	82
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	82
4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту	87
4.4 Висновки до розділу	91
ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	93
ДОДАТОК А	96
ДОДАТОК Б (Публікації)	98

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

СОН – системи орієнтації і навігації

МЕМС – мікроелектромеханічні системи

ММА – мікромеханічний акселерометр

ОМА – осьовий мікромеханічний акселерометр

ММГ – мікромеханічний гіроскоп

ІМ – інерційна маса

ЧЕ – чутливий елемент

ЦМ – центр мас

ВСТУП

Актуальність теми

Інформаційно-вимірювальні системи служать для вимірювання різних фізичних величин, в тому числі прискорень, кутових і лінійних швидкостей і переміщень об'єктів різного призначення, збору, обробки інформації одержуваної з вимірювальних приладів та вироблення команд управління. Перелік завдань, що вирішуються такими системами, розширюється з кожним роком. Разом з тим, зростають і вимоги до них по розширенню діапазону вимірювань, точності визначення параметрів, мінімізації габаритів і енергоспоживання, особливо, в реальних умовах експлуатації.

Дані вимірювальні системи складаються з трьох основних частин: блоку чутливих елементів, блоків електроніки та мікроконтролерів, що реалізують вимірювання, обробку та формування вихідних сигналів в залежності від виконуваної функціональної задачі [24]. Розробкою алгоритмів функціонування інформаційно-вимірювальних систем визначення параметрів руху об'єктів займаються вже досить давно і на сьогоднішній день можна сказати, що похибка вихідних сигналів даних систем визначається в основному похибкою показань чутливих елементів.

В даний час блоки чутливих елементів інформаційно-вимірювальних і керуючих систем визначення параметрів руху, будуються на базі гіроскопів і акселерометрів, як традиційного виконання, так і у вигляді MEM систем.

На даний момент масо габаритними характеристиками, найбільш повно відповідають сучасним тенденціям розвитку мікромеханічні прилади. Ведуться великі роботи по освоєнню даного напрямку. Дані роботи ускладнені тим, що перехід від приладів точної механіки до мікромеханіки не допускає формальної заміни одних на інші. Це пов'язано з тим, що мікромеханічні акселерометри і гіроскопи, на даному етапі розвитку мають більш низьку стабільність масштабного коефіцієнту, більшу нелінійність вихідної характеристики, підвищений рівень шумів і більш вузький діапазон вимірювання;

Тому актуальною є розробка математичних моделей, що враховують особливості протікання в мікромеханічних приладах процесів, і створення на їх основі методик синтезу мікромеханічних приладів з поліпшеними характеристиками.

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності осьових мікромеханічних акселерометрів, розробка рішень, методик аналізу і синтезу механічної, електричної,

структурної та алгоритмічної підсистем з метою підвищення стійкості приладів до впливу інерційних збурень.

Об'єкт дослідження - осьові мікромеханічні акселерометри, які використовуються в інформаційно-вимірювальних системах для вирішення завдань орієнтації і навігації.

Предметом дослідження є електромеханічні процеси, що відображають специфічні особливості схемних реалізацій осьових мікромеханічних акселерометрів, взаємозв'язок параметрів цих приладів з їх похибкою в умовах вібрацій з метою корекції показань.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в тому, що створені математичні моделі, алгоритми, програми, які можуть бути використані при проектуванні акселерометрів з контуром корекції за додатковою інформацією про рух чутливого елемента.

Задачі дослідження:

1. Здійснення пошуку схемно-конструктивних рішень по виконанню мікромеханічних акселерометрів, адаптованих до умов роботи підвищеним рівнем інерційних збурень. Проведення аналізу роботи чутливого елемента в умовах обраних збурень.

2. Побудова узагальненого математичного опису моделі похибки приладу в обраних умовах експлуатації. Проведення аналізу з метою визначення можливості виконання додаткових вимірів для формування контуру компенсації похибки.

3. Побудова математичних моделей мікромеханічного акселерометра для проведення імітаційного моделювання. Здійснення, за результатами імітаційного моделювання, аналізу отриманих результатів на предмет підвищення ефективності від їх застосування і вироблення напрямків можливих подальших досліджень.

1. СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЧІВ СОН В УМОВАХ ІНЕРЦІЙНИХ ЗБУРЕНЬ

1.1 Сучасні підходи для забезпечення стійкості вимірювачів СОН

Підвищення вібраційної та ударної стійкості МЕМ датчиків приладів і систем орієнтації та навігації в даний час приділяється велика увага. Тому доцільно провести огляд розроблених методів підвищення стійкості цих приладів до механічних впливів, виділити серед них загальні ознаки і, по можливості, звести їх в єдину класифікаційну схему.

Показник стійкості приладів даного типу до механічних зовнішніх чинників вважається одним з ключових показників. З 2002 року в США під егідою оборонного агентства DARPA розробляється програма HERMiT (Harsh Environment Robust Micromechanical Technology). Програма спочатку була орієнтована на створення нової технології контролю внутрішнього середовища мікромеханічних приладів в несприятливих умовах експлуатації. На сьогоднішній день мети цієї програми розширені до пошуку вирішення питань підвищення надійності і довготривалої стабільності ММ датчиків. Одним з найважливіших пунктів цієї програми є, зокрема, забезпечення працездатності ММА при високих значеннях ударів і вібрації [5].

Потреба в мікромеханічних приладах, що зберігають показники точності та інші експлуатаційні характеристики при розширених діапазонах параметрів впливів, актуальна в таких областях, як підземна навігація, будівництво, залізно і автодорожнє господарство, військова техніка. При цьому потрібне забезпечення стійкості (працездатності і збереження показників точності) ММА в особливо жорстких умовах. Розширення існуючої сфери застосування ММА вимагає рішення цілого комплексу специфічних завдань.

Вібро і ударостійкість ММД систем орієнтації і навігації в значній мірі визначається кінематикою рухів чутливого елемента. Тому, в якості основного методу підвищення стійкості до ММА при його проектуванні можна назвати правильний вибір кінематичної схеми руху інерційного тіла. У різних варіантах конструкцій інерційна маса на пружному підвісі може здійснювати поступальний, кутовий або комбінований рух.

Особливо часто для ММА зустрічається класифікація за типом підвісу, умовно розділяються на схеми з поступальним переміщенням інерційної маси по координаті збудження і вимірювання (осьові акселерометри) і з кутовими рухами чутливого елемента (маятникові акселерометри).

Основний метод підвищення стійкості вже розроблених ММА по відношенню до вібраційних впливів є підвищення жорсткості і власних частот коливань інерційної маси по осі чутливості [6]. Підвищення нижчої власної частоти інерційного тіла знижує амплітуду коливань, відповідно, зрушує вправо діапазон чутливості ММА до вібрації [7]. Слід враховувати, що при цьому зменшується коефіцієнт перетворення (чутливість) до вимірюваного прискорення.

Крім власних частот пружного підвісу, істотний вплив на стійкість ММА надає нелінійність пружною характеристики підвісу.

Відповідно, ще один метод підвищення стійкості ММА - зменшення нелінійності підвісу, яка обумовлюється наявністю як згинальної жорсткості торсіонів і жорсткістю на розтягнення-стиснення. Це викликає нелінійну відновлювану силу. Особливістю систем з нелінійної відновлювальною силою є поява кількох (зазвичай двох) стійких періодичних режимів з різними амплітудами автоколивань або вимушених коливань при зміні частоти в певних межах при можливості спонтанного переходу коливальної системи з одного режиму в інший без будь-яких додаткових зовнішніх впливів. Однак при вібраціях і ударах істотно зростає можливість прояву зривів і стрибків амплітуд коливань інерційної маси, вібраційних зсувів нуля, нелінійного резонансу [8]. В даний час запропоновані і реалізовані способи зниження нелінійності УП за рахунок зміни конфігурації його елементів, при цьому коефіцієнт нелінійності знижується до 200 разів [9], що дозволяє підвищити стійкість ММА до навантажень.

Однією з причин появи систематичної похибки мікромеханічного акселерометра при вібрації може бути нерівність початкових ємнісних зазорів. Така нерівність може бути обумовлено декількома факторами:

- технологічним процесом виготовлення кремнієвого маятника, коли швидкості травлення з двох сторін маятника різні;
- деформацією кремнієвого маятника при електростатичному зварюванні чутливого елемента;
- не ідеальна характеристика електронного перетворювача.

Систематичну похибку даного типу в роботі [10] пропонується зменшувати шляхом підгонки регулювальних резисторів електронного перетворювача акселерометра.

При використанні декількох ЧЕ в складі модуля ММА для підвищення вібростійкості запропоновано використовувати метод мажоритарного вибору як алгоритм перетворення вихідного сигналу [11]. За рахунок надлишкового числа однотипних ЧЕ, що володіють різною реакцією на вібраційний вплив, вибирається сигнал того ММА, у котрого відсутній на виході помилковий сигнал високих рівнів.

Для зниження рівнів резонансних піків використовується демпфірування, яке може бути реалізовано заміною вакуумування внутрішньої порожнини на газове середовище або шляхом формування каналу демпфірування електричними зв'язками [12].

Ефективність методів підвищення вібростійкості мікромеханічних приладів є використання сплавів з високим демпфуванням. Ці сплави, на основі металевих систем Fe - AlFe - Cr, відрізняються високим демпфуванням при малих і середніх амплітудах знакозмінного навантаження.

При неможливості підвищення вібростійкості мікромеханічних приладів на рівні чутливого елемента використовують різні амортизуючі пристрої (гумові і пластикові прокладки, спеціальні мікроплатформи. З причини малості розмірів і високих власних частот віброізоляція може бути корисна, починаючи з частоти 1 КГц.

Клас алгоритмічних методів підвищення вібростійкості ММА заснований на використанні додаткових процедур перетворення сигналу в чутливому елементі.

Для визначення реакції ММА на вхідний інерційний вплив з метою подальшої компенсації (коригування вихідного сигналу) ММА може бути доповнений додатковими вимірювачами параметрів вібрації [13] або датчиком переміщень інерційної маси [14,15]. У розширення можливостей згаданих методів можуть бути використані результати калібровки ЧЕ ММА для визначення чутливості ММА до постійних прискорень і вібрацій. Знання коефіцієнтів чутливості до прискорення при подальшій компенсації дозволить підвищити експлуатаційні характеристики ММА при відповідній обробці вихідного сигналу. Застосування таких методів для усунення помилки від високочастотної вібрації пов'язано з труднощами створення складної системи, що забезпечує необхідні фазові співвідношення між сигналом перешкоди і сигналом акселерометра. Згідно з оцінками [16] подібні методи найбільш ефективні при компенсації і впливу постійних або низькочастотних прискорень.

Проаналізувавши існуючі методи підвищення вібраційної стійкості мікромеханічних акселерометрів, можна виділити два основні методи: структурно - конструктивні і програмно - алгоритмічні.

До першої групи відносять методи, в яких мають на увазі зміна параметрів, схем вимірювання та використання амортизаторів. Основні з цих методів засновані на:

- збільшенні жорсткості підвісу;
- збільшенні ступеня демпфірування;
- зменшенні нелінійності пружного підвісу;
- використанні амортизаторів.

Друга група заснована на алгоритмічних методах підвищення стійкості ММА. До них відносять:

- розробка процедур перетворення сигналу;
- використання додаткових вимірювачів для обробки і отримання сигналу в реальному часі.

1.2 Інтелектуалізація приладів СОН як засіб підвищення їх інформаційних характеристик

Терміном «інтелектуальний датчик» в даний час різні розробники називають найрізноманітніші пристрої: від найпростіших, що виконують аналогові і наступні аналогово-цифрові перетворювачі даних з метою передачі на наступний рівень вимірювальної системи, до більш складної, що реалізують розвинену обробку отриманих даних з використанням чисельних методів.

Наприклад, згідно з [2], інтелектуальні датчики - це адаптивні датчики, що містять в собі змінювані по зовнішніх сигналах алгоритми роботи і параметри, і в яких, крім цього, реалізована функція метрологічного самоконтролю.

Іноді під інтелектуальним датчиком розуміють датчик з вбудованою електронікою, що включає в себе: АЦП, мікропроцесор, цифровий сигнальний процесор, систему на кристалі і т. д., і цифровий інтерфейс з підтримкою мережних протоколів для комунікації.

При цьому інтелектуальний датчик може бути включений в бездротову або дротову мережу датчиків, завдяки функції самоідентифікації в мережі поряд з іншими пристроями. Відмінна особливість інтелектуальних датчиків полягає в здатності самовідновлення і самонавчання після одиничного збою. В англійській літературі датчики даного типу називаються «smartsensor». Термін закріпився ще в середині 80-х [3].

Під терміном “ інтелектуальний датчик ” в дисертації будемо розуміти датчик, який має спеціальне інформаційно – програмне оточення, що гарантує заявлені характеристики вимірювача на протязі всього життєвого циклу. Таке оснащення повинно забезпечувати постійну адаптацію датчика до змінних внутрішніх і зовнішніх умов,

проводити контроль, аналіз і синтез окремих складових системи і функціонування датчика в цілому.

Мережевий інтерфейс такого інтелектуального датчика дозволяє не тільки включати його в мережу, але і виробляти його налаштування, конфігурацію, вибирати режим роботи, діагностувати датчик. Можливість віддаленого проведення даних операцій є перевагою інтелектуальних датчиків, вони виявляються простіші як в експлуатації, так і в обслуговуванні.

На рис.1.1. приведена структурна схема такого датчика, стосовно до приладів і систем орієнтації та навігації, де відображені головні блоки інтелектуального датчика, мінімально необхідні, щоб датчик можна було вважати таким.

Вхідний аналоговий сигнал (один або кілька) посилюється, потім перетворюється в цифровий сигнал з метою подальшої обробки. У ПЗУ є дані калібрування, мікропроцесор співвідносить надійшли дані з даними калібрування, коригує їх, і переводить в необхідні одиниці виміру - так компенсується похибка, пов'язана з впливом різних факторів (дрейф нуля, температурний вплив і т. д.), Одночасно оцінюється стан первинного перетворювача, яке може позначитися на достовірності отриманого результату.

Отримана в результаті обробки, інформація передається по цифровому комунікаційному інтерфейсу, по протоколу користувача. Користувач може задавати межі вимірювань і інші параметри датчика, а також отримувати інформацію про поточний стан датчика, і про результати проведених вимірювань.

Інтегральні схеми (системи на кристалі) сьогоdnішнього дня включають в себе крім мікропроцесора ще й пам'ять, і периферійні пристрої, такі як прецизійні цифро-аналогові і аналого-цифрові перетворювачі, таймери, контролери Ethernet, USB і послідовного порту. Як приклади таких інтегральних мікросхем можна привести ADuC8xx від AnalogDevices, AT91RM9200 від Atmel, MSC12xx від TexasInstruments.

Розподілені мережі з інтелектуальних датчиків дозволяють здійснювати моніторинг і контроль параметрів в реальному часі на складному промисловому обладнанні, де технологічні процеси весь час динамічно змінюють свій стан.

Єдиний мережевий стандарт для інтелектуальних датчиків відсутній, і це є свого роду перешкодою для активного розвитку бездротових і дротових мереж датчиків. Проте, сьогодні застосовуються багато інтерфейси: RS-485, 4-20 мА, HART, IEEE-488, USB; працюють промислові мережі: ProfiBus, CANbus, Fieldbus, LIN, DeviceNet, Modbus, Interbus.

Такий стан речей породило питання вибору перед виробниками датчиків, бо не вигідно економічно для кожного протоколу мережі випускати окремий датчик однієї і тієї

ж модифікації. Тим часом, поява групи стандартів IEEE +1451 «Smart Transducer Interface Standards» пом'якшив умови, інтерфейс між датчиком і мережею уніфікується. Стандарти покликані прискорити адаптацію - від окремих датчиків до мереж датчиків, кілька підгруп визначають програмні і апаратні методи включення датчиків в мережу

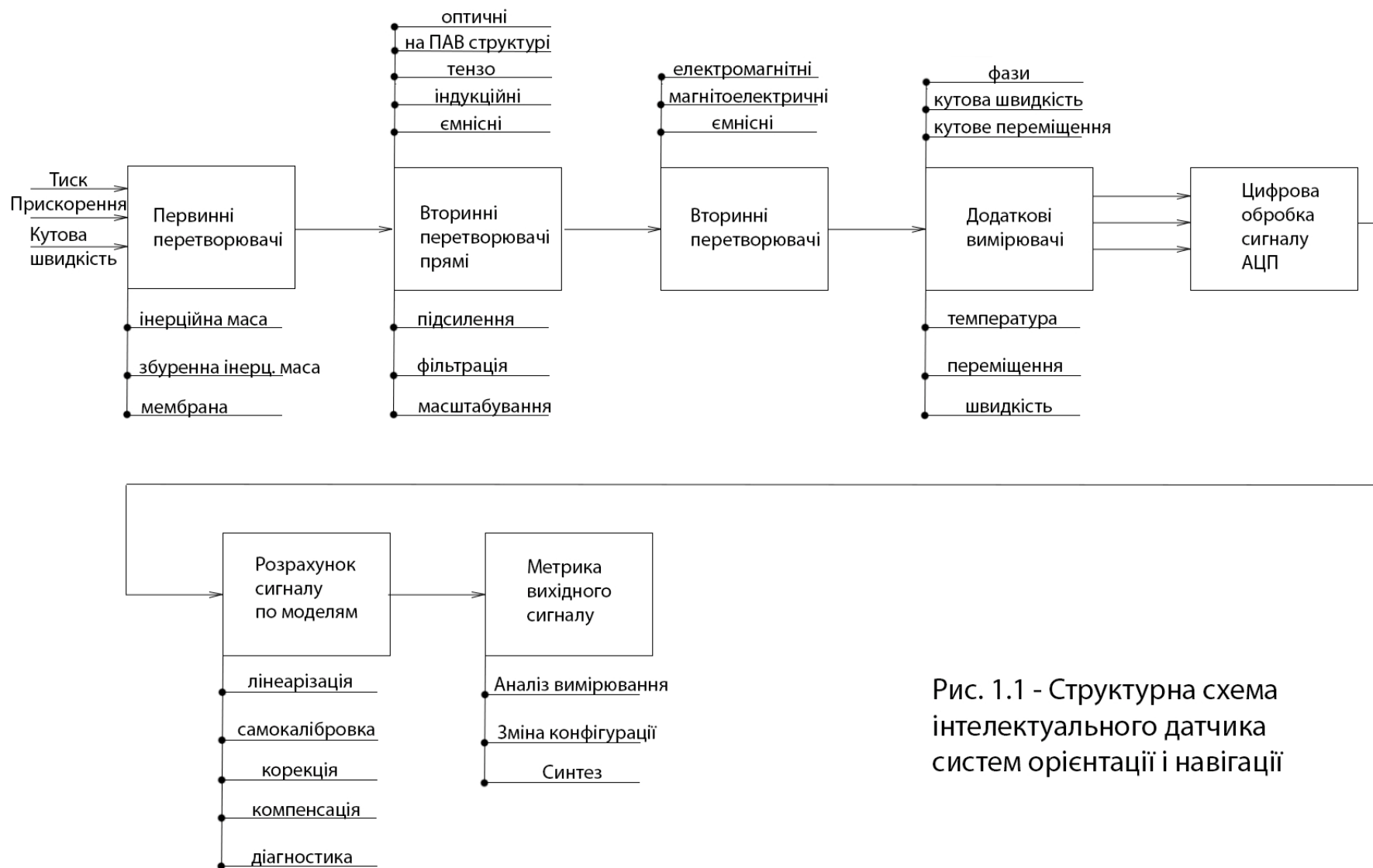


Рис. 1.1 - Структурна схема інтелектуального датчика систем орієнтації і навігації

Два класу пристроїв описані в стандартах IEEE 1451.1 і IEEE 1451.2. Перший стандарт визначає уніфікований інтерфейс для підключення інтелектуальних датчиків до мережі, це специфікація модуля NCAP, який являє собою своєрідний міст між модулем STIM самого датчика і зовнішньою мережею.

Другий визначає цифровий інтерфейс для підключення до мережного адаптера модуля інтелектуального перетворювача STIM. Концепція TEDS передбачає електронний паспорт датчика, для можливості його самоідентифікації в мережі. TEDS включає в себе: дату випуску, код моделі, серійний номер, калібрувальні дані, дату калібрування, одиниці виміру. Виходить аналог plug and play для датчиків і мереж, проста експлуатація та заміна гарантовані. Практично всі виробники інтелектуальних датчиків вже підтримують дані стандарти.

Головне, що дає об'єднання датчиків в мережу - можливість доступу до інформації про вимірювання за допомогою ПО, незалежно від типу датчика і від того, як організована конкретна мережа. Виходить мережу, яка служить містком між датчиками і користувачем (ЕОМ), яка допомагає вирішувати технологічні завдання.

Інтелектуальна вимірювальна система може бути представлена трьома рівнями: рівень датчика, рівень мережі, рівень програмного забезпечення.

Перший рівень - рівень самого датчика, датчик з комунікаційним протоколом.

Другий рівень - рівень мережі датчиків, місток між предметом роботи датчика і процесом вирішення завдання.

Третій рівень - рівень програмного забезпечення, що передбачає взаємодію системи з користувачем. Програмне забезпечення може бути абсолютно різним, адже воно не прив'язане безпосередньо до цифрового інтерфейсу датчиків. В системі можливі і підрівні, пов'язані з підсистемами.

В останні роки розвиток інтелектуальних датчиків йде по декількох напрямках.

1. Вдосконалення нових методів вимірювань, що вимагають потужної обчислювальної обробки всередині датчика. Це дає можливість мати у своєму розпорядженні сенсори за межами вимірюваного середовища, підвищити таким чином стабільність показань, знизити втрати при експлуатації.

2. Використання сенсорів, які не мають рухомих частин. Це підвищує надійність і спрощує обслуговування. При цьому конструкція об'єкта вимірювання не позначається на роботі датчика, здешевлюється установка.

3. Використання бездротових датчиків. Рухомі об'єкти, розподілені в просторі, вимагають бездротового зв'язку із засобами їх автоматики з контролерами. Радіотехнічні

пристрої дешевшають, їх якість підвищується, бездротовий зв'язок часто економічніше провідний. Кожен датчик може передавати інформацію протягом свого індивідуального тимчасового інтервалу (TDMA), на своїй частоті (FDMA), або з власним кодуванням (CDMA).

4. Мініатюризація датчиків, які можна вбудовувати в промислове обладнання, і кошти автоматизації стануть внутрішньої невід'ємною частиною виробу, що виконує технологічний процес, а не зовнішнім доповненням. Датчик об'ємом в кілька кубічних міліметрів виміряє температуру, тиск, вологість і т. д., зробить первинну обробку даних, передасть інформацію в мережу. Точність і якість роботи приладів підвищиться.

5. Використання багато сенсорних датчиків. Один загальний перетворювач порівняє і обробить дані з декількох сенсорів [26], тобто застосування не кілька окремих датчиків, а один, але багатофункціональний.

6. Нарешті, постійне підвищення ступеня інтелектуальності датчиків.

В даний час інтелектуальні датчики стають все більш багатофункціональними засобами автоматизації, для яких навіть сам термін «датчик» стає вже неповним і просто умовним.

Для визначення сучасного рівня і основних функцій інтелектуальних датчиків систем орієнтації і навігації в роботі був проведений аналіз рішень, пропонованих виробниками цих пристроїв.

Основними реалізованими функціями є:

- лінеаризація функцій перетворення;
- самотестування;
- самокалібрування;
- висока стабільність метрологічних характеристик;
- мінімальне енергоспоживання, управління живленням;
- стійкість до впливу внутрішніх і зовнішніх перешкод;
- підвищення точності, корекція похибок, накопичення даних;
- можливість адаптування до індивідуальних особливостей дрейфу шляхом самонавчання.

1.3 Аналіз сучасних проектних рішень по використанню інформаційно-надлишкових датчиків

Проблема достовірності використовуваної в системах орієнтації і навігації вимірювальної інформації щорічно загострюється в зв'язку з ростом кількості

керованих об'єктів і витрат на їх обслуговування. Значна частка порушень в роботі цих приладів пов'язана з використанням результатів вимірювань, похибка яких перевищує допустимі межі.

Традиційні методи вимірювань не дозволяють мінімізувати ризик помилкових рішень. На основі аналогії між засобом вимірювань і системою зв'язку в роботі [27] показано можливість використання досягнень теорії зв'язку для підвищення точності вимірювань. У системах зв'язку надлишковість переданої інформації дозволяє послабити вплив перешкод, а в датчиках і їх системах, що входять до складу приладів СОН, надлишкова вимірювальна інформація може дозволити організувати автоматичну корекцію похибки. Відомий підхід тут - використання надмірності, яка штучно вводиться або є в переданому сигналі, для підвищення достовірності інформації при впливі перешкод.

Введення надлишкових компонентів і зв'язків, без яких неможливо збагатити вимірювальну інформацію, здавалося б, повинно знизити надійність систем вимірювань. Але ефективність саме такого підходу доводить аналогія розвитку вимірювальної техніки і біологічних сенсорних систем [28].

Удосконалення біологічних "систем управління" в ході еволюції супроводжувалося зростанням числа різних компонентів, їх утворюють, ускладненням структурних зв'язків між цими компонентами. Потреба оцінювати стан організму і прогнозувати майбутні зміни для вирішення завдання збереження життя привела до народження інтелекту, а в нашому випадку - до використання інтелектуальних датчиків і систем.

Відповідно, еволюція систем вимірювань повинна супроводжуватися ускладненням їх структури, введенням елементів штучного інтелекту. В сукупності, все це повинно багаторазово продовжити "цикл життя" систем вимірювань без їх частого обслуговування.

Цей метод вимірювань спирається на досягнення теорій перешкодостійкого зв'язку, інваріантності і структурних методів підвищення точності, в яких надлишковість використовується для ослаблення впливу певних чинників на передану інформацію або результат вимірювання. Введення надлишковості має на меті виділення похибки, обумовленої такого роду впливами, і подальшої її компенсації.

Підвищення точності систем вимірювання параметрів орієнтації та навігації також може бути організовано на основі цього методу вимірювань. Надлишковість при цьому може бути:

- структурна (просторова);

- часова;
- функціональна (інформаційна);
- алгоритмічна;
- комбінована.

Структурна надлишковість означає використання додаткових заходів або перетворювачів порівняно з мінімально необхідним їх числом.

Одним із прикладів введення структурної надлишковості є мажоритарна схема включення чутливих елементів: три акселерометра і три датчика кутової швидкості по кожній осі системи координат, пов'язаної з малим космічним апаратом [4]. Зазначена схема забезпечує повну діагностику за глибиною до місця відмови при забезпеченні виконання наступних умов:

- 1) кількість вимірювачів забезпечує виконання критерію структурної діагностики вимірювального блоку;
- 2) для вирішення завдань діагностування та відновлення з метою мінімізації похибок вимірювання необхідно використовувати інформацію, отриману в вимірювальному блоці від однотипних датчиків, що мають однакові характеристики по точності, без залучення зовнішніх вимірювань;
- 3) надлишковість не повинна впливати на основні функціональні завдання, які вирішуються вимірювальною системою.

Часова надлишковість передбачає проводити додаткові операції вимірювань, що проводяться з інтервалом часу, меншим мінімально необхідним, або в смузі частот більше максимально необхідної. Один з можливих варіантів використання методу тимчасової надлишковості з метою усунення вібраційної похибки мікромеханічного акселерометра описаний в роботі [29]. Ідея методу полягає в тому, що для збільшення площі датчика переміщень і датчика сили здійснюється по чергове використання в часі цих пристроїв з сумарною площиною електродів.

Функціональна надлишковість основа на використанні додаткової залежності між вимірюваною величиною і вихідним сигналом.

В роботі [17] представленої структури диференціального ємнісного датчика переміщень, особливістю якого є наявність додаткового вихідного сигналу, пропорційного зазору між вимірювальними електродами і ІТ, і аналізів можливості використання цього додаткового сигналу для підвищення точності мікромеханічних датчиків. Для оцінки впливу зовнішніх впливів на різні параметри ММГ в якості об'єкта дослідження було обрано гіроскоп RR-типу розробки ЦНДІ «Електроприлад». Конструктивна схема і принцип дії пояснюються рис. 1.2

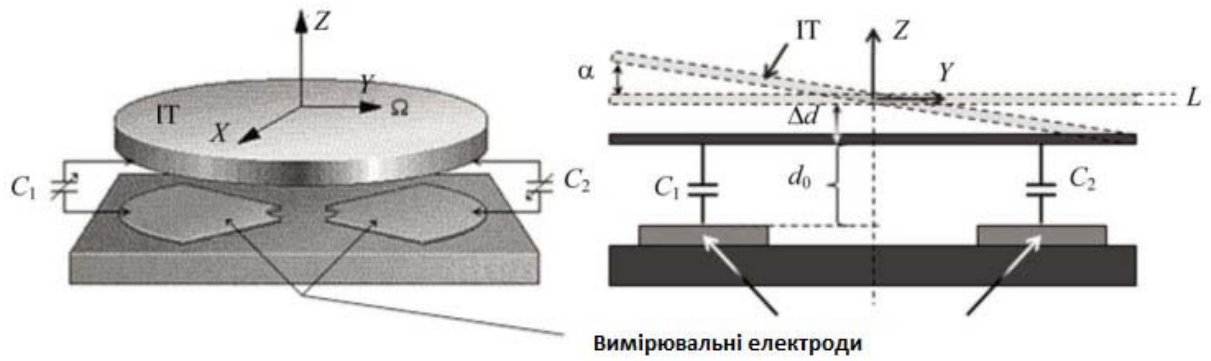


Рис 1.2 - Конструктивна схема ММГ

Інерційний тіло на пружному підвісі під управлінням системи розгону здійснює коливальні рухи навколо осі первинних коливань Z . При появі кутової швидкості основи Ω по осі чутливості Y виникають моменти сил Коріоліса, що викликають вторинні кутові коливання ІТ навколо осі X . При відхиленні ротора на кут α , пропорційний діючій кутової швидкості, будуть змінюватися відстані між вимірювальними електродами і ІТ. Вплив таких зовнішніх факторів, як температури, вібрації, лінійного прискорення і тиску, буде приводити до зміни початкового зазору d_0 на величину Δd .

Іншими словами, при зміні величини зазору один і той же нахил ротора буде викликати різні зміни ємностей, що призведе до зміни масштабного коефіцієнта датчиків кута і моменту. Для цього необхідно компенсувати цю зміну, щоб масштабний коефіцієнт датчиків залишався постійним.

Для електродів, що мають форму обмеженого сектора (рис. 1.3), ємності C_1 і C_2 можуть бути визначені за формулами:

$$C_1(\alpha, \Delta d) = \varepsilon_0 \cos(\alpha) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\Psi_{\min}}^{\Psi_{\max}} \frac{r}{(d_0 + \Delta d) + r \cos(\Theta) \sin(\alpha)} d\Theta dr, \quad (1.9)$$

$$C_2(\alpha, \Delta d) = \varepsilon_0 \cos(\alpha) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\Psi_{\min}}^{\Psi_{\max}} \frac{r}{(d_0 + \Delta d) - r \cos(\Theta) \sin(\alpha)} d\Theta dr \quad (1.10)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} [\text{Ф/м}]$ - електрична постійна; α - кут повороту ІТ навколо вторинної осі, [рад];

d_0 - зазор між ІТ і вимірювальними електродами в нейтральному положенні, [м];

R_{\max} і R_{\min} - відповідно внутрішній і зовнішній радіуси розглянутого електрода, [м];

Ψ - кут сектора електрода, [град].

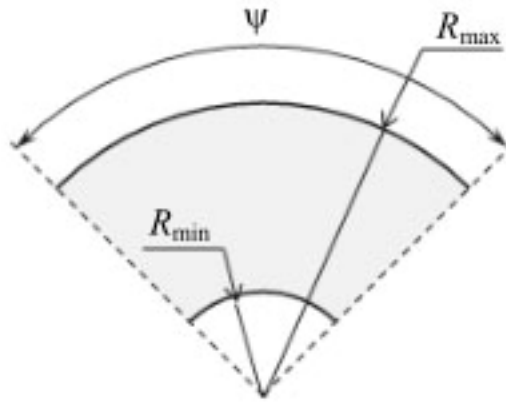


Рис. 1.3 - Форма вимірювальних електродів

Для того щоб оцінити вплив лінійних прискорень на зміну зазору, можна скористатися другим законом Ньютона і законом Гука:

$$(K_{\text{мех}0z} - K_{\text{ел}}) \Delta d = m a_{0z} \quad (1.11)$$

де m маса ІТ, [кг];

a_{0z} - прискорення, яке діє вздовж осі Z, [м/с²];

$K_{\text{мех}0z}$ - лінійна механічна жорсткість уздовж осі Z, [Н / м];

$K_{\text{ел}}$ - електростатична жорсткість, [Н / м].

У табл. 1.1 наведена залежність зміни зазору від діючого прискорення. Наприклад, для зазору $d_0 = 2$ мкм при впливі прискорення, рівного 300 g, зазор зміниться на 0,6 мкм, що призведе до зміни масштабного коефіцієнта датчика кута і масштабного коефіцієнта гіроскопа на 30%.

Таблиця 1.1 Залежність зміни зазору від діючого прискорення

Лінійне прискорення вздовж осі Z, [м/с ²]	Зміна зазору, мкм
10g	0,023
50g	0,115
300g	0,69

На величину зазору впливає і температура, так як її зміна приводить до зміни розмірів ІТ. Використовуючи коефіцієнт розширення кремнію $\alpha_L = 2,33 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ і

товщину ІТ $L = 60 \text{ мкм}$, можна визначити лінійне розширення матеріалу при зміні температури ΔT (табл. 1.2).

Таблиця 1.2. Залежність розширення ІТ при зміні температури

Зміна температури, °C	Розширення ІТ
5	0.7
20	2.8
30	4.2

У мікромеханічних датчиках прямого перетворення для вирішення задачі компенсації пропонується алгоритмічний підхід. Для цього необхідно вимірювати не тільки диференціальне зміна ємності, але і синфазне. При цьому пропонується змінити існуючу структурну схему перетворювача, яка показана на рис. 1.4. На вимірювальні ємності C_1 і C_2 , які представляють собою ємнісний міст, з генератора сигналу (ГС) подається напруга, що змінюється за гармонійним законом.

При цьому через ємності будуть протікати струми I_1 та I_2 , які складаються з двох компонент:

$$I_1 = I(C_0) + I(\Delta C) \quad (1.12)$$

$$I_2 = I(C_0) - I(\Delta C) \quad (1.13)$$

де $I(C_0)$ - струм, пропорційний величині зазору;

$I(\Delta C)$ - струм, який визначається корисною зміною ємності.

Ці струми за допомогою трансрезистивних підсилювачів K_1 і K_2 перетворюються в напруги U_1 та U_2 відповідно, які також складаються з двох компонент $U(C_0)$ та $U(\Delta C)$.

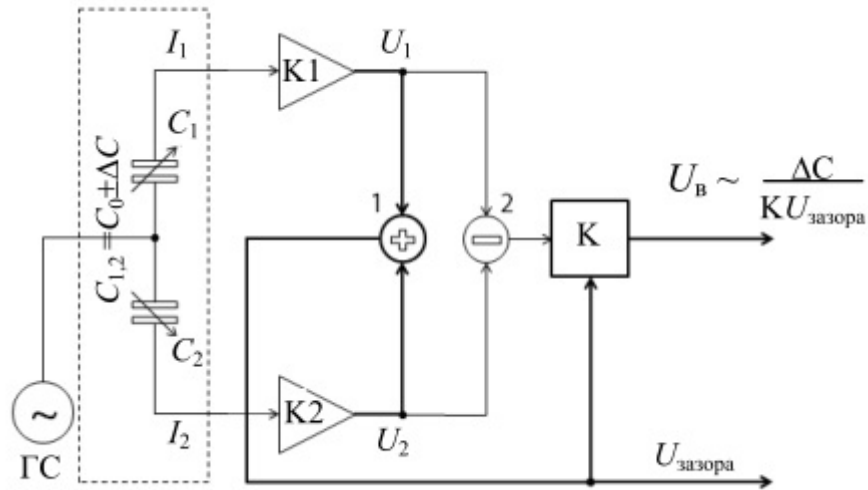


Рис. 1.4 - Структурна схема диференціального ємнісного датчика

Після вирахування в точці 2 напруга дорівнюватиме:

$$U_1 - U_2 = (U(C_0) + U(\Delta C)) - U(\Delta C) = 2U(\Delta C) \quad (1.14)$$

Але, так як при зміні зазору змінюється коефіцієнт перетворення датчика кута, то різниця напруги буде залежати і від величини зазору, яку можна визначити, якщо скласти напруги U_1 та U_2 в точці 1:

$$U_1 + U_2 = 2U(C_0) \quad (1.15)$$

Отримана напруга залежить тільки від компоненти, пропорційній величині зазору. Вихідний сигнал диференціального ємнісного датчика визначається відношенням сигналу в точці 2 до сигналу на виході суматора 1 (блок компенсації К). При цьому отриманий вихідний сигнал не залежить від зазору.

У разі, коли мікромеханічні датчики працюють за принципом компенсації вхідного впливу, необхідно вживати додаткових заходів, так як при зміні зазору змінюються коефіцієнти передачі силових електродів.

На рис. 1.5 приведена структурна схема датчика зі зворотним зв'язком, що включає: чутливий елемент ЧЕ, датчик переміщень з додатковим виходом про зміну зазору, регулятор і силові електроди, на яких створюється момент управління $M_{упр}$.

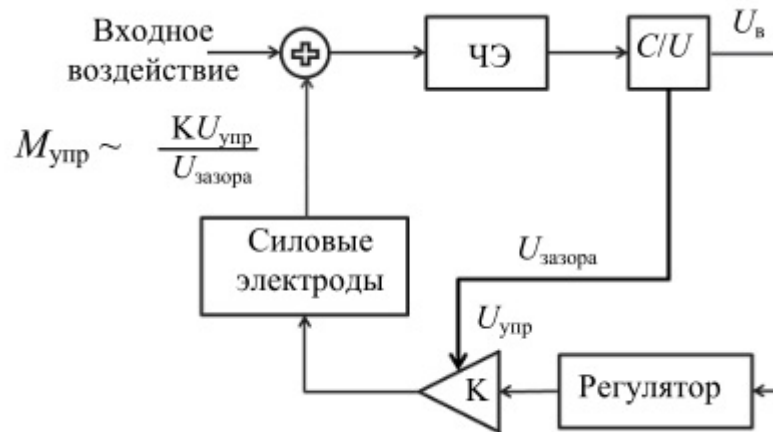


Рис. 1.5 - Використання сигналу в датчиках компенсаційного типу

Зміна коефіцієнтів передачі силових електродів при постійній вхідній дії призводить до зміни сигналу управління $U_{упр}$, який є інформаційним, і появи помилки вимірювання.

За допомогою додаткового сигналу, пропорційного зміни зазору, і блоку компенсації К в зворотному зв'язку датчика підтримується постійний коефіцієнт передачі силових електродів. В цьому випадку масштабний коефіцієнт датчика не залежить від зазору.

В дисертаційній роботі пропонується для підвищення стійкості осьового мікромеханічного акселерометру ввести в його структуру додаткові датчики для виміру вібро-швидкості, і за допомогою алгоритму обробки надлишкової інформації по створеній математичній моделі вібраційної похибки компенсувати її в реальному часі.

Висновки до розділу

1. В розділі було проаналізовано стан і перспективи підвищення функціональних характеристик вимірювачів СОН в умовах інерційних збурень.
2. Детально розібрано сучасні підходи для забезпечення стійкості вимірювачів СОН. А саме розглянуто інтелектуалізація приладів СОН як засіб підвищення їх інформаційних характеристик.
3. Приведені сучасні проектні рішення по використанню інформаційно-надлишкових датчиків, та обрано основну стратегію, за допомогою якої буде забезпечуватись компенсація вібраційної похибки в реальному часі.

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ОМА В УМОВАХ ВІБРАЦІЇ

Розробка перспективних систем навігації і управління рухом об'єктів різного призначення пов'язана з мініатюризацією систем, зниженням їх вартості, енергоспоживання і експлуатаційних витрат. Мініатюризація навігаційних систем вимагає створення малогабаритних датчиків - гіроскопів і акселерометрів.

Пошук нових можливостей створення інерційних датчиків з необхідними характеристиками і прогрес в області мікроелектроніки привели до появи нового класу приладів - мікромеханічних датчиків (MEM). Їх поява ознаменувало революційні зміни в інерціальній технології.

2.1 Конструктивні схеми побудови ОМА

Мікромеханічні акселерометри - перспективні прилади сучасної мікросистемної техніки. Мікромеханічні акселерометри характеризуються унікально малими масою і габаритами, низьким споживанням електроенергії, можливістю функціонування в жорстких умовах експлуатації і на кілька порядків меншою вартістю, ніж їхні традиційні аналоги. Область застосування ММА надзвичайно широка. ММА використовуються в малогабаритних системах орієнтації і навігації для суден, літальних апаратів різного призначення, в системах управління автомобілями, скважних приладах, системах управління артилерійської снарядами.

Мікромеханічними акселерометри (ММА) класифікуються точно так само як і звичайні механічні акселерометри:

- 1) мікромеханічні акселерометри L-типу або осьові акселерометри.
- 2) мікромеханічні акселерометри R-типу або маятникові акселерометри.

Тут L = Linear є лінійне переміщення інерційної маси (IM). R = Rotation - обертальний рух маси.

Також ММА можуть бути прямого виміру і компенсаційними.

Компенсаційні (зі зворотним зв'язком). У цих приладах здійснюється автоматичне урівноваження сили інерції ЧЕ іншою силою, яку можна створити і виміряти з необхідною точністю. Акселерометри подібного типу представляють собою вимірювальну

систему з негативним зворотним зв'язком, яка дозволяє зменшити значення відносної похибки.

Компенсаційні акселерометри, звичайно, мають кращі точності і динамічні характеристики, але набагато складніше і дорожче. Але ж одна з переваг ММА - це їх дешевизна. Тому практично всі вироблені нині ММА є акселерометрами прямого виміру.

У акселерометра виділяють вісь чутливості і перпендикулярні до неї поперечні осі. Ось чутливості - це вісь, в напрямку якої можливе переміщення ІМ, обумовлене конструкцією підвісу. Саме в напрямку цієї осі акселерометр повинен вимірювати прискорення. Акселерометри з однією віссю чутливості називають однокомпонентними або одноосьовими.

Є ММА, у яких ІМ може переміщатися в напрямку двох або трьох взаємно-перпендикулярних осей. Відповідно, такі ММА мають 2 або 3 осі чутливості і тому називаються двохосними і тривісними. У таких акселерометрах ускладнюється система вимірювання переміщення ІМ. В існуючих трьох-вісних ММА характеристики по третій осі вимірювання гірше, ніж за першими двома. Деякі виробники таких акселерометрів чесно вказують в специфікації одні характеристики для перших двох осей (X, Y) і трохи гірше для третьої осі.

Мікромеханічні акселерометри осьового типу (ОМА) характеризуються лінійним переміщенням інерційної маси під дією сили інерції при лінійному прискоренні.

На рис.2.1 представлені принципові схеми побудови осьових ММА прямого виміру з однією віссю чутливості: спрямованої перпендикулярно площині малюнка (вісь Z). На малюнку позначені:

- 1 - інерційна маса;
- 2 - пружні елементи підвісу;
- 3 - підстава (підкладка).

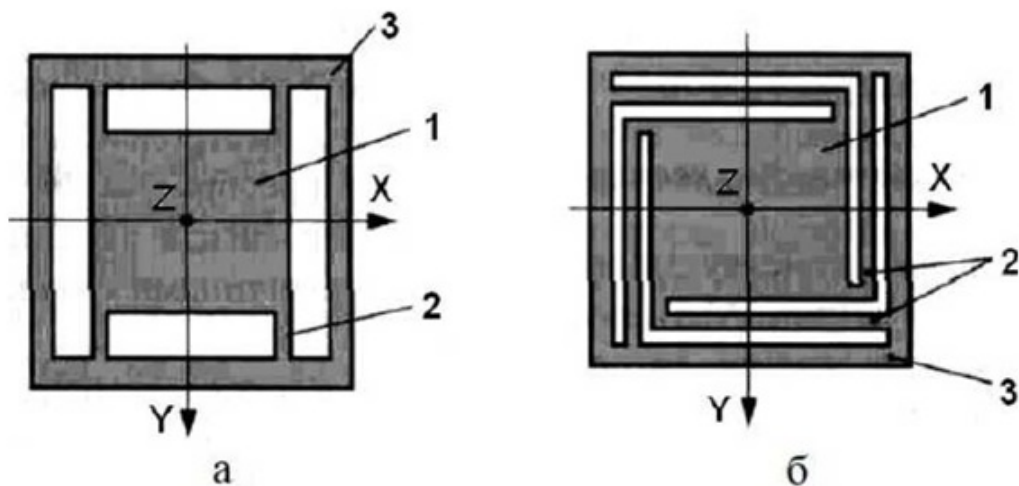


Рис 2.1 - Принципові схеми побудови осьових ММА прямого виміру з однією віссю чутливості: а - з паралельним підвісом; б - з 2-образним підвісом.

Принцип роботи таких ММА полягає в наступному. Під дією лінійного прискорення, спрямованого уздовж осі чутливості Z , інерційна маса за рахунок вигину пружних елементів підвісу робить лінійне переміщення в напрямку, перпендикулярному площині підкладки. Величина переміщення ІМ буде пропорційна величині прискорення.

Вихідний сигнал формується ємністним датчиком переміщень, одним з електродів якого є сама ІМ, а другий електрод розташований на підставі (підкладці).

Особливістю схеми побудови ММА, представленій на рис.2.1 а, є можливість вимірювання лінійного прискорення по двох осях чутливості X і Z .

За способом знімання вихідного сигналу ММА діляться на:

- ємнісні;
- перетворювачі на поверхнево-акустичних хвилях (ПАХ);
- перетворювачі на р-п переходах.

Ємнісні датчики використовуються для вирішення широкого кола завдань - цей тип пристроїв дозволяє визначати положення, переміщення, прискорення і багато інших параметрів. Застосування технології місткості в автоелектроніці асоціюється саме з акселерометром, які отримали найбільш широке поширення завдяки їх високій чутливості, стабільності при детектуванні статичного прискорення, малого дрейфу, низькою температурної чутливості, малої споживаної потужності, високої надійності, хорошим шумовим властивостями, задовільної точності, низькою ціною. Принцип дії ємнісного акселерометра заснований на зміні ємності чутливого елемента з електродами і переміщенні інерційної маси, що є його частиною, під дією прискорення.

Основною областю застосування струнних є контроль геометричних параметрів виробів в машинобудуванні. Принцип дії струнних перетворювачів заснований на використанні залежності частоти власних поперечних коливань струни від її поздовжнього натягу.

Перетворювачі на ПАХ-резонаторах. При впливі прискорення консоль, навантажена масою, відчуває деформації вигину, які супроводжуються розтягненням і стисненням її протилежних поверхонь. На них нанесені резонатори, утворені відбивачами і зустрічно-штирові перетворювачами. Виникаючі деформації призводять до зміни власних частот резонаторів. На верхній частині пластини вони збільшуються як за рахунок геометричного подовження консолі, так і за рахунок зменшення фазової швидкості, варіації якої визначаються зміною пружних модулів (їх зменшенням). На

протилежному боці мають місце деформації стиснення, які призводять до протилежного зсуву власної частоти резонатора.

В акселерометрах, де використовується ПАХ, коли виникає прискорення на консоль 1 (рис.2.2), навантажена маса 2, починає відчувати на собі деформацію вигину, яка супроводжується розтягненням і стисненням її протилежних поверхонь.

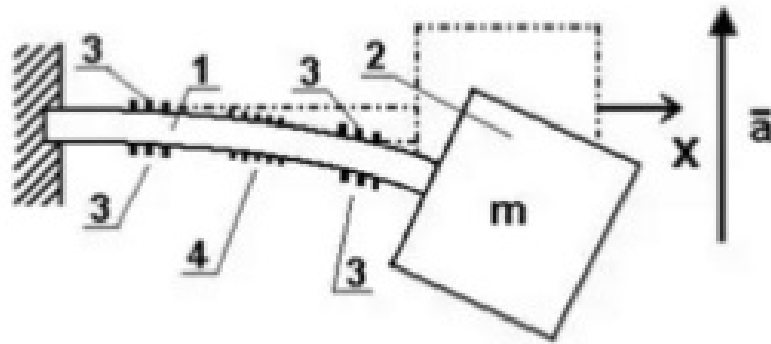


Рис. 2.2 - Схема ЧЕ мікроакселерометра: 1-консоль; 2 - інерційна маса; 3 – відбивачі ПАХ-резонатора; 4 – штирові пластини.

На поверхні розташовані резонатори, які утворилися за допомогою відбивачів 3 і зустрічно-штирові перетворювачами 4. Коли з'являються деформації, то вони призводять до того що відбувається зміна власної частоти резонатора. Зверху на пластині вони збільшуються через подовження пластини і так само впливає ще зменшення фазової швидкості. А на протилежній частині відбувається деформація стиснення, і це призводить до зсуву в протилежному напрямку власної частоти резонатора. ПАХ-резонатори служать для установки частоти. Коли змінюється частота в них, то ця частота пропорційна заданому прискоренню.

Перетворювач на р-п-переходах представлений на рис. 2.3.

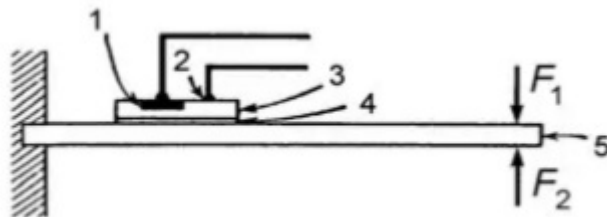


Рис. 2.3 - Тензометр на тунельному діоді

Тензодатчик є як тунельний діод з омичним контактом, який закріплений на консольному покритті. Коли кінчик дроту який був зроблений з алюмінію додали 1% бору в пластину з кремнію, то був отриманий тунельний р-п-перехід. Кремнієва платівка сконструйована в консоль таким чином, що б вона відповідала кристало графічній площині. Тензодатчик був закріплений на консольному покритті зі складу берилієвої бронзи епоксидної ізолюючої смолою. Як харчування для пристрою використовується джерело постійного струму. Коли сила F_1 надходить на консоль, то тунельний діод р-п-переходу відчуває одновісне розтягнення в площині переходу. Таку ж дію відбувається, коли консоль відчуває на собі силу F_2 , тоді перехід буде отримувати напруга стиснення. В результаті дії цих напруг вольт-амперна характеристика діода змінюється.

Характерним прикладом осьового акселерометра з ємнісним перетворювачем є модель ADXL50 (даний вид представлений на рис. 2.4, вид зверху, вісь вимірювання вертикальна), яка представляє покоління мікромеханічних монолітних акселерометрів.

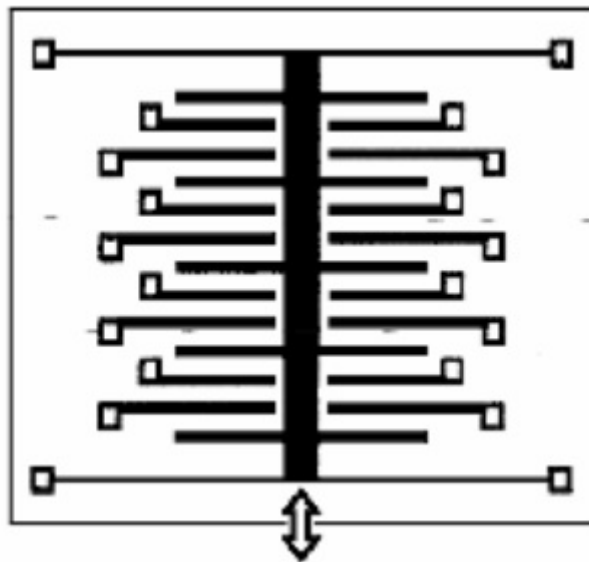


Рис. 2.4 - Осьової ємнісний акселерометр ADXL50

В основі структури датчика лежить диференційний конденсатор, який виконаний у вигляді багато штирьових електродів. На кожній стороні центральної рухомої частини розташована ІМ, яка встановлена таким чином, щоб при впливі прискорення вона поступально переміщалася на пружних підвісах, внаслідок чого змінюються торцеві зазори в пластинах гребінчатого конденсатора.

Компанією BoschSensortec був розроблений мініатюрний тривісний акселерометр SMB380 (рис. 2.5).



Рис. 2.5 - Акселерометр SMB380

Акселерометри SMB380 призначені для вимірювання малого прискорення з виводом даних через інтерфейс SPI / I2C. Вони вимірюють прискорення, прикладене перпендикулярно осях корпусу. Схема обробки сигналів перетворюється зміною ємності, що відбувається при зміщенні підресорених мас усередині корпусу із застосуванням диференціального принципу. Дане рішення дозволяє отримати високу роздільну здатність і широкий динамічний діапазон при малому рівні власних шумів. За допомогою датчика SMB380 можна вимірювати нахил, рух і вібрацію в портативних пристроях, мобільних телефонах, пристроях комп'ютерної периферії, інтерфейси людина-машина, установках віртуальної реальності і в ігрових приставках, а також в системах позиціонування і стабілізації зображення. Мініатюрний акселерометр має розміри 3x3x0.9 мм, його номінали вимірювання прискорень $\pm g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$. Він здатний працювати в широкому діапазоні температур від -45° до $+85^{\circ}$.

Фірмою Freescale Semiconductor був спроектований найменший акселерометр з цифровим виходом. Розміри новинки на 77% менше, ніж у попередніх моделей, що робить MMA 7450L найтоншим на сьогоднішній день приладом такого роду (рис. 2.6).

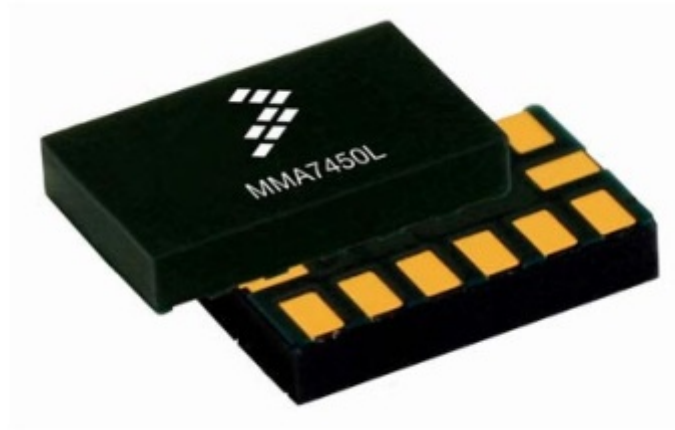


Рис. 2.6 - Акселерометр 7450L фірми Freescale Semiconductor

Товщина корпусу акселерометра становить всього лише 0,8 мм. Прилад добре підходить для застосування в мініатюрних електронних пристроях, де з його допомогою можна організувати інтерфейс користувача, побудований на фіксації рухів в просторі. Виріб розрахований на інтеграцію з мікропроцесорами і мікроконтролерами. У даного акселерометра немає необхідності в проміжних перетвореннях. У свою чергу, це позитивно позначається на загальних конструкціях: спрощується схема, скорочується кількість компонентів, знижується енергоспоживання і габарити. Цікавим прикладом застосування MMA 7450L може бути установка в парі з бездротовою платформою: це дозволяє створювати найрізноманітніші пристрої - від ігрових контролерів до схем захисту накопичувачів на жорстких дисках від падіння.

Сучасні технології дозволяють не тільки масово виробляти окремі мікросенсиори, але і збирати на їх основі мікромеханічні системи (мікромеханічні модулі), які включають в себе акселерометри і мікромеханічні гіроскопи і інші MEMS-датчики (рис. 2.7).



Рис 2.7 - Мікромеханічні модулі

Просування комерційної області в технології MEMS слід через великі продажів в сегменті споживчої електроніки. Це призвело до того що інерціальні датчики взяли від комбі-датчиків з 6, 7, 9, або 10 ступенями свободи, які здатні інтегруватися з мікроконтролерами і ПО для об'єднання сенсорних даних.

Високий ступінь мініатюризації, інтеграції, інтелектуальності і функціональності MEMS комбі-датчиків інерції став відкритий для доступу ряд вирішення типових за дач, які можуть вирішувати датчики тактичного класу або вище - що в першу чергу залежить від рівня характеристик, які здатна забезпечити MEMS технологія.

В даній дисертаційній роботі обрана класична конструктивна схема осьового мікромеханічного акселерометру зі зміщеним центром мас (рис.2.8), і з ємнісними датчиками виміру переміщень чутливого елементу (ІН).

2.2 Рівняння руху ЧЕ ОМА

Рівняння руху будемо виводити з допущенням, що центр мас (ЦМ, точка С) пластини зміщений у площинні XZ щодо геометричного центру (точка О) на величини l_x, l_z (рис. 2.8, а). ЦМ перебуває в площині симетрії пластини (рис. 2.8, б). При дії сил ma_y та mg (m - маса пластини), обумовлених вимірюваним прискоренням a_y і прискоренням g сили тяжіння, переміщення пластини визначається лінійною y та кутовими α, β координатами (рис. 2.8, в), розглянуто в [21].

Поточне положення ІМ (пластини) визначене в такий спосіб (рис.2.9). З корпусом акселерометра зв'язана система координат XYZ, початок якої збігається із центром симетрії пластини.

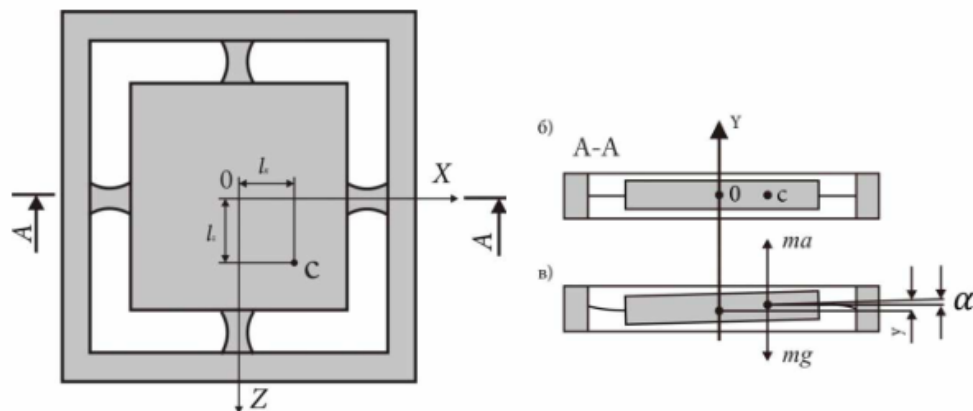


Рис. 2.8 - Конструктивна схема чутливого елемента ОМА

Уздовж осей X, Y, Z спрямовані вектори вібропереміщень x_B, y_B, z_B , які являються проекціями вібропереміщень точки O , і вектори лінійних прискорень a_B, a_B, a_B що являються проекціями лінійного прискорення точки O . Внаслідок дії узагальнених сил і кінцевої жорсткості підвісу центр симетрії ІМ переміщається в точку O_1 , обумовлену координатами x, y, z пружного зсуву.

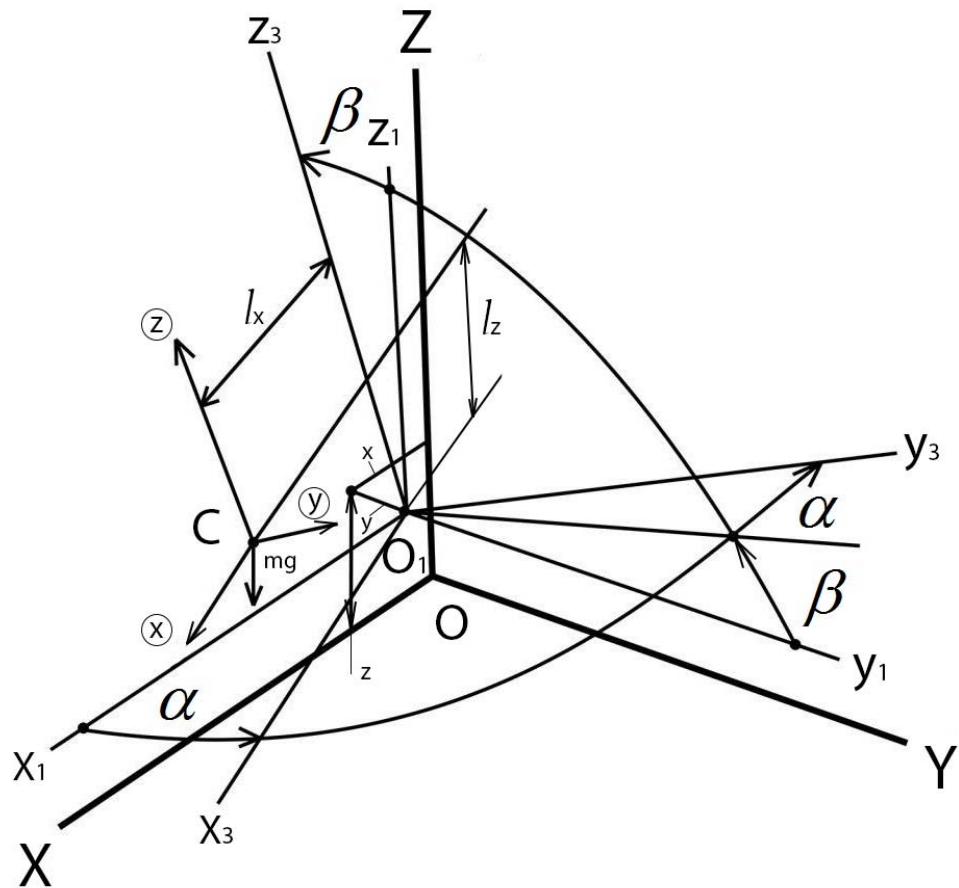


Рис. 2.9 Системи координат, які визначають положення ЧЕ

Осі симетрії координат x_1, y_1, z_1 паралельні відповідним до осей системи координат X, Y, Z . Кутове положення пластини задане кутами α, β , яким відповідають системи координат x_2, y_2, z_2 і x_3, y_3, z_3 . Площина пластини визначена віссю $O_1 z_3$, де на відстані l_z уздовж осі $O_1 z_3$ і l_x уздовж осі $O_1 x_3$ знаходиться ЦМ (точка C). Із точкою C зв'язана система координат x, y, z , осі якої паралельні відповідним до осей системи координат x_3, y_3, z_3 . Таким чином положення ІМ акселерометра визначено трьома лінійними (x, y, z) і двома кутовими координатами (α, β) (п'ять узагальнених координат).

У прийнятій постановці завдання можливий кут розвороту пластини навколо осі O_1y_3 не розглядається, тому що передбачається, що жорсткість підвісу навколо цієї осі значно більше жорсткості по кутових координатах α і β .

Рівняння руху ЧЕ одержимо за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду [20]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_j} \right) = Q_j \quad (2.1)$$

$$j = 1 \dots 5$$

де T - кінетична енергія пластини; Q_j - узагальнені сили по відповідних до узагальнених координат; q_j, \dot{q}_j - узагальнені координати й швидкості

$$(q_1 = x, \dot{q}_1 = \dot{x}, q_2 = y, \dot{q}_2 = \dot{y}, q_3 = z, \dot{q}_3 = \dot{z}, q_4 = \alpha, \dot{q}_4 = \dot{\alpha}, q_5 = \beta, \dot{q}_5 = \dot{\beta}).$$

Рівняння, що визначає кінетичну енергію пластини, має вигляд:

$$T = \frac{1}{2} \left(J_x \dot{\beta}^2 + J_z \dot{\alpha}^2 \right) + \frac{m}{2} \left(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2 \right) \quad (2.2)$$

де J_x, J_z - головні центральні моменти інерції пластини щодо осей C_x і C_y ; $\dot{x}_c, \dot{y}_c, \dot{z}_c$ - лінійні швидкості ЦМ пластини осей X, Y, Z відповідно.

Відповідно до рис 2.9 .

$$\begin{aligned} x_c &= x + x_B + l_x \cos \alpha; \\ y_c &= y + y_B + l_x \sin \alpha \cos \beta - l_z \sin \beta; \\ z_c &= z + z_B + l_z \cos \beta. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Лінійні швидкості ЦМ пластини

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= \dot{x} + \dot{x}_B - l_x \dot{\alpha} \sin \alpha; \\ \dot{y}_c &= \dot{y} + \dot{y}_B + l_x (\dot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta - \dot{\beta} \sin \beta \sin \alpha) - l_z \dot{\beta} \cos \beta; \\ &(\dot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta \gg \dot{\beta} \sin \beta \sin \alpha) \\ \dot{y}_c &= \dot{y} + \dot{y}_B + l_x \dot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta - l_z \dot{\beta} \cos \beta; \\ \dot{z}_c &= \dot{z} + \dot{z}_B - l_z \dot{\beta} \sin \beta; \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для прикладу отримаємо рівняння руху ЧЕ по координаті y . [21].

Обчислимо похідні:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y_c} \frac{\partial y}{\partial y} = m \dot{y}_c = \left(\dot{y} + \dot{y}_B + l_x \dot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta - l_z \dot{\beta} \cos \beta \right);$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial y} = m \left\{ \begin{aligned} & \ddot{y} + \ddot{y}_B + \\ & + l_x \left[\ddot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta - \dot{\alpha} \left(\dot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta + \dot{\beta} \sin \beta \cos \alpha \right) \right] - \\ & - l_z \left(\ddot{\beta} \cos \beta - \dot{\beta}^2 \sin \beta \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Маючи на увазі, що узагальнені координати α, β, y - невеликі величини, будемо вважати, що $\sin \alpha \approx \alpha, \sin \beta \approx \beta, \cos \alpha \approx 1, \cos \beta \approx 1$.

Крім цього, будемо зневажати добутками й квадратами невеликих величин, а також величинами, що мають ще більш високий порядок малості, а саме

$$\langle l_x \dot{\alpha}^2 \rangle, \langle m a \rangle, \langle -l_x \dot{\alpha} \dot{\beta} \rangle.$$

Враховуючи сказане, рівняння руху ЧЕ по лінійній координаті y має вигляд:

$$m \left(\ddot{y} + l_x \ddot{\alpha} + l_z \ddot{\beta} \right) = Q_y - m \ddot{y}_B \quad (2.7)$$

Аналогічним чином, одержимо рівняння руху ЧЕ по інших координатах [21]:

$$\begin{cases} m \ddot{x} = Q_x - m \ddot{x}_B; m \ddot{z} = Q_z - m \ddot{z}_B; \\ \left(J_x + m l_z^2 \right) \ddot{\beta} + m l_z \left(\ddot{y} + l_x \ddot{\alpha} \right) = Q_\beta - m l_z \left(\ddot{y}_B + \ddot{z}_B \beta \right); \\ \left(J_z + m l_x^2 \right) \ddot{\alpha} + m l_x \left(\ddot{y} + l_z \ddot{\beta} \right) = Q_\alpha - m l_x \left(\ddot{y}_B + \ddot{x}_B \alpha \right); \end{cases} \quad (2.8)$$

Узагальнені сили містять у собі сили, обумовлені жорсткістю підвісу, прискореннями переносного руху й демпфіруванням.

У загальному випадку переміщення пластини (ІМ) може бути розглянуто як результат двох рухів: паралельного переміщення по координаті y і розвороту на кут β (та на кут α). При цьому обидва кінця кожного пружного елемента підвісу жорстко затиснені.

Матриця сумарних сил і моментів, що діють на пластину з боку одного пружного елемента, визначається формулою:

$$\begin{vmatrix} P \\ M \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} y \\ \alpha \end{vmatrix} \quad (2.9)$$

Відповідно до неї узагальнені сили й момент, обумовлені жорсткістю одного пружного елемента, визначається залежностями:

$$\begin{aligned} P &= k_{11}y + k_{12}\alpha; \\ M &= k_{21}y + k_{22}\alpha; \end{aligned} \quad (2.10)$$

де коефіцієнти жорсткості визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} k_{11} &= A_y, \\ k_{12} &= k_{21} = A_\alpha, \\ k_{22} &= M_{A_\alpha}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де

$$A_y = \frac{12EI}{l^3}; A_\alpha = -\frac{6EI}{l^2}; M_{A_\alpha} = \frac{4EI}{l}$$

E - модель пружності, I - момент інерції поперечного перерізу балки, l - довжина балки.

У загальному випадку, полягаючи $l_x \approx l_z$ і маючи на увазі малі кути «закручення» пружних елементів щодо осей x і z можна використовувати залежність, домножуючи їх на число паралельно працюючих балок підвісу.

Запишемо сили, обумовлені прискоренням переносного руху, і силою тяжіння для відповідних координат, у вигляді:

$$\begin{cases} Q_x = ma_x; Q_y = m(a_y - g); Q_z = ma_z; \\ Q_\alpha = m(l_x + x_B)(a_y - g); \\ Q_\beta = m(l_z + x_B)(g - a_y). \end{cases} \quad (2.12)$$

Узагальнені сили демпфірування пропорційні лінійної y і кутовий α (а також β) швидкостями руху пластини й можуть бути записані в матричній формі:

$$\begin{vmatrix} F_D \\ M_D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_{Dy} & k_{Dy}a \\ k_{Dy}a & k_{D\alpha} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} y \\ \alpha \end{vmatrix} \quad (2.13)$$

де $k_{Dy}, k_{D\alpha}$ - коефіцієнти демпфірування по лінійній і кутовим координатам; a - лінійна координата центру кутових коливань пластини, яку можна вважати рівній половині довжини пластини.

При вивченні динаміки ЧЕ в першому приближенні можна не враховувати взаємозв'язок між узагальненими координатами при обчисленні узагальнених сил жорсткості й сил демпфірування.

Припустимо що ІМ має зміщення відносно центру мас тільки складову l_z . Для спрощення рівняння, враховуючи вище викладене і враховуючи рівняння руху (2.7) та (2.8) маємо:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + k_{\Delta x}\dot{x} + G_x x = m(\ddot{a}_x - \ddot{x}_B); \\ m\ddot{z} + k_{\Delta z}\dot{z} + G_z z = m(\ddot{a}_z - \ddot{z}_B); \\ m\ddot{y} + k_{\Delta y}\dot{y} + G_y y + m + l_z \ddot{\beta} = m(\ddot{a}_y - g - \ddot{y}_B); \\ J_\beta \ddot{\beta} + k_{\Delta \beta}\dot{\beta} + G_\beta \beta + m y(l_z + z) = m(l_z + z)(g - a_y - \ddot{y}_B) + \\ + m(g - a_y)(z_B + z) + m(l_z + z)z_B \ddot{\beta}; \\ J_\alpha \ddot{\alpha} + k_{\Delta \alpha}\dot{\alpha} + G_\alpha \alpha = m\ddot{x}(a_y - g - \ddot{y}_B) + m(a_y - g)(x_B + x) + \\ + m\ddot{x}x_B \alpha; \end{cases} \quad (2.14)$$

Рівняння зв'язків:

$$y_c = y + l_z \beta + y_B; x_c = x + x_B; z_c = z + l_z + z_B \quad (2.15)$$

де $J = J_x + J$; $J_\alpha = J_z + J$ - моменти інерції пластини (ІМ) щодо осей $O_1 z_1$ і $O_1 x_1$ відповідно; G_y, G_α, G_β - визначаються по формулі; G_x, G_z - жорсткість підвісу по координатах x і z , які мають бути обчислені по формулі.

Для акселерометрів з віссю чутливості по координаті y необхідно конструктивно забезпечити $G_x \approx G_z \ll G_y$. На цій підставі можна вважати $x \approx z \approx 0$. Система рівнянь (2.13) і рівняння зв'язків (2.15) приймають вигляд [21]:

$$\begin{cases} m\ddot{y} + k_{\Delta y}\dot{y} + G_y y + m + l_z \ddot{\beta} = m(\ddot{a}_y - g - \ddot{y}_B); \\ J_\beta \ddot{\beta} + k_{\Delta \beta}\dot{\beta} + G_\beta \beta + m y(l_z + z) = m l_z (g - a_y - \ddot{y}_B) + \\ + m z_B (g - a_y) + m l_z z_B \ddot{\beta}; \\ J_\alpha \ddot{\alpha} + k_{\Delta \alpha}\dot{\alpha} + G_\alpha \alpha = m x_B (a_y - g); \end{cases} \quad (2.16)$$

$$y_c = y + l_z \beta + y_B; \quad (2.17)$$

2.3 Модель систематичної похибки ОМА в умовах інерційних збурень

Побудуємо аналітичну модель похибки зсуву нуля корисного сигналу осьового мікромеханічного акселерометра при впливі двокомпонентної вібрації [20].

Скористаємося математичною моделлю осьового акселерометра (2.16), яка була приведена в попередньому пункті.

$$\begin{cases} m\ddot{y} + k_{\text{дв}}\dot{y} + G_y y + ml_z \ddot{\beta} = F - F_{\text{BY}}; \\ J_\beta \ddot{\beta} + k_{\text{дб}}\dot{\beta} + G_\beta \beta + ml_z \ddot{y} = -(F + F_{\text{BY}})l_z + F_{\text{BZ}}l_z \beta; \\ J_\alpha \ddot{\alpha} + k_{\text{да}}\dot{\alpha} + G_\alpha \alpha = 0; \end{cases} \quad (2.18)$$

де $m(a_y - g) = F$; $m\ddot{y}_B = F_{\text{BY}}$; $m\ddot{z} = F_{\text{BZ}}$; m - маса ЧЕ; $k_{\text{дв}}$ коефіцієнт демпфування по осі y ; $k_{\text{дб}}, k_{\text{да}}$ - коефіцієнт кутового демпфування; G_y - жорсткість підвісу для чотирьох «балок» по координаті y ; G_β, G_α - жорсткість підвісу за координатами β та α ; J_α - момент інерції пластини ЧЕ щодо осей O_1X_1 ; J_β - момент інерції пластини ЧЕ щодо осей O_1Z_1 .

Момент $F_{\text{BZ}}l_z\beta$ в правій частині другого рівняння системи (3.1) викликає появу вібраційного зсуву нуля акселерометра, відомого під назвою ефекту Максвелла-Капіці.

Розглянемо поведінку ММА в умовах відсутності постійного прискорення ($a_x = 0, a_y = 0, a_z = 0$) при $l_z \neq 0$. Для розв'язку системі рівнянь (2.18) скористаємося методом збурень [18]. У якості малого параметра візьмемо

$$\varepsilon = \frac{ml_z^2(x)}{l\beta(\alpha)} \quad (2.19)$$

він представляє відношення збільшення моменту інерції, обумовлене зсувом ЦМ відносно осі, до величини відповідного осьового моменту інерції. В осьових мікромеханічних акселерометрах $\varepsilon \ll 1$ забезпечується конструкцією й технологією виготовлення. Величина ε характеризує слабкий зв'язок парціальних систем по координатах α, β, y [19].

Розв'язок системи (2.18) згідно з [18] при $l_z \neq 0$ будемо шукати у вигляді:

$$\begin{aligned} y &= y_0 + \varepsilon y_1 + \dots; z = z_0 + \varepsilon z_1 + \dots; \\ \alpha &= \alpha_0 + \varepsilon \alpha_1 + \dots; \beta = \beta_0 + \varepsilon \beta_1 + \dots; \end{aligned} \quad (2.20)$$

У розглянутій схемі ОМА вихідною координатою є y і згідно (2.18) рівняння для неї можна записати так:

$$\frac{ml_z}{J_\beta} \ddot{y} + \frac{k_{\partial y} l_z}{J_\beta} \dot{y} + \frac{G_y l_z}{J_\beta} y = -\varepsilon \ddot{\beta} - g \frac{ml_z}{J_\beta} \beta - \frac{ml_z}{J_\beta} y_B \quad (2.21)$$

Так як нас цікавить постійна складова вихідного сигналу, то застосуємо до рівняння (2.21) оператор усереднення за часом

$$\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.22)$$

де t час; f - функція від часу; T - час усереднення.

В результаті одержимо:

$$\langle y \rangle = \frac{mg}{G_y} \langle \beta \rangle \quad (2.23)$$

При застосуванні оператора усереднення (2.22) до рівняння (2.21) припускаємо наявність тільки гармонійної вібрації основи.

Так як прискорення пов'язане з вихідним сигналом співвідношенням:

$$a_y = \frac{G_y}{m} y \quad (2.24)$$

то постійна складова ОМА приведена до прискорення буде мати вигляд:

$$\langle a_y \rangle = g \langle \beta \rangle \quad (2.25)$$

Тепер визначимо $\langle \beta \rangle$. Рівняння для β на підставі системи (2.21) в операторному виді має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{l_z}{J_\beta} (J_\beta s^2 + k_{\partial \beta} s + G_\beta) \beta &= -\varepsilon s^2 y + \varepsilon g \beta + \varepsilon s^2 y_B + \frac{l_z}{J_\beta} mg \beta z_B + \varepsilon \beta s^2 z_B; \\ s &= \frac{d}{dt}; \end{aligned} \quad (2.25)$$

У нульовому наближенні в операторному виді одержимо:

$$\beta_0(s) = \frac{ml_z s^2}{(J_\beta s^2 + k_{\partial \beta} s + G_\beta)} y_B(s) \quad (2.26)$$

При цьому постійна складова $\beta_0(t) = 0$.

Рівняння для першого наближення $(\beta_1(s))$ в операторному виді можна записати так:

$$\frac{l_z}{J_\beta} (J_\beta s^2 + k_{\Delta\beta} s + G_\beta) \beta_1 = s^2 z_B \beta_0 - s^2 y_0 + g \beta_0 + \frac{1}{l_z} g \beta_0 z_B; \quad (2.27)$$

Застосуємо оператор усереднення (2.22) до цього рівняння при наявності гармонійної вібрації основи.

Звідки задав вібрацію основи у вигляді $y_B = y_{BA} \sin \omega t, z_B = z_{BA} \sin \omega t$ можна визначити постійну складову β у першому наближенні $\langle \beta_1(t) \rangle$:

$$\langle \beta_1(t) \rangle = g \frac{J_\beta m w_y w_z \cos \varphi}{2 G_\beta \sqrt{(G_\beta - J_\beta \omega^2)^2 + k_{\Delta\beta}^2 \omega^2}} \quad (2.28)$$

де $w_y = y_{BA} \omega^2, w_z = z_{BA} \omega^2$ - амплітуди прискорень гармонійних вібрацій відповідно уздовж осей O_y, O_z ; y_{BA}, z_{BA} - амплітуди вібропереміщень відповідно уздовж осей O_y, O_z ; ω - частота вібрацій.

$$\varphi = \arctg \frac{k_{\Delta\beta} \omega}{G_\beta - J_\beta \omega^2} \quad (2.29)$$

Відповідно використовуючи (2.20) та (2.25) постійна складова похибки визначення прискорення буде мати вигляд:

$$\langle a_y \rangle = g \frac{m^2 l_z^2 w_y w_z \cos \varphi}{2 G_\beta \sqrt{(G_\beta - J_\beta \omega^2)^2 + k_{\Delta\beta}^2 \omega^2}} \quad (2.30)$$

Формула (2.30) визначає постійну складову похибки ОМА, при горизонтальному розташування осі чутливості в умовах гармонічної вібрації основи.

Використовуючи додаткові датчики для виміру $v_y = y_{BA} \omega, v_z = z_{BA} \omega$ по відповідним осям O_y, O_z [25] ми зможемо отримати додаткову інформацію для компенсації постійної складової похибки ОМА. Додатковими датчиками для виміру вібро-швидкості пропонуємо вимірювати за допомогою планарних катушок індуктивності МЕМС, які представлені на рис. 2.10.

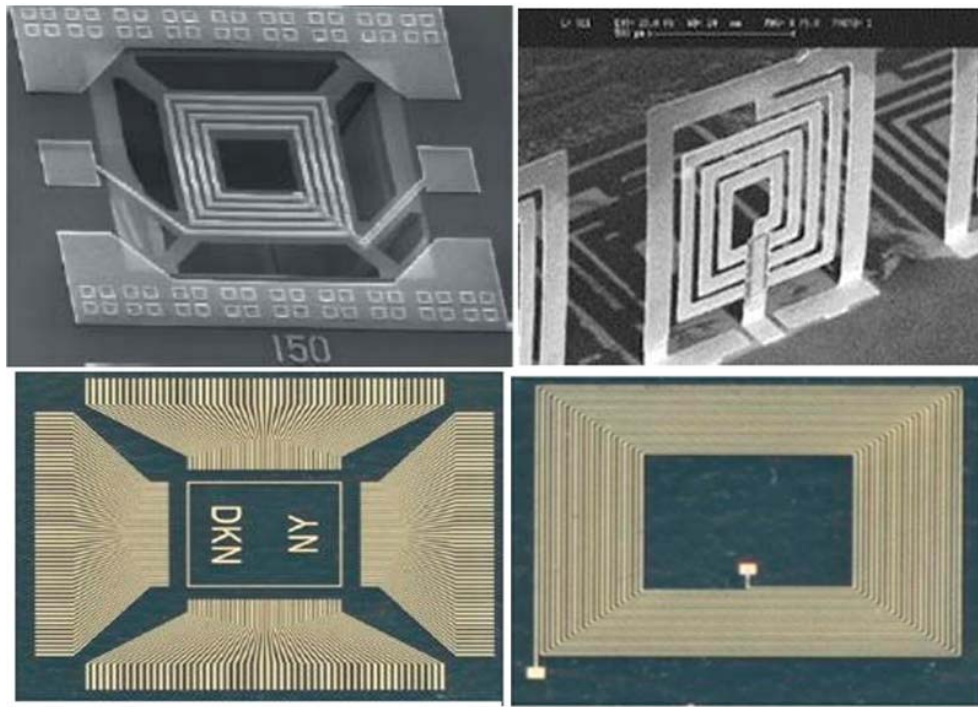


Рис.2.10 - Планарні котушки індуктивності MEMC

Висновки до розділу

1. Розглянуті загальні характеристики конструкцій ММА, їх особливості, та обрано конструктивну схему побудови ОМА для подальшого використання для складання моделі похибки.
2. Отримано рівняння руху чутливого елементу ОМА в умовах вібрації основи. Проведено спрощення рівнянь. В системі диференціальних рівнянь залишені члени, які обумовлюють появу систематичної похибки приладу.
3. Запропонована модель систематичної похибки ОМА в умовах інерційних збурень, та обраний метод її компенсації. Для побудови моделі похибки в аналітичному вигляді використовувався метод збурень. Отримана компактна формула постійної складової похибки ОМА. Використання додаткових датчиків для виміру параметрів вібрації дасть змогу в подальшому компенсувати систематичну вібраційну похибку.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ОМА З КОНТУРОМ КОМПЕНСАЦІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ПОХИБКИ

3.1 Програмна модель акселерометра.

Для аналізу даної системи диференціальних рівнянь було вибрано програмний комплекс Matlab 2014b пакет Simulink. Він дозволяє значно спростити складання обчислювальних програм чисельного моделювання завдяки використанню так званого візуального програмування, коли програма утворюється шляхом додавання спеціальних блок-схем з готових візуальних блоків з бібліотеки Simulink.

Для побудови моделі руху ЧЕ ОМА при вібрації перетворимо систему рівнянь (2.18) до виду:

$$\begin{cases} \ddot{y} = \frac{1}{m}(-k_{\text{д}y} \dot{y} - G_y y) - l_z \ddot{\beta} + \frac{F}{m} - F_{\text{BY}}; \\ \ddot{\beta} = \frac{1}{J_\beta}(-k_{\text{д}\beta} \dot{\beta} - G_\beta \beta - m l_z \ddot{y} - F l_z - F_{\text{BY}} l_z + F_{\text{BZ}} l_z \beta); \\ J_\alpha \ddot{\alpha} + k_{\text{д}\alpha} \dot{\alpha} + G_\alpha \alpha = 0; \end{cases} \quad (3.1)$$

де $m(a_y - g) = F$; $m \ddot{y}_B = F_{\text{BY}}$; $m \ddot{z} = F_{\text{BZ}}$; m - маса ЧЕ; $k_{\text{д}y}$ коефіцієнт демпфування по осі y ; $k_{\text{д}\beta}, k_{\text{д}\alpha}$ - коефіцієнт кутового демпфування; G_y - жорсткість підвісу для чотирьох «балок» по координаті y ; G_β, G_α - жорсткість підвісу за координатами β та α ; J_α - момент інерції пластини ЧЕ щодо осей $O_1 X_1$; J_β - момент інерції пластини ЧЕ щодо осей $O_1 Z_1$.

Параметри та коефіцієнти програмної моделі приймаємо наступні [21]:

$$l_z = 10^{-4} \text{ (м)};$$

$$m = 7.5 \cdot 10^{-5} \text{ (кг)};$$

$$J_\alpha = 1.1320 \cdot 10^{-9} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)};$$

$$J_\beta = 1.1320 \cdot 10^{-9} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)};$$

$$G_y = 525 \text{ (Н/м)};$$

$$G_\beta = 47.42 \cdot 10^{-5} \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

$$G_\alpha = 47.42 \cdot 10^{-5} \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

$$k_{\text{д}\gamma} = 23.48 \text{ (Н} \cdot \text{с / м)};$$

$$k_{\text{д}\alpha} = 4.75 \cdot 10^{-4} \text{ (Н} \cdot \text{с / м)};$$

$$k_{\text{д}\beta} = 4.75 \cdot 10^{-4} \text{ (Н} \cdot \text{с / м)};$$

Виходячи з першого рівняння системи (3.1), складемо блок-схему для каналу інтегрування y , наведену на рисунку 3.1. При цьому використовуємо стандартні блоки інтегрування, масштабування, складання.

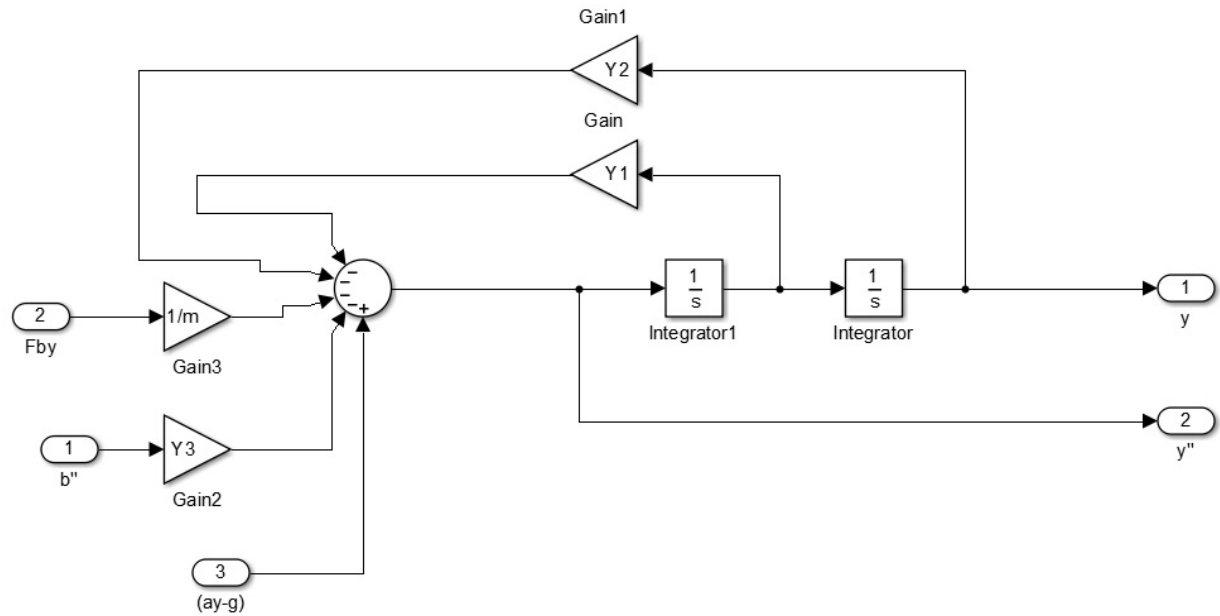


Рис. 3.1 – Блок-схема SIMULINK інтегрування рівняння руху ЧЕ ОМА (канал y)

Аналогічно були складені блок-схеми для каналу вимірювання β та α , які наведені на рис. 3.2 та рис.3.3

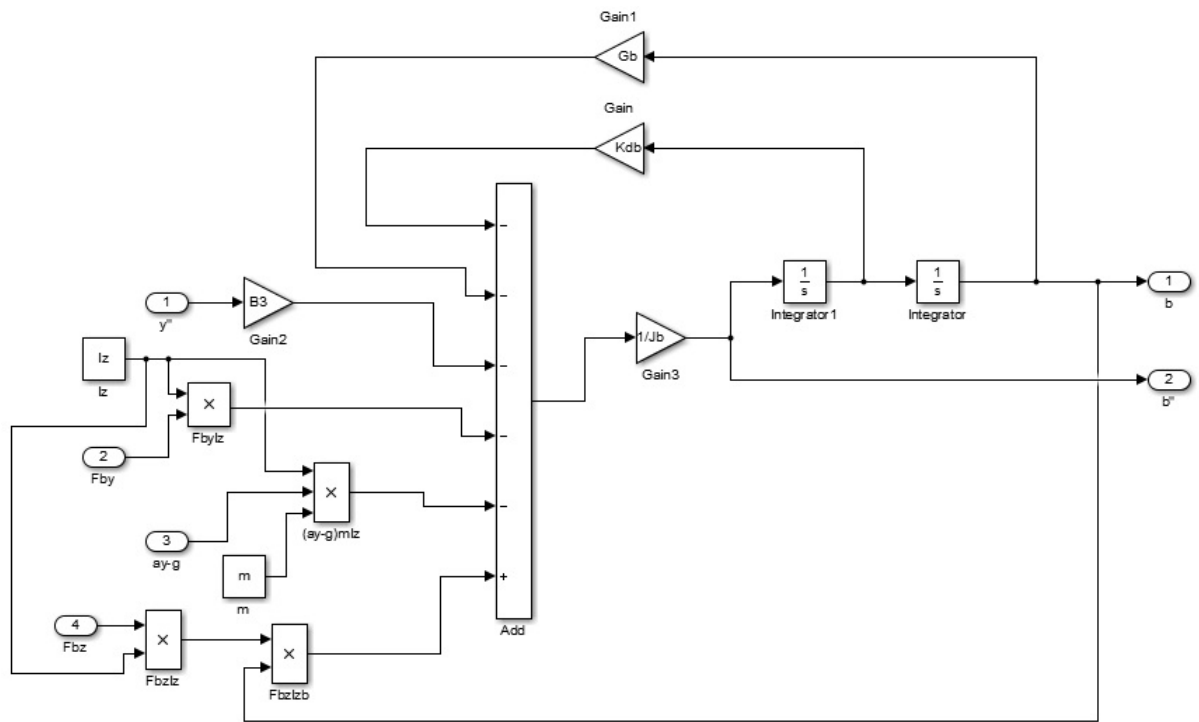


Рис. 3.2 – Блок схема SIMULINK інтегрування рівняння руху ЧЕ ОМА (канал β)

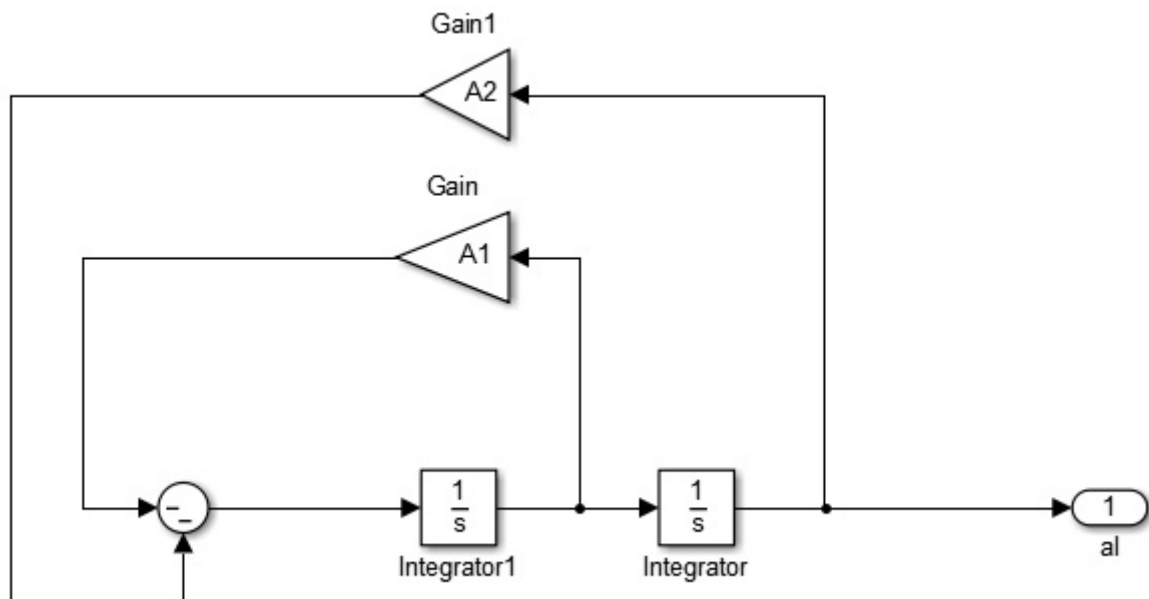


Рис. 3.3 – Блок-схема SIMULINK інтегрування рівняння руху ЧЕ ОМА (канал α)

Загальна блок схема програмної моделі ОМА вказана на рис. 3.3

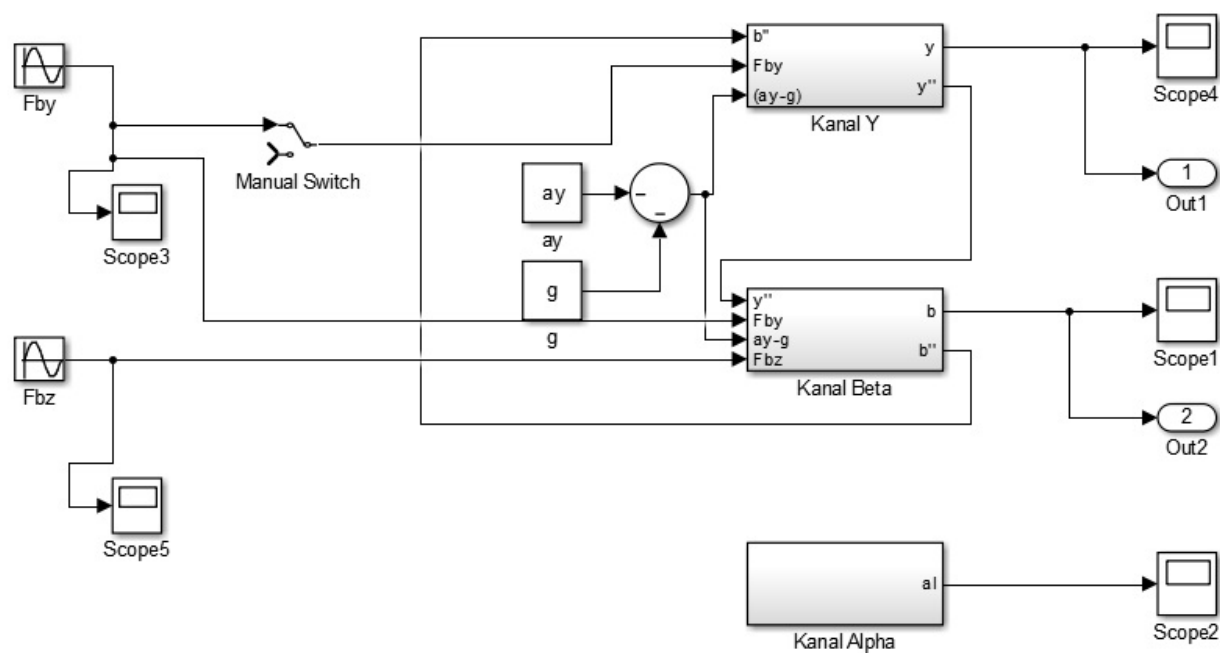


Рис. 3.4 – Блок-схема SIMULINK інтегрування рівнянь руху ЧЕ ОМА

Для більш зручної роботи початкові умови, параметри системи та зовнішніх збурень задавались через додатковий m-file, текст якого представлений в Додатку А.

3.2 Перевірка адекватності програмної моделі.

Для коректної роботи та дослідів необхідно дослідити адекватність програмної моделі, тому спочатку, було проаналізовано чи буде система реагувати на відсутність зовнішніх збурень, при відсутності прискорень, та нульових початкових умовах. Система як і повинно бути не реагувала на ці початкові умови, що говорить про адекватну поведінку під час відсутності зовнішніх збурень.

Для початкових умов каналу y ($y(0) = 0.01, \dot{y}(0) = 0.01$), результат показано на рис.

3.5.

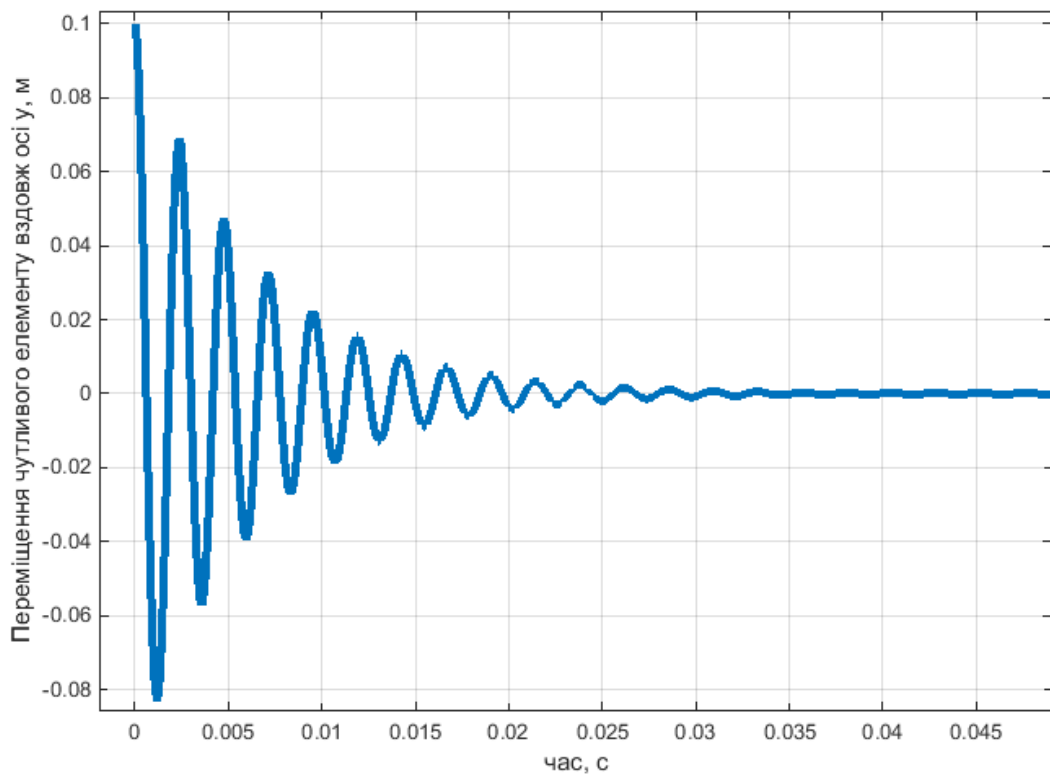


Рис. 3.5 – Сигнал на виході з каналу вимірювання y

Можна спостерігати перехідний процес на виході з каналу вимірювання y , що обумовлений заданими початковими умовами. З графіку видно, що перехідний процес протікає досить швидко, що притаманне мікромеханічним акселерометрам з системою демпфування.

На рис. 3.6, видно що на виході з каналу вимірювання β також відбувається перехідний процес, але з амплітудою обумовленою перехресними зв'язками в нашій математичній моделі між y та β .

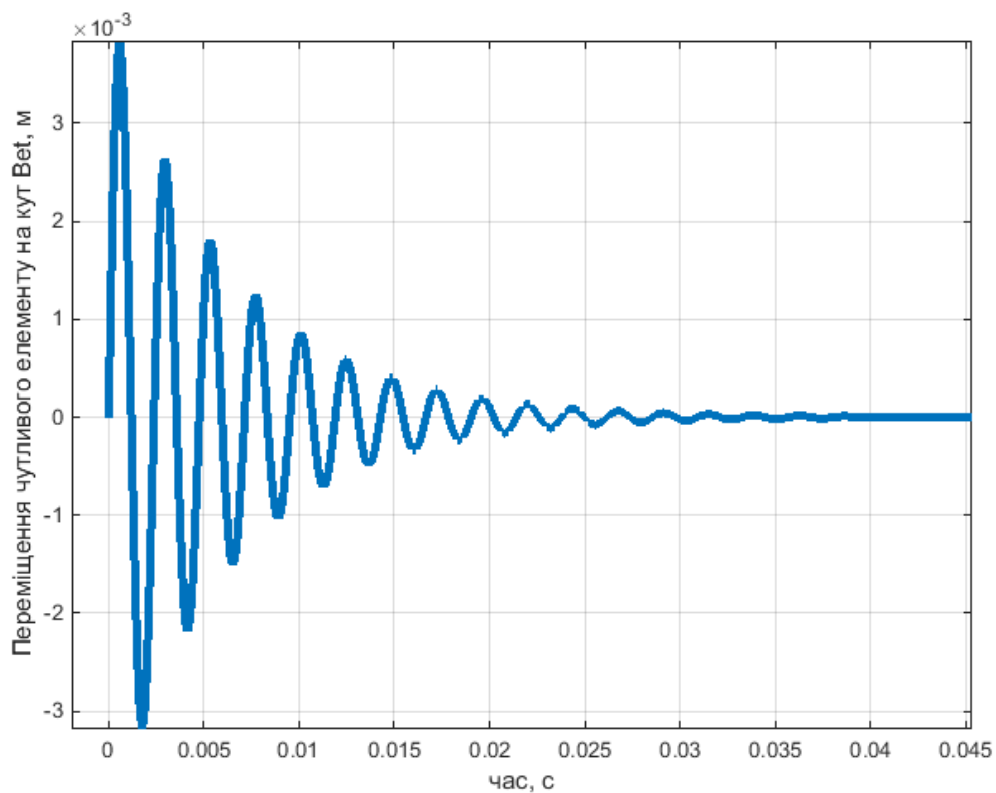


Рис. 3.6 – Сигнал на виході з каналу вимірювання β

Аналогічні дослідження для початкових умов $\beta(0) = 0.01, \dot{\beta}(0) = 0.01$ (рис.3.7).

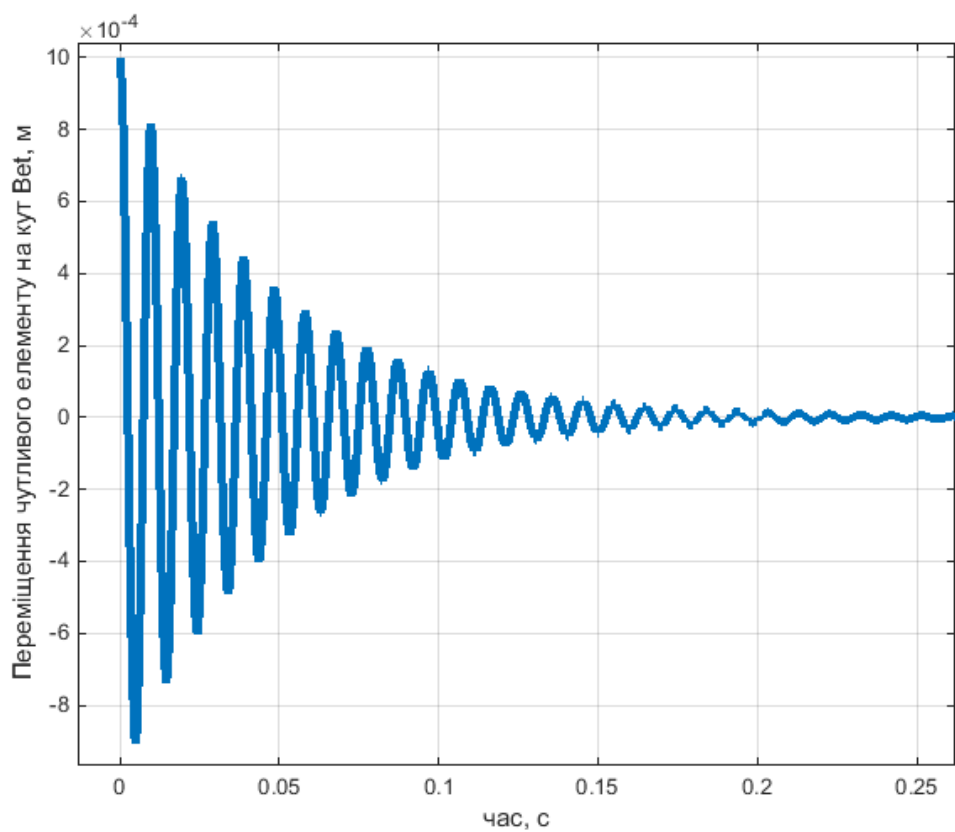


Рис. 3.7 – Перехідний процес каналу β

Як видно з результату моделювання, перехідний процес з часом затухає та при цьому на рис.3.8 видно, на виході каналу y також є сигнал, обумовлений перехресними зв'язками.

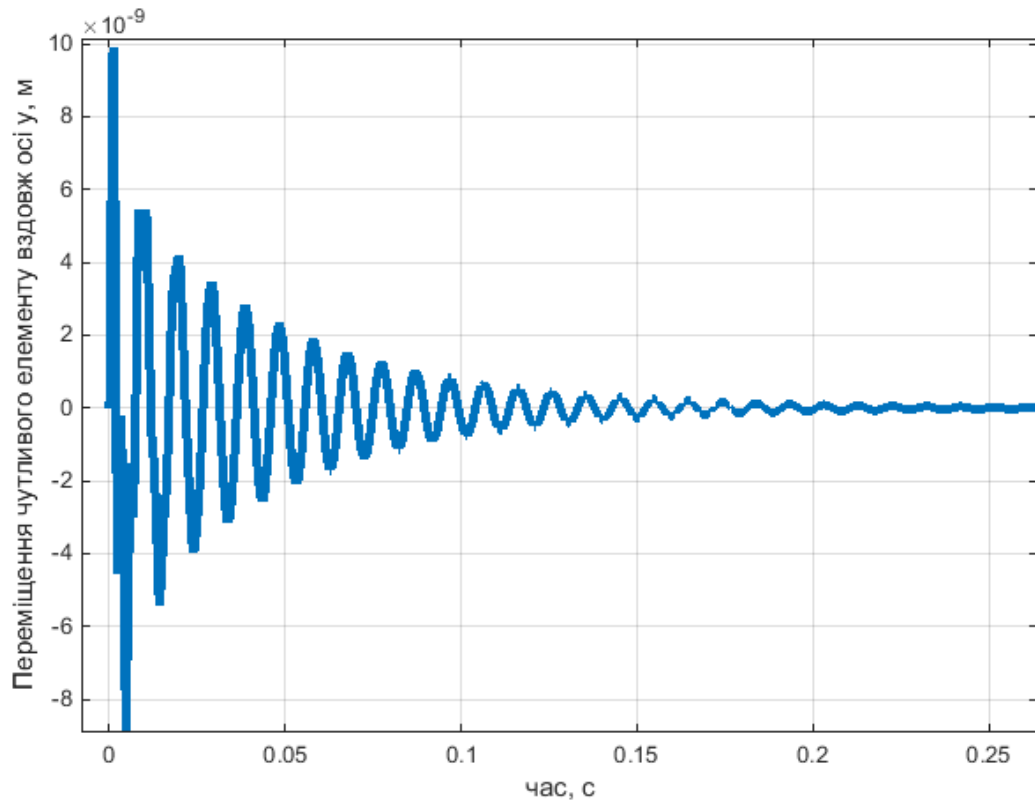


Рис. 3.8 – Перехідний процес в каналі y

Після цього, потрібно переконатись, що наша програмна модель ОМА реагує на прискорення, тому що це основа функція акселерометру – вимірювання прискорення.

Вводимо зовнішній параметр – $g = 9.8 \frac{m}{c^2}$, результат показано на рис. 3.9 та рис. 3.10.

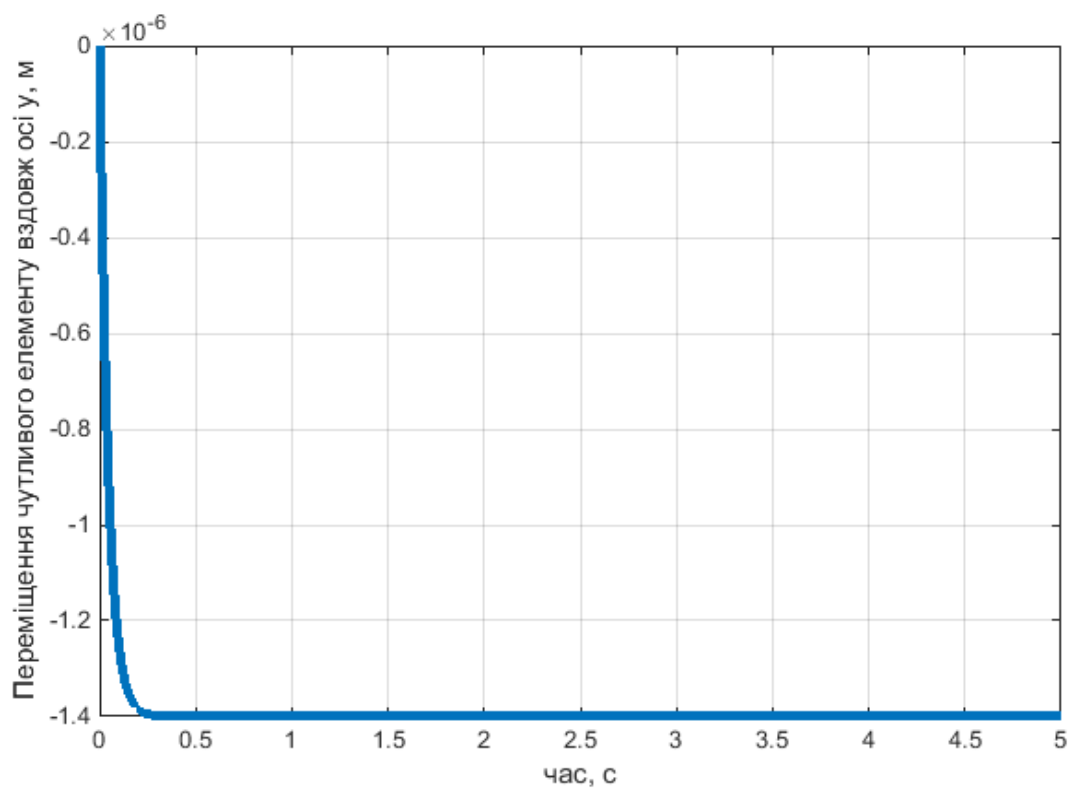


Рис. 3.9 – Переміщення пластини (ІМ) по осі y

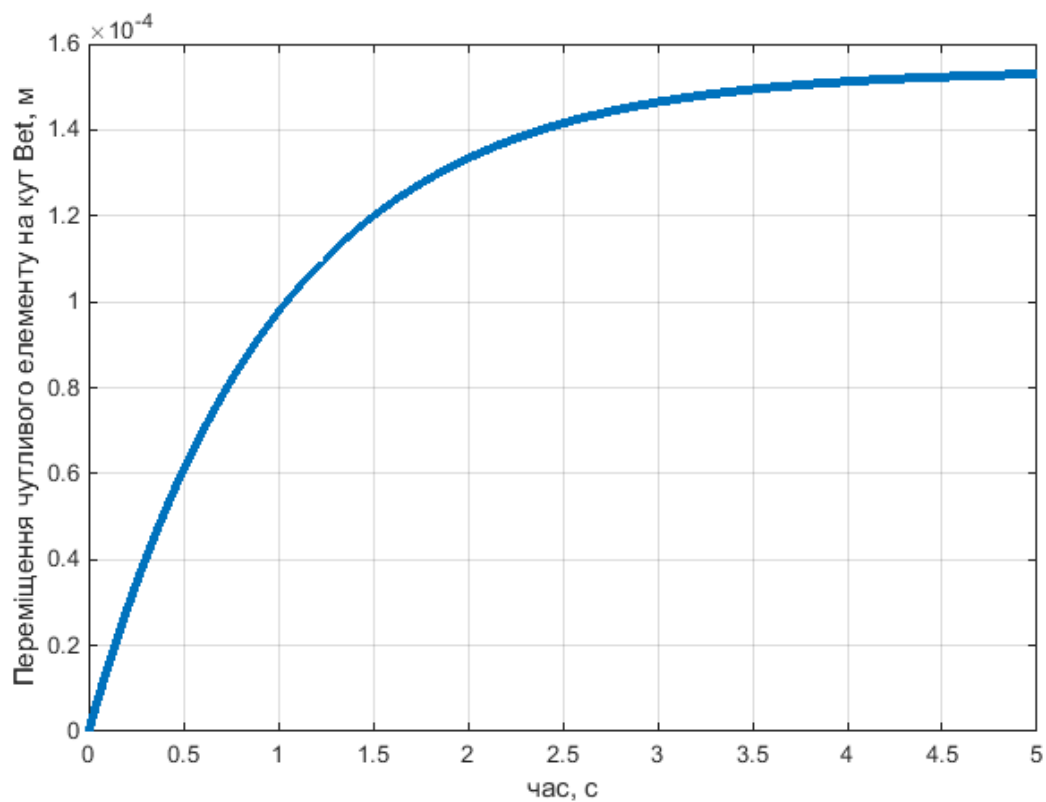


Рис. 3.10 – Переміщення пластини (ІМ) на кут β

Як видно з результатів програмна модель реагує на силу земного тяжіння g , пластина (ІМ) відхиляється від початкового нульового значення та приймає постійне значення, яке обумовлено виразом за формулою (3.2)

$$a_y = \frac{G_y}{m} y, \quad (3.2)$$

де a_y - вимірюване прискорення, m - маса пластини (ІМ), та G_y - жорсткість підвісу.

Підставивши вихідний результат з каналу y , ми отримаємо значення вимірювального прискорення $a_y = -9.79986 \frac{m}{c^2}$.

Після перших дослідів, можна говорити, що програмна модель адекватно відпрацьовує поставлені задачі. Надалі переходимо до наступного пункту, де програмну модель будемо досліджувати в умовах вібрації.

3.3 Дослідження програмної моделі ОМА в умовах вібрації.

3.3.1 Вплив вібрації на ОМА.

Після перевірки програмної моделі на адекватність роботи переходимо до досліджування нашої системи під час двокомпонентної вібрації, так як постійне зміщення сигналу відбувається при дії двох складових інерційних збурень.

При дії двокомпонентної вібрації результати на виходах з каналу y та β представлені на рис.3.11 та рис. 3.12.

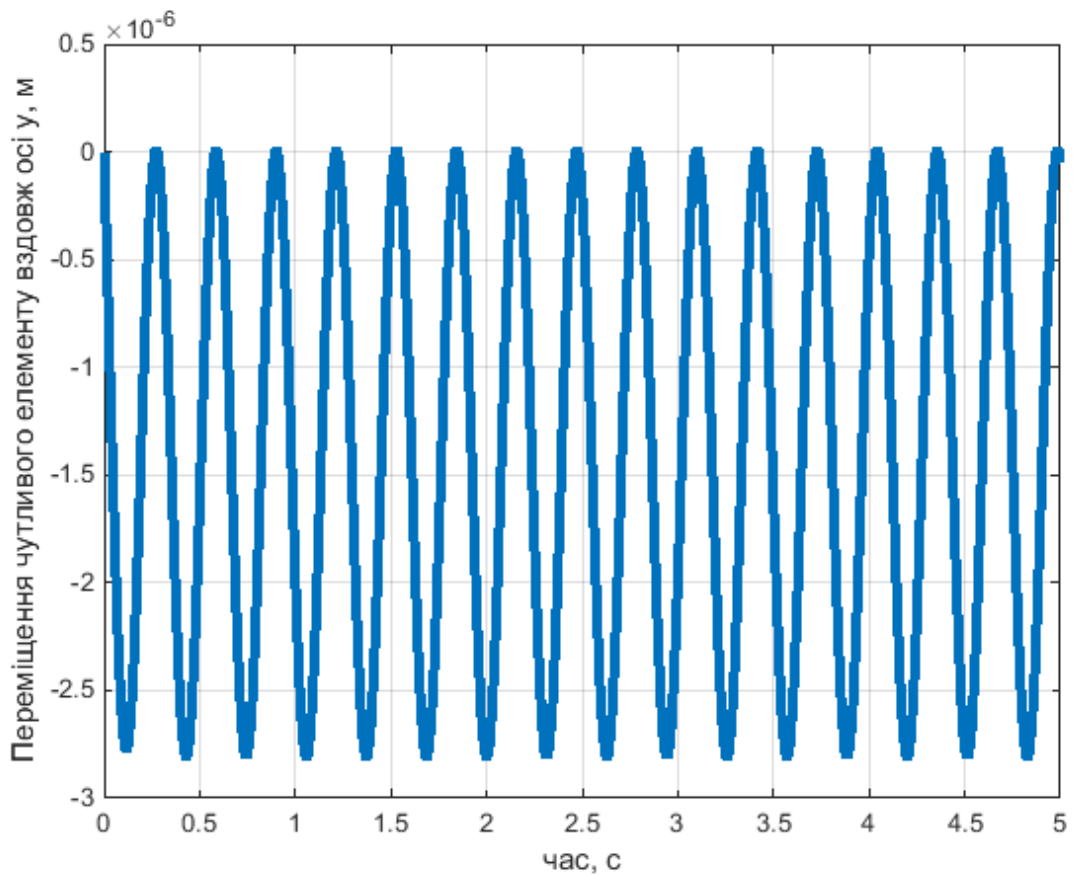


Рис. 3.11 – Вихідний сигнал з каналу y ($\omega = 20 \text{ рад} / \text{с}$, $A_y = A_z = 1 \text{ мм}$)

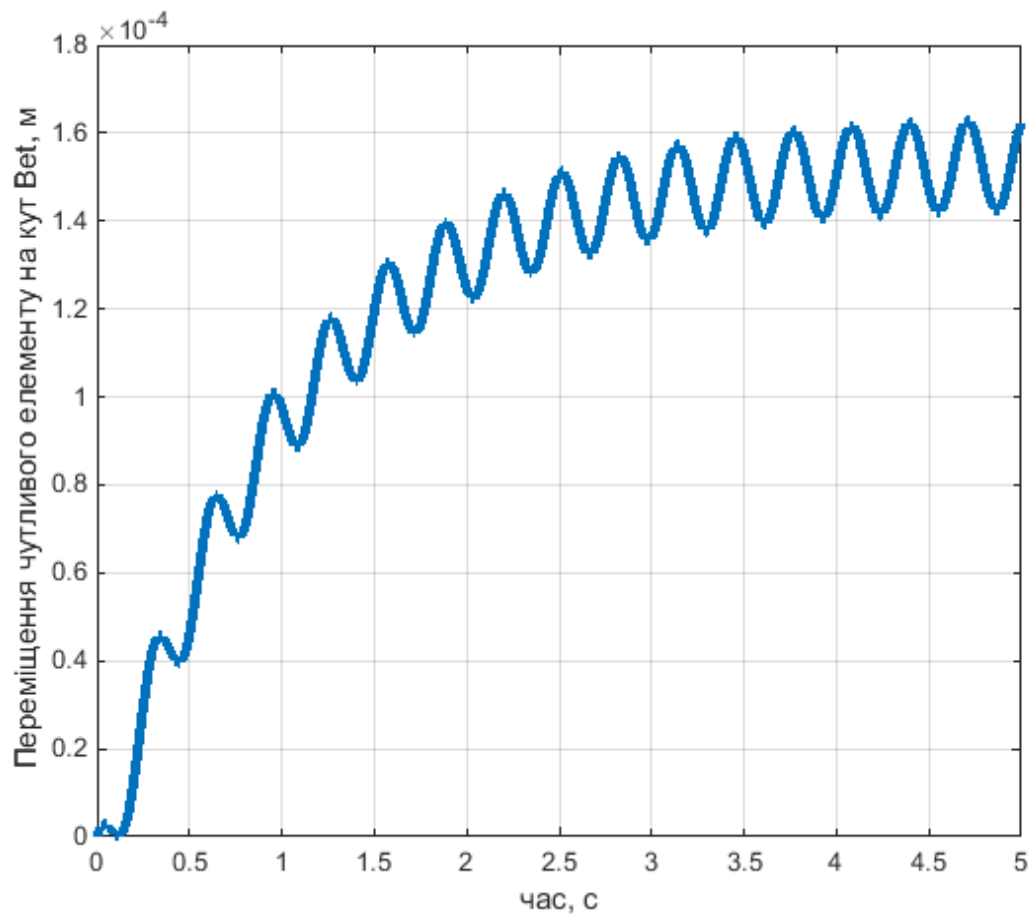


Рис. 3.12 – Вихідний сигнал з каналу β ($\omega = 20 \text{ рад/с}$, $A_y = A_z = 1 \text{ мм}$)

Виходячи з результатів, ми можемо спостерігати, що наша система повністю відпрацьовую зовнішню вібрацію, яка була задана з амплітудою 1 мм , частотою 20 рад/с , що змінюється за синусоїдальним законом.

Після цього задамо також вібрацію з амплітудою 10 мм та частотою 20 рад/с , щоб прослідити, як змінюється сигнал на виході з нашої системи. Результати показані на рис.3.13 та рис.3.14.

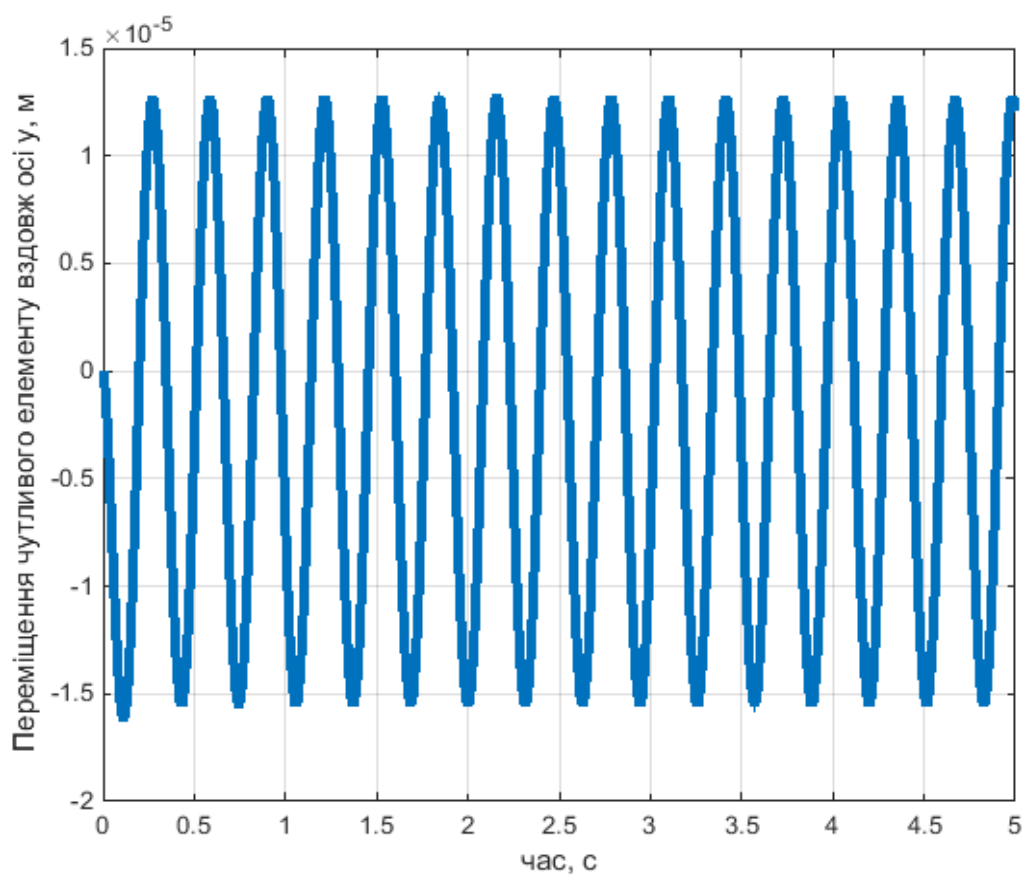


Рис. 3.13 – Вихідний сигнал з каналу y ($\omega = 20 \text{ рад} / \text{с}$, $A_y = A_z = 10 \text{ мм}$)

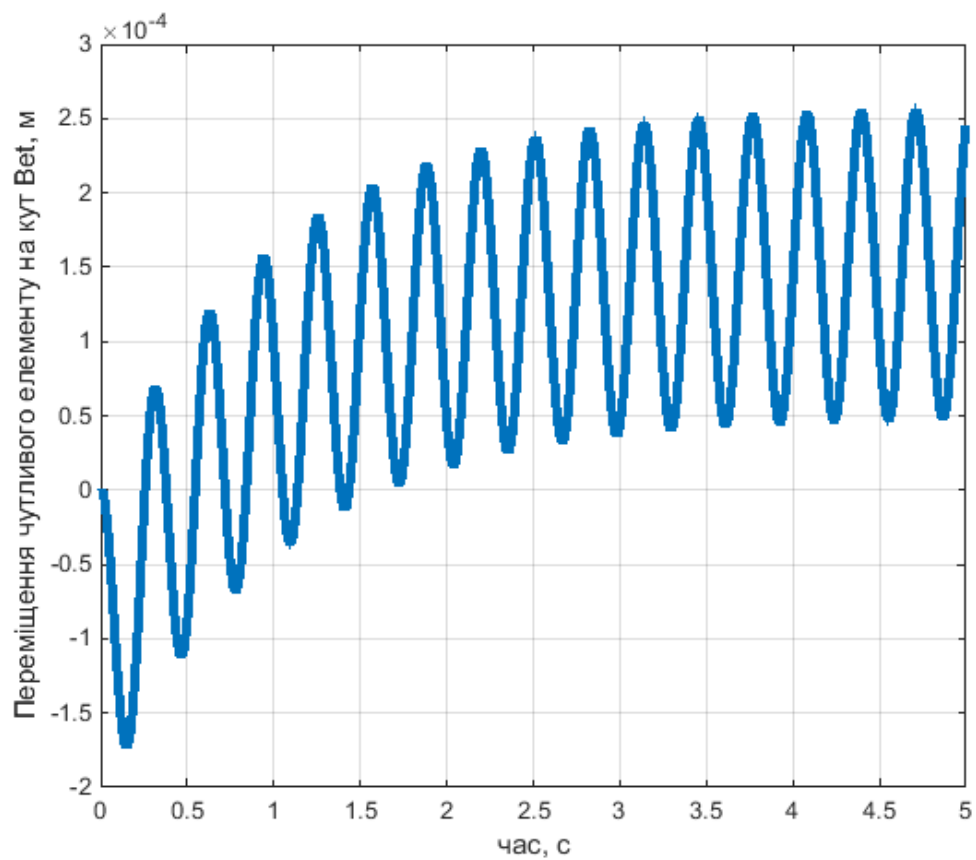


Рис. 3.14 – Вихідний сигнал з каналу β ($\omega = 20 \text{ рад} / \text{с}$, $A_y = A_z = 10 \text{ мм}$)

Проведемо аналогічні дослідження з амплітудою 100мм та частотою 20рад/с .
Результати показані на рис.3.15 та рис.3.16.

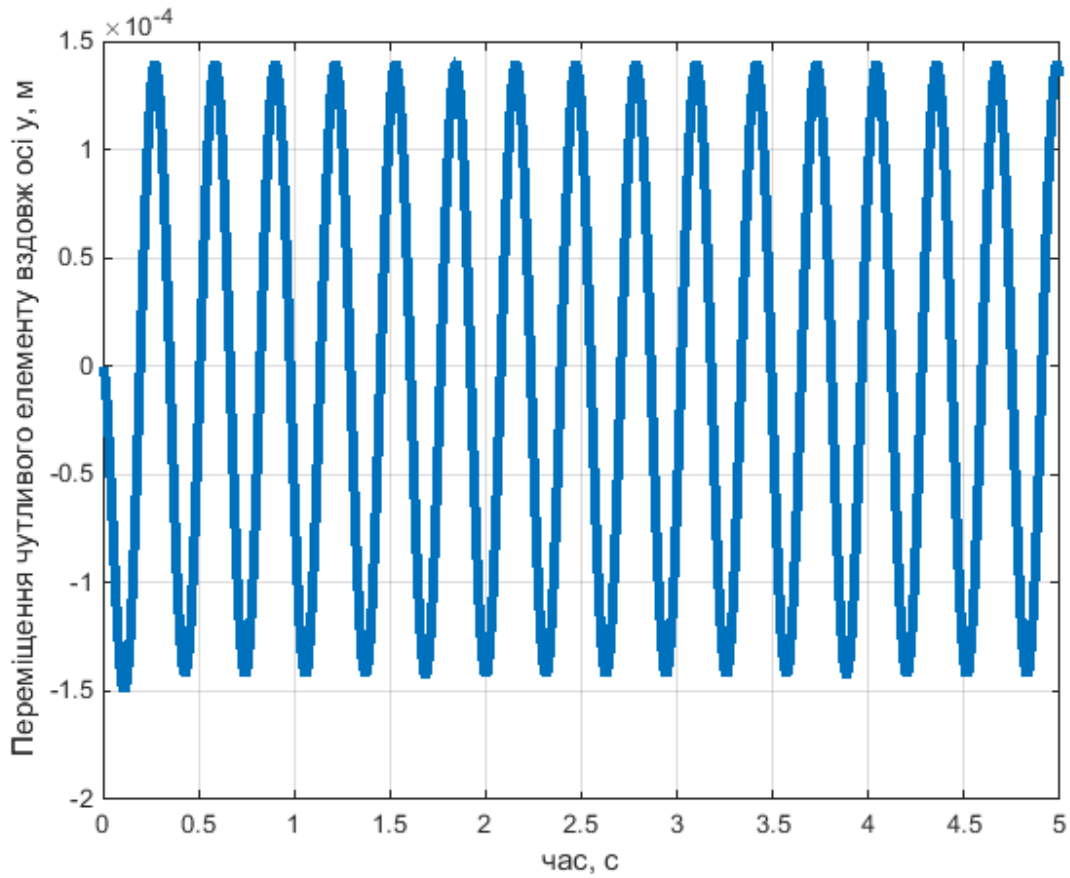


Рис. 3.15 – Вихідний сигнал з каналу y ($\omega = 20\text{рад/с}$, $A_y = A_z = 100\text{мм}$)

Виходячи з результатів ми бачимо, що присутнє постійне зміщення сигналу, відносно корисного сигналу, який вимірює безпосередньо прискорення сили тяжіння g . Тому проведемо серію дослідів, щоб прослідити характер впливу амплітуди двокомпонентної вібрації основи на постійну зміщення сигналу, при заданій частоті вібрації 20рад/с . Результати показано в табл. 3.1. та на рис. 3.17.

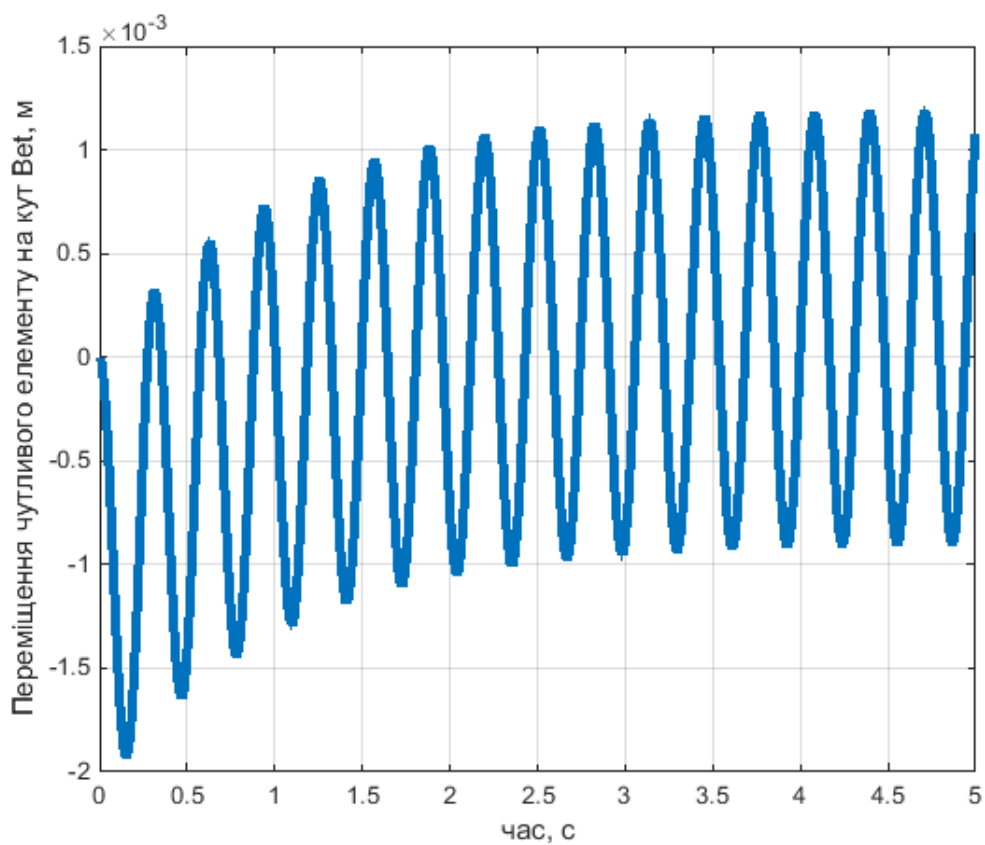


Рис. 3.16 – Вихідний сигнал з каналу β ($\omega = 20 \text{ рад/с}$, $A_y = A_z = 100 \text{ мм}$)

Таблиця 3.1 – Результати впливу двокомпонентної вібрації з частотою 20 рад/с

№ Дослід	Амплітуда вібрації, мм	Постійна зміщення вихідного сигналу, м
1	0	0
2	1	-2.2125e-09
3	5	-6.1075e-08
4	10	-1.3465e-07
5	20	-1.8887e-07
6	40	-5.7612e-07
7	60	-8.7044e-07
8	80	-1.1647e-06
9	100	-1.4590e-06

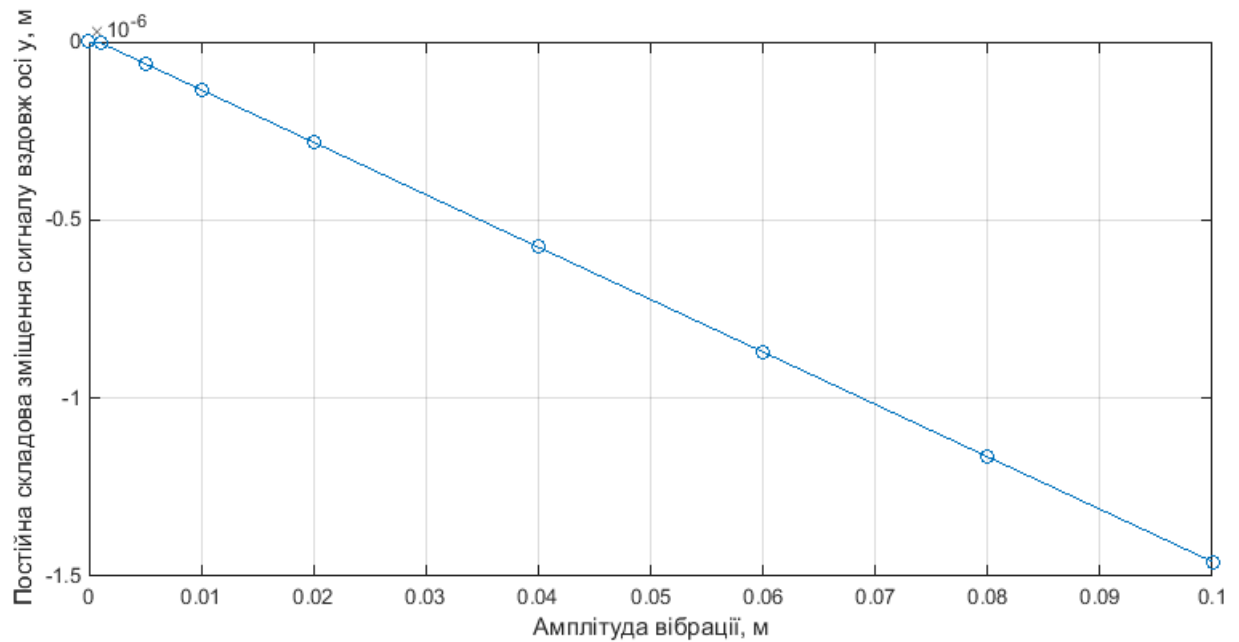


Рис. 3.17 – Постійна складова похибки ($\omega = 20 \text{ рад/с}$)

Як видно з результатів, збільшення амплітуди при двокомпонентній вібрації, також збільшується значення постійної складової похибки. Проведемо аналогічну серію дослідів, з частотою вібрації 50 рад/с . Результати представлені в табл.3.2 та рис. 318.

Таблиця 3.2 – Результати впливу двокомпонентної вібрації з частотою 50 рад/с

№ Дослід	Амплітуда вібрації, мм	Постійна зміщення корисного сигналу, м
1	0	0
2	1	2.43420e-09
3	5	-3.7840e-08
4	10	-8.81874e-08
5	20	-3.90259e-07
6	40	-5.76128e-07
7	60	-5.91641e-07
8	80	-7.93022e-07
9	100	-9.94404e-07

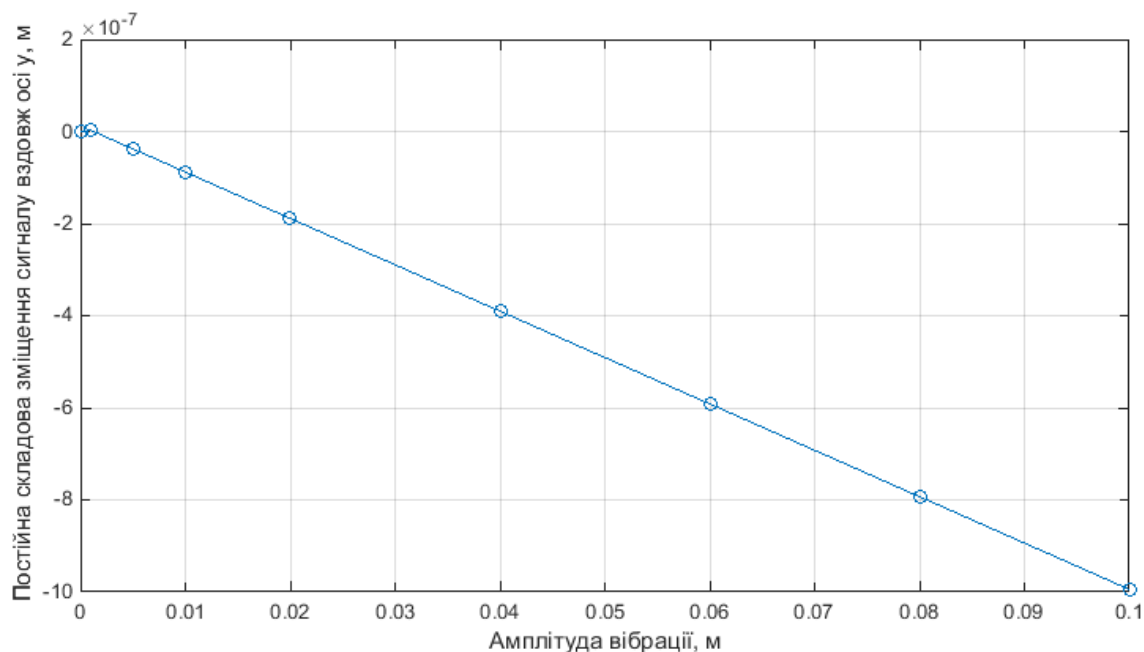


Рис. 3.18 – Значення постійної складової похибки ($\omega = 50 \text{ рад/с}$)

Проведемо аналогічну серію дослідів, але при цьому частота вібрації буде мати значення 100 рад/с . Результати представлені в табл.3.3 та рис. 3.19.

Таблиця 3.3 – Результати впливу двокомпонентної вібрації з частотою 100 рад/с

№ Дослід	Амплітуда вібрації, мм	Постійна зміщення корисного сигналу, м
1	0	0
2	1	8.15409e-09
3	5	-9.24266e-09
4	10	-3.09886e-08
5	20	-7.44804e-08
6	40	-1.61464e-07
7	60	-2.48448e-07
8	80	-3.35431e-07
9	100	-4.22415e-07

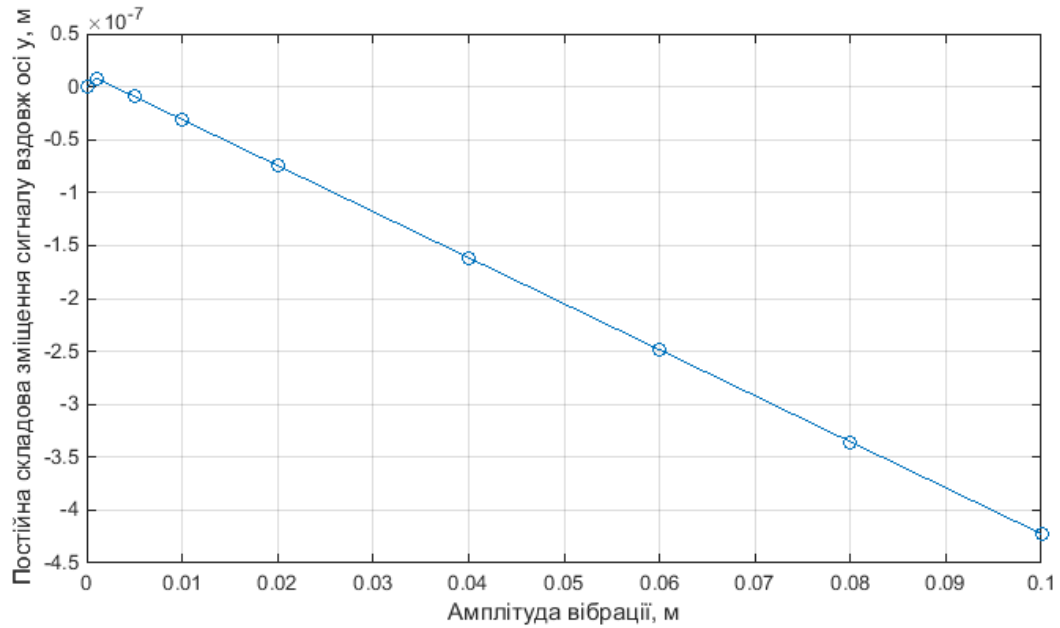


Рис. 3.19 – Значення постійної складової похибки ($\omega = 100 \text{ рад/с}$)

Виходячи з результатів дослідження, можемо сказати, що постійна складова похибки у всіх випадках збільшується з амплітудою вібрації, та навпаки зменшується зі збільшенням частоти вібрації.

3.3.2 Дослідження похибки ОМА з контуром компенсації.

Після дослідження впливу вібрації на нашу програму модель ОМА, ми можемо оцінити похибку компенсації запропонованого методу, який описаний в пункті 2.3.

Вводячи додаткові датчики для виміру $v_y = y_{BA}\omega$, $v_z = z_{BA}\omega$ по відповідним осям O_y, O_z , ми отримуємо надлишкову інформацію для компенсації постійної складової похибки ОМА.

Для цього вихідний сигнал нашої програмної моделі ОМА ми масштабуємо в відповідне вимірюване прискорення нашого акселерометру, за формулою (3.2), та оцінюємо похибку компенсації. Перші дослідження представлений в табл. 3.4 на рис. 3.20.

Таблиця 3.4 – Результати компенсації при двокомпонентній вібрації з частотою 20 рад/с .

№ Дослід	Амплітуда вібрації, мм	Похибка компенсації виміру, м/с^2
1	0	0
2	1	-0.00145
3	5	-0.04032
4	10	-0.08454
5	20	-0.15840
6	40	-0.24789
7	60	-0.25961
8	80	-0.26363
9	100	-0.26985

Як видно з результатів, компенсація істотно підвищує точність нашого осьового механічного акселерометру, особливо в низькочастотній області.

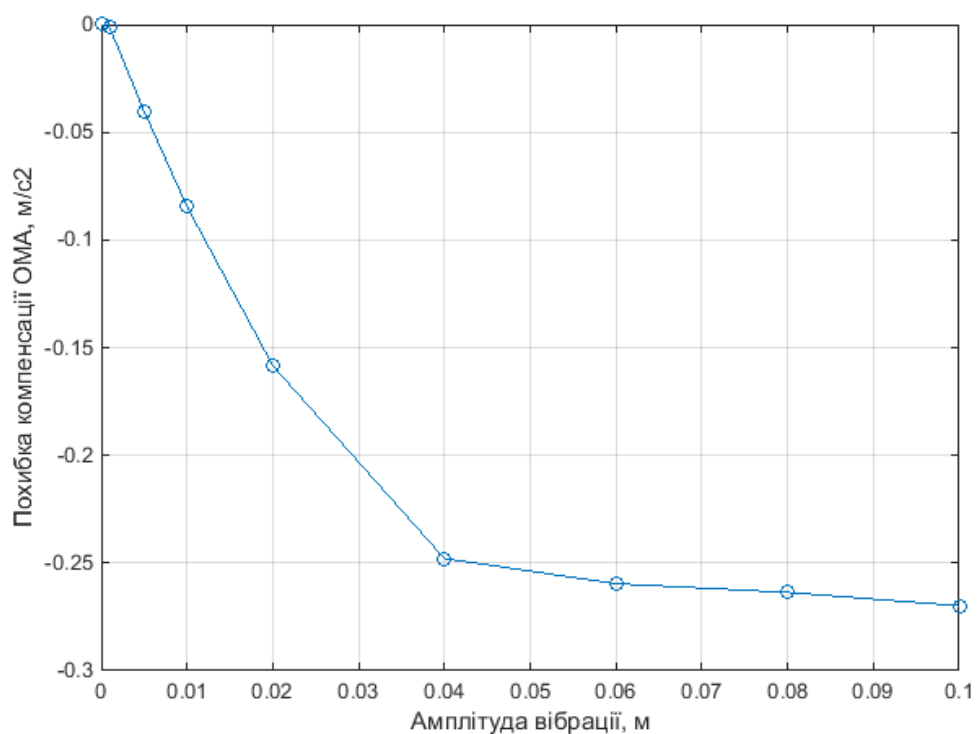


Рис. 3.20 Залежність похибки компенсації від амплітуди вібрації з частотою 20 рад/с .

Проведемо ще одну серію дослідів при дії двокомпонентної вібрації для отримання більш широкого спектру результатів і вивчення повноцінної картини ефективності

структурно-алгоритмічного методу компенсації. Результати подано в таб. 3.5 та на рис. 3.21.

Таблиця 3.5 – Результати компенсації при двокомпонентній вібрації з частотою 50 рад/с .

№ Досліду	Амплітуда вібрації, мм	Похибка компенсації виміру, м/с^2
1	0	0
2	1	0.0180
3	5	-0.2406
4	10	-0.5201
5	20	-0.9335
6	40	-1.1778
7	60	-1.2444
8	80	-1.3341
9	100	-1.4458

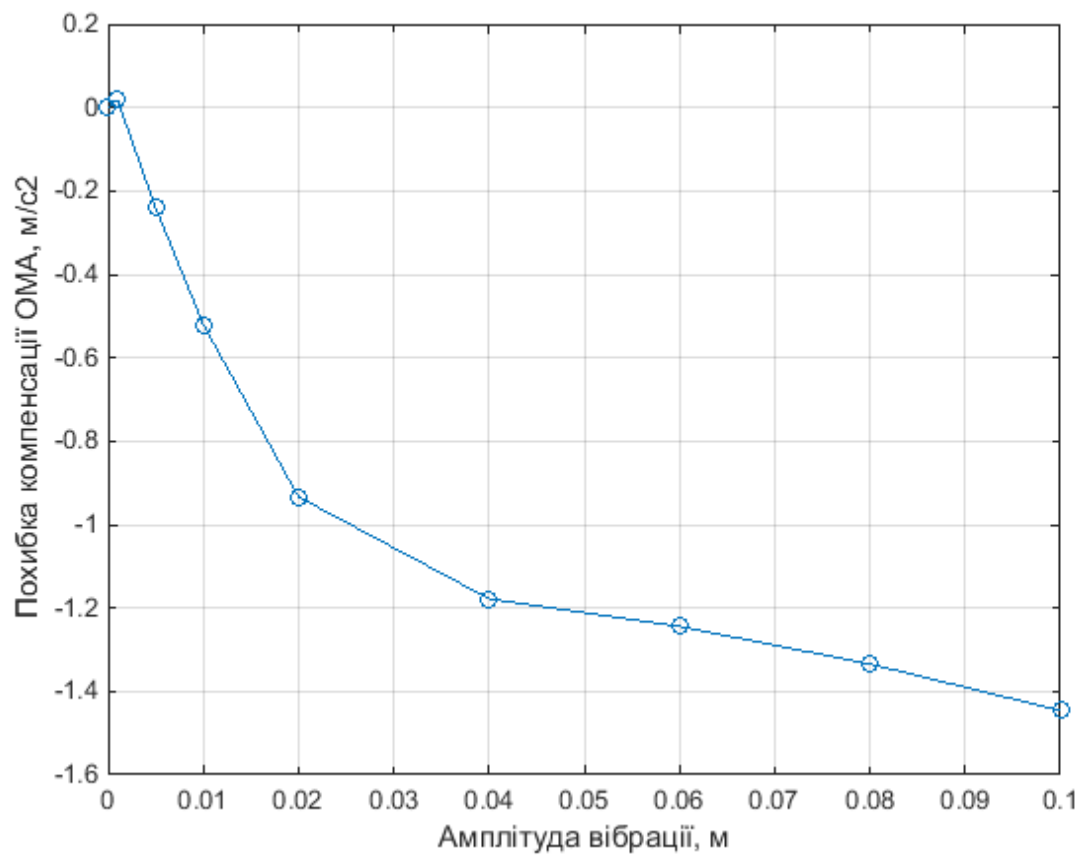


Рис. 3.21 Залежність похибки компенсації від амплітуди вібрації з частотою 50 рад/с .

При збільшенні частоти та амплітуди вібрації, спостерігається збільшення похибки компенсації нашого ОМА. Це пов'язано з тим, що в нашому структурно-алгоритмічному методі, використовуються додаткові датчики для виміру параметрів вібрації, які в свою чергу також мають похибку вимірювання. Це пояснюється тим, що при виводі постійної похибки вібрації в пункті 2.2 та 2.3, було знехтувано двома додатковими складовими похибки, при спрощенні математичної моделі.

Висновки до розділу

В розділі представлені результати моделювання ОМА з контуром компенсації вібраційної похибки.

1. Детально поданий опис програмної моделі ОМА. Розроблені структурні схеми каналів виміру та загальна блок-схема програмної моделі.
2. Проведено перевірку програмної моделі ОМА на адекватність роботи простими дослідями, коли задавались завідомо відомі параметри. Виходячи з реакції системи було зроблено висновок, що система поводить себе адекватно.
3. Представлені результати досліджень програмної моделі ОМА в умовах вібрації. Виконана систематизація результатів та побудови графіків, які відтворюють залежність вібраційної похибки від параметрів вібрації.
4. Проведено аналіз компенсації систематичної похибки вібрації. Було виявлено, що запропонований метод ефективно компенсує постійне зміщення вихідного сигналу під дією вібрації, але має також свою похибку компенсації. Ефективність запропонованого методу зменшується зі збільшенням амплітуди та частоти вібрації, що підтверджує висновки інших авторів [20], [22].

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ " ОСЬОВИЙ МІКРОМЕХАНІЧНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР З ДОДАТКОВИМИ ДАТЧИКАМИ ПЕРЕМІЩЕНЬ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ "

4.1 Опис ідеї проекту

Розробка перспективних систем навігації і управління рухом об'єктів різного призначення пов'язана з мініатюризацією систем, зниженням їх вартості, енергоспоживання і експлуатаційних витрат. Мініатюризація навігаційних систем вимагає створення малогабаритних датчиків - гіроскопів і акселерометрів. Пошук нових можливостей створення інерційних датчиків з необхідними характеристиками і прогрес в області мікроелектроніки привели до появи нового класу приладів - мікромеханічних датчиків (MEMS). Їх поява ознаменувало революційні зміни в інерціальній технології.

Мікромеханічні акселерометри - перспективні прилади сучасної мікросистемної техніки. Мікромеханічні акселерометри характеризуються унікально малими масою і габаритами, низьким споживанням електроенергії, можливістю функціонування в жорстких умовах експлуатації і на кілька порядків меншою вартістю, ніж їхні традиційні аналоги. Область застосування ММА надзвичайно широка. ММА використовуються в малогабаритних системах орієнтації і навігації для суден, літальних апаратів різного призначення, в системах управління автомобілями, скважних приладах, системах управління артилерійської снарядами.

В межах підпункту послідовно проаналізовано та подано у вигляді таблиць: зміст ідеї; можливі напрямки застосування; основні вигоди, що може отримати користувач товару та чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Таблиця 3.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Осьовий мікромеханічний акселерометр з додатковими датчиками переміщень чутливого елементу	1. Оборона	Вимірювання прискорення під час великих навантажень та перегрузок
	2. Електроніка	Використання як вимірювача прискорення в мобільних та портативних пристроях, як наукового призначення, так і масового: смартфони, кпк та ноутбуки.
	3. Кінематограф	Входить до складу гіростабілізаторів та камер для плавного знімання кадру.
	4. Доповнена реальність	Входить до складу систем, що відповідають за створення ефекту присутності у розважальних системах доповненої реальності, підвищуючи зацікавленість користувачів

Висновок: в таблиці приведені основні напрямки застосування запропонованого осьового мікромеханічного акселерометру з додатковими датчиками переміщень чутливого елементу. Цими споживачами є виробники оборонної промисловості, а саме ракето та авіа будування, виробники електроніки наукового та масового виробництва, кінематографічні студії створення тривимірної графіки.

Таблиця 3.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1.	Низькі витрати	15	50	35	40			+
2.	Габаритні мм	40*35	20*20	30*35	40*40		+	
3.	Надійність	Система завадостійкості	-	-	-			+
4	Захищеність	IP67	-	-	IP67			+
5	Технологічність	77%	50%	80%	60%			+

Висновки: у порівнянні із головними конкурентами товар має ряд переваг – це вартість, використання інноваційних систем підвищення надійності та точності. Слід також звернути увагу, що даний товар є технологічним. З точки зору виробництва це дає можливість стабільно отримувати високу якість товару та не нести збитків через неякісне виготовлення. Ставка на захищеність робить запропонований товар майже унікальним.

4.1.1 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 3.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Підвищення точності роботи	Використання нових датчиків	Наявна	Доступна
2	Підвищення завадостійкості	Впровадження алгоритмів фільтрації та компенсування похибок	Необхідно розробити	Теоретично доступна
3	Інтеграція з іншими системами оцінки уявного прискорення та кутів орієнтації	Використання готових протоколів обміну даними.	Наявна	Доступна
4	Зменшення масо-габаритних показників	Використання передових технологій виробництва приладів	Наявна	Доступна
5	Сертифікація для продажу та використання в наукових міжнародних проектах	Проходження наукової сертифікації	Наявна	Доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Ідею створити можна. Технологія реалізації ідеї спирається на інноваційність підходу. Тому для того щоб значно виділитися на ринку від конкурентів, необхідно за основу взяти другий пункт «Підвищення завадостійкості» що потребує значних ресурсів на проведення дослідження та подальшу реалізацію. У поєднанні з сертифікацією розширить сферу використання та подальший прибуток.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 3.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	50000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	43%

Висновки: за результатами складеної таблиці можна сказати, що вихід на ринок є рентабельним. Мала кількість гравців свідчить про високий поріг входу на ринок через високу наукоємність ніші, однак з іншої сторони тут мала конкурентність, що при умові вибору правильного вектору розвитку, може зіграти в плюс проекту. Високий процент рентабельності дає змогу швидко відбити затрачені кошти на розробку системи.

Таблиця 3.5 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	Вимірювання прискорення у реальному часі.	Електроніка Ракето та авіа промисловості	Особливості, викликані зі специфікою проведення дослідів, необхідність модифікування програмно-алгоритмічного забезпечення, інтеграція із існуючими системами	Швидкість роботи Можливість комплексування з іншими системами Висока стабільність результатів

Висновки: формування ринку визначається потребою вимірювання прискорення у реальному часі та подальший аналіз даних. Основними споживачами цього продукту є сфери, що тією чи іншою мірою стосуються дослідження рухового апарату, а саме сфера електроніки, ракетобудування на авіапромисловості. Заважаючи на це, головними вимогами до товару є швидкість роботи, комплексування з іншими приладами, стабільність результатів.

Таблиця 3.6 Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Менша ціна у конкурента при однаковій якості продукту	Відтік клієнтів
2	Економічний	Економічний стан країни-виробника	Відмова від продукту
3	Якість	Не належна якість зібраного приладу	Відмова від продукту
4	Вартість комплектуючих	Підвищення закупівельної вартості комплектуючих	Пошук нових постачальників, зміна матеріальної бази
5	Патентні позови	Позови від компаній конкурентів	Відстоювання прав компанії.

Висновки: головним фактором загроз є конкуренція. Вже існуючі товари на ринку мають певну репутацію та великі об'єми виробництва. Конкуренти здатні демпінгувати ціни для отримання нових клієнтів свого товару.

Таблиця 3.7 Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Збільшення попиту	Різке збільшення зацікавленості до системи	Підвищення виробництва
2	Необхідність до інтеграції	Необхідність додати можливість розширення системи	Компанія може створити додаткові можливості системи на замовлення
3	Освоєння нових сфер	Система використовується у сферах, що не розглядалися виробником	Створення спеціальної робочої групи задля модернізації приладу для виконання поставлених вимог
4	Індивідуальне замовлення	Клієнт потребує додання нових специфічних додатків	Оцінка затрат і вигоди компанії в даній ситуації. Погодження умов можливого контракту.
5	Співпраця з конкурентами	Конкурент запропонував кооперацію	Оцінки можливих ризиків

Висновки: сфера використання таких систем є молодим, тому ринок клієнтів постійно зростає. Збільшення зацікавленості в товарі призведе до різкого збільшення об'ємів виробництва та продажів, що дасть поштовх до нових вдосконалень. Це досягається шляхом рекламування та освоєння нових сфер використання СЗРЛ.

Таблиця 3.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - чиста конкуренція	Мала кількість постачальників даного продукту	відповідність ринку прогнозування випереджати існуючі технології
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	Наявність замовників із інших держав	Міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Використання у різних галузях	Робота менеджменту і реклами по залученню клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів:- товарно-видова	Товар, що пропонується є одного виду	Клієнтко-орієнтована стратегія розвитку Адаптивність до умов ринку
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Вартість залежить від комплектації та функціоналу	Пошук вигідного постачальника компонентів
6. За інтенсивністю - марочна	Вибір постачальника по бренду	Розкрутка бренду, його рекламування

Висновки: на ринку присутня чиста конкуренція через те, що окремі гравці не можуть впливати на ціну товару. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний із міжгалузевою ознакою. Конкуренція за видами товарів – видова.

Таблиця 3.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Freescale Semiconductor MMA	BoschSensortec SMB	ADXL	MEMS Мікроелектроніка	Оптичні системи
Висновки:	Конкуренція є відносно не великою	Вихід на ринок відносно простий. Наявні потенційні конкуренти.	Постачальники мають не диктувати ціни на ринку	Клієнти не диктують умови через велику зацікавленість до товару.	Обмежень практично немає, оскільки маю різні обмеження по використанню

Таблиця 3.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Надійність	Використання алгоритмів із підвищеною завадостійкістю
2	Простота	Простота у використанні для користувача робить систему привабливою для клієнта.
3	Адаптивність	Можливість гнучкого налаштування під конкретні задачі
4	Модульність	Можливість комплексування із додатковими системами фіксації показників орієнтації.
5	Захищеність	Використання в агресивних середовищах

Висновки: оцінено основні фактори конкурентоспроможності. Підвищення надійності та завадостійкості системи досягається шляхом використання алгоритмів із підвищеною завадостійкістю Простота у використанні приладу та налаштуванні робить його більш привабливим для клієнта через те, що необхідно тратити мінімум часу на налагодження та запуск. Адаптивність та модульність відкривають широкий спектр використання приладу у поєднанні із іншими системами.

Таблиця 3.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Xsens						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	18							+3
2	Простота	20			-1				
3	Адаптивність	17						+2	
4	Модульність	16				0			
5	Захищеність	18						+2	

Висновки: спираючись на фактори конкурентоспроможності (Таблиця 3.9) та підсумовуючи рейтинг товару відносно головного конкурента, запропонована система має більший рейтинг відносно прямих конкурентів. Дана таблиця показує якими саме особливостями розроблена система відрізняються від аналогів та в яку саме сторону. Детальний аналіз показує, що сильними сторонами є простота, можливість до адаптації з роботою із іншими системами.

Таблиця 3.12 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: вища завадостійкість простота використання адаптивність стабільна робота, простота використання, портативність, можливість до комплексування	Слабкі сторони: своєчасне оновлення мат. бази, відносно нове ПЗ може мати недоліки
Можливості: Вихід на міжнародний ринок Збільшення попиту Необхідність до інтеграції Освоєння нових сфер Індивідуальне замовлення Співпраця з конкурентами	Загрози: конкуренція, Економічна нестабільність Якість продукту Вартість комплектуючих Патентні позови сертифікація

Таблиця 3.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Індивідуалізм (максимізація власного виграшу)	Середня	7міс
2	Кооперація (максимізація спільного виграшу)	Висока	10міс
3	Суперництво	Нижче середнього	12міс.

Висновки: в результаті аналізу обрано кооперацію, як альтернативну ринкову поведінку через те, що за відносно короткий термін існує велика ймовірність отримання ресурсів.

4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 3.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів прийняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Ракетобудівництво	-	+	низька	+
2	Авіапромисловість	-	+	низька	-
3	Виробники електроніки	+	+	висока	+
4	Кінематографія	+	+	висока	+
5	Робототехніка	+	+	низька	-

Які цільові групи обрано: під час вибору цільової групи до уваги бралось в першу чергу готовність споживача прийняти продукт. ракетобудівництво та авіапромисловість потребують більш популярних роз'яснень щодо можливостей використання таких систем. У випадку успішного реклами є можливість зайняти нішу. На даний момент буде важко конкурувати з уже існуючими оптичними акселерометрами у сфері виробників електроніки.

Таблиця 3.15 Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Індивідуалізм	Стратегія недиференційованого маркетингу	Адаптація до вимог ринку Використання новацій Генерування ноу-хау	Стратегія спеціалізації

Висновки: обрана стратегія розвитку спеціалізація через існування на ринку більш сильніших гравців. На перших кроках існування проекту доцільніше обрати стратегію спеціалізації та зайняти певну стабільну нішу на ринку.

Таблиця 3.16 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*
	Не є першопрохідцем	Буде шукати нових споживачів із поступовим переманюванням від конкурентів	Компанія буде вдосконалювати наявні зразки	Стратегія виклику лідера

Висновок: оскільки проект не є першопрохідцем та має суттєві переваги по відношенню до свого прямого конкурента, можливо обрати стратегію виклику лідера. Це є можливим на фоні використання інноваційних методів підвищення точності алгоритмічного забезпечення.

Таблиця 3.17 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	Швидкість роботи	Стратегія спеціалізації	До слідження та розвиток	Високошвидкісна, легкість, надійність
2	Можливість комплексування з іншими системами	Стратегія спеціалізації	Обслуговування	Здатна до комплексування
3	Висока стабільність результатів	Стратегія спеціалізації	Якість	високоточна

Висновки: На ряду із використання інноваційних методів підвищення точності, проект повинен викликати асоціації у клієнта у гнучкості налаштування та

комплексування, можливості після продажного обслуговування та високої якості виготовлення.

Таблиця 3.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Необхідність виміру прискорення у реальному часі	Відносно дешева та надійна система виміру прискорення	Ціна, надійність, простота, підтримка, обслуговування, малогабаритність

Висновки: в результаті визначення переваг концепції товару можливо створення цільової реклами товару та донесення цільового повідомлення до кінцевого клієнта.

Таблиця 3.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару		Сутність та складові		
I.	Товар за задумом	Засіб дає можливість користувачеві оцінити відносно положення тіла в просторі за допомогою виміру прискорення, та з подальшою обробкою даних безпосередньо визначити місцерозташування користувача, або пристрою на якому встановлений засіб.		
II.	Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
		1. Малогабаритність	15г	Тх
		2. Швидкість роботи	70Гц	Тх
		3. Точність	0,1° СКВ	Тх
		4. Надійність	IP67	Тх
		5. Вартість	50	Е
		Якість: сертифікати відповідності якості ISO, сертифікація для використання в медичних закладах, сертифікація IEEE.		
Пакування				
Марка: Amalthea				
III.	Товар із підкріпленням	До продажу Максимальна комплектація, необхідна для замовника		
		Після продажу після продажна підтримка, сервіс, гарантія, сервісне обслуговування		
Захист товару проводиться шляхом патентування приладу, проведення заходів захисту програмного та апаратного забезпечення, .				

Висновки: основними засобами захисту від копіювання є патентування програмних та апаратних рішень, що використовуються у приладі. Окрім того, захист програмного коду повинен запобігти копіювання програми. Закладені характеристики на другому та третьому рівнях товару робить його унікальним серед конкурентів.

Таблиця 3.20 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
	90-120 у.о.	50-80 у.о.	1200-2000 у.о.	50-90 у.о.

Висновки: обрано середню цінову категорію, оскільки занадто висока ціна відлякує споживача.

Таблиця 3.21 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Продаж	Повний супровід товару до замовника	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)
	Оренда	Надання консультацій та оренди обладнання	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)

Висновки: основними каналами збуту є оренда та продаж. Через відносно не великі об'єми виробництва нема сенсу використовувати підрядників для реалізації товару. Тому обрано нульовий рівень глибини каналу збут та прямої системи збуту.

Таблиця 3.22 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
	Зовнішні обставини спонукають споживача до пошуку рішення	Реклама SMM сайт виробника	Високошвидкісна Легкість надійність	Донесення можливості отримання прибутку за допомогою цього засобу	Показ можливості даної системи та можливість застосування

Висновки: Маркетингова комунікація проходить через рекламу приладу в соціальних мережах, наукових закладах, наукових та інноваційних конференціях, виставках, рекламі комп'ютерних ігор чи кінофільмів. Метою цих оголошень є донесення можливостей даної системи та вигоди від використання. Вся медіа реклама спрямована на створення «вау» - ефекту.

4.4 Висновки до розділу

Даний розділ присвячений розробленню першого етапу створення стартап-проекту. Найголовнішим в проведенні будь-якої наукової роботи є подальша комерціалізація отриманих результатів та можливість застосування розробленої концепції в промисловості. Більшість ідей в тій чи іншій мірі впливають на економічну складову підприємства. Тому розроблена ідея може бути використана як бізнес модель та може бути продана зацікавленим особам.

Першим кроком було відбір та висвітлення самої ідеї проекту. Для цього в Таблиця 3.1 приведено назву проекту та можливі зацікавлені сторони, котрі будуть потенційними споживачами продукту та які саме ризики можуть бути під час реалізації. Аналіз слабких та сильних сторін дають можливість автору проекту визначити аспекти, на яких слід зробити ставку. Перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик ідеї дає можливість до уявлення конкурентоспроможності запропонованого рішення. Для даного проекту було обрано виявлено не зайняту нішу товару у сфері виробників електроніки. Сильними сторонами проекту являються можливість до інтеграції з іншими приладами та підвищення стійкості та надійності системи.

Наступним кроком проводився технологічний аудит проекту. Під час аудиту автор отримує можливість до розуміння кращої технології виконання. Виявлено що більшість технологій вже існує, однак використання останніх не дасть можливості мати переваги над конкурентами. Саме ставка на інноваційні методи підвищення точності можуть зробити пристрій унікальним та незамінним. Загалом, створення проекту можливе, однак необхідно провести доволі сильну рекламну компанію, щоб отримати покупців.

Зважаючи на стрімкий розвиток технологій, для швидкого отримання ресурсів та прибутків, слід обрати кооперацію, як форму ринкового впровадження проекту. Тобто, для того щоб встигнути за ринком, слід не розроблювати систему з нуля, оскільки це займе доволі багато часу, а запропонувати лідерам ринку використання запропонованих програмних рішень. Звісно, це є альтернативою, оскільки в такому випадку ні одна зі сторін не отримає повного прибутку.

Після аналізу всіх аспектів ринку, подальша імплементація проекту можлива. Але є одна важлива умова. Слід провести доволі сильну рекламну компанію, та донести до споживачів необхідність використання системи саме з підвищеною заводостійкістю та чому саме обрати наш датчик.

ВИСНОВКИ

1. В роботі проаналізовано стан і перспективи підвищення функціональних характеристик вимірювачів СОН в умовах інерційних збурень. Детально вивчено сучасні підходи для забезпечення стійкості вимірювачів СОН, в тому числі розглянуто інтелектуалізацію приладів СОН як ефективний засіб підвищення їх інформаційних характеристик.
2. Розроблено математичну модель динаміки ОМА в умовах вібрації. Обрано конструктивну схему побудови ОМА, для подальшої її використання в дослідженнях. Отримані рівняння руху чутливого елемента ОМА в умовах вібрації. Проведено спрощення рівнянь.
3. Запропонована модель систематичної похибки ОМА в умовах інерційних збурень, та запропоновано метод її компенсації. Отримана компактна формула постійної складової похибки ОМА. Вибрані додаткові датчики для виміру параметрів руху ЧЕ.
4. Здійснено програмне моделювання ОМА з системою компенсації вібраційної похибки. Проведено перевірку програмної моделі ОМА на адекватність. Представлені результати досліджень програмної моделі ОМА в умовах вібрації.
5. Проведено аналіз компенсації систематичної похибки. Було виявлено, що запропонований метод ефективно компенсує постійне зміщення вихідного сигналу під дією вібрації, але має також свою похибку компенсації. Ефективність запропонованого методу зменшується при збільшенні амплітуди та частоти інерційних збурень.

6.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Я.В. Беляев – «Использование квадратурной составляющей выходного сигнала для тестирования ММГ» // ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», С-Петербург.
2. Храпов, Ф. И. К вопросу использования различных видов избыточности для оценки состояния измерительных систем с труднодоступными первичными измерительными преобразователями в процессе эксплуатации [Текст] / Ф. И. Храпов, // Вестник метролога. – 2010. – № 3. – С. 11–15. 5.
3. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. –2005. –№ 1. –С. 7-24.
4. Фирсов С.Н. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ВИМІРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ РУХУ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ І ОРІЄНТАЦІЇ // Радіoeлектроніка, інформатика, управління. 2013. № 1 – С. 144 – 150.
5. Weinberg, H. Gyro Mechanical Performance: The Most Important Parameter // Technical Article MS-2158. AnalogDevices, Inc. – September 2011. – pp.1-5.
6. Некрасов, Я.А. Улучшение эксплуатационных характеристик отечественного микромеханического гироскопа RR-типа /Я.А.Некрасов [и др.] // Материалы XXI СПб международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 2014. – С.226-235.
7. Евстифеев, М.И. Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях /М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. – №1. – С.119-133.
8. Lestev M.A. The influence of nonlinear factors on dynamics and accuracy of micromechanical gyroscopes // Proceedings of 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 2007. – pp.24-25.
9. Евстифеев, М.И. Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении // Гироскопия и навигация. – 2007. – №2. – С.63-76
10. Гаврилов А.А. Виброустойчивость микромеханического акселерометра /А.А.Гаврилов, А.Н. Шипунов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Алексеева. – 2013 .- №3 .- С. 308 – 315.
11. Патент 2486469 РФ, МПК G01C 19/56. Способ подавления ложного сигнала в измерителе угловой скорости с микромеханическими гироскопами // Я.А. Некрасов; заявл. 31.01.2012; опубл. 27.06.2013; Бюл. №.18. – 12 с.

12. Barbour, N. Inertial MEMS System Applications /N. Barbour [et al.]// Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. RTO LECTURE SERIES 232. – 2004. – pp.7-1–7-12
13. Патент 2486468 РФ, МПК G01C 19/56. Измеритель угловой скорости // Я.А. Некрасов; заявл. 31.01.2012; опубл. 27.06.2013; Бюл. №.18. – 13 с.
14. Люкшонков, Р.Г. Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре / Р.Г. Люкшонков, Н.В. Моисеев // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2011. - №4. - С.67-72.
15. Патент 2471149 РФ, МПК G01C 19/56. Микромеханический гироскоп компенсационного типа// Я.А. Некрасов, Н.В. Моисеев, Р.Г. Люкшонков; заявл. 07.12.2010; опубл. 20.06.2012; Бюл. №.17. – 10 с.
16. Евстифеев, М.И. Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2010. – №4. – С.46-50.
17. Патент РФ № 2289789, МПК G 01 C 19/56, G 01 P 9/04. Устройство измерения перемещения подвижной массы микромеханического гироскопа по оси первичных колебаний / Некрасов Я.А.; заявитель ФГУП «ЦНИИ «Электроприбор». – № 2005130466/28; заявл. 23.09.05; опубл. 20.12.06, Бюл. № 35.– 8 С.
18. Найфе А.Х. Методы возмущений. – М.: Мир, 1976. – 386 с.
19. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. – М.: Наука, 1972. – 471 с.
20. Влияние трехкомпонентной вибрации на осевой микромеханический акселерометр / В. Я. Распопов, В. В. Турчанинов, Ю. В. Иванов // Датчики и системы. – 2009. – № 8. – С. 63 – 65.
21. Мироненко П.С. Модель погрешности осевого микромеханического акселерометра в условиях вибрации / П.С. Мироненко, В.В. Демьяненко, Т.В. Демьяненко // Вісник НТУУ “КПІ” Серія Приладобудування .- 2014. - № 47. С. 39 -43.
22. Елисеев Д.П. Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2014.- №4. С.56 -68.
23. Евстифеев М.И. Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Ковалев, Д.В. Розенцвейн // Научно – технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. - №4 (74).- С. 69 – 73.

24. Сапегін О.М., Романов М.О., Бугайов Д.В. Безплатформова інерціальна навігаційна система на основі динамічно налагоджених гіроскопів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – №6 – С. 94 – 100. doi: 10.20535/1810-0546.2016.6.81064
25. Компенсація похибки акселерометра за допомогою додаткової інформації про рух інерційної маси / М.О. Романов, Мироненко П.С. // Погляд у майбутнє приладобудування: збірник статей XI науково-практичної конференції студентів та аспірантів, 15-16 травня 2018р., м. Київ, Україна. – 2018. – С. 61.
26. Исследование датчиков давления резонансного типа /М.О. Романов, Мироненко П.С. // Погляд у майбутнє приладобудування: збірник тез та доповідей Том 1 X науково-практичної конференції студентів та аспірантів, 16-17 травня 2017р., м. Київ, Україна. – 2017.
27. Пронин А.Н., Сапожникова К.В., Тайманов Р.Е. Достоверность измерительной информации в системах управления. Проблемы и решения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. Том. 9. – №3. – С. 32-37.
28. Taymanov R., Sapozhnikova K. Metrological self-check and evolution of metrology // Measurement. – 2010. – Vol.43. – № 7.– Pp. 869-877.
29. Вавилов, В.Д. Теоретические основы микромеханических акселерометров и гироскопов: Учебное пособие / В.Д. Вавилов. - Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области приборостроения и оптотехники для студ. спец. 200103 «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы», 200106 «Информационно-измерительная техника и технологии». - Н.Новгород : НГТУ, 2011
30. Héctor J. De Los Santos “On the Ultimate Limits of IC Inductors-An RF MEMS Perspective”, 2002 Electronic Components and Technology Conference.

ДОДАТОК А

Програма задання параметрів та початкових умов програмної моделі.

```

clc
clear all
format long
lz = 1e-4;% м
g = 9.8;
%Канал Y
m = 7.5e-5; % кг
Kdy = 23.48; % Н*(с/м)
Gy = 525; % Н/м
% Коф. каналу Y
Y1 = Kdy/m
Y2 = Gy/m
Y3 = lz

%Канал Beta
Jb = 1.1320e-9;%кг*м^2
Kdb = 4.75e-4;%Н*(с/м)
Gb = 47.72e-5;% Н*м
% Коф. каналу Beta
B1 = Kdb/Jb
B2 = Gb/Jb
B3 = m*lz

%Канал Alpha
Kdal = 4.75e-4;%Н*(с/м)
Jal = 1.1320e-9;%кг*м^2
Gal = 47.72e-5;% Н*м
% Коф. каналу Alpha
A1 = Kdal/Jal
A2 = Gal/Jal

%Зовнішні збурення
Am_Fby = 0.0098;% м
Om_Fby = 100;% рад/с
Am_Fbz = Am_Fby;%
Om_Fbz = Om_Fby;% рад/с
ay = 0;
% Початкові умови
y0 = 0;
yt0 = 0;
A10 = 0;
Alt0 = 0;
Bet0 = 0;
Bet0 = 0;

%Модель симулінк та побудова графіків
sim('Sim')
t=tout;
y=yout;
Y = y(:,1);
Bet = y(:,2);
Ysred = mean(Y);
Betsred = mean(Bet);
figure (1)
plot(tout,Y,'LineWidth',4), grid

```

```
xlabel('час, с')  
ylabel('Переміщення чутливого елемента вздовж осі у, м')  
figure (2)  
plot(tout,Bet,'LineWidth',4), grid  
xlabel('час, с')  
ylabel('Переміщення чутливого елемента на кут Bet, м')
```

ДОДАТОК Б (Публікації)

УДК 531.383-11:531.714.7

М.О. Романов, М.С., студент гр. ПГ-61м, к.т.н., доц. Мироненко П.С.

КПІ ім. Ігоря Сікорського

КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБКИ АКСЕЛЕРОМЕТРА ЗА ДОПОМОГОЮ ДОДАТКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО РУХ ІНЕРЦІЙНОЇ МАСИ

Для осьового мікромеханічного акселерометра з пружним підвісом і зміщеним центром мас відносно геометричного центра проведена корекція похибки вихідного сигналу, яка виникає у вимірювача при роботі в умовах просторової лінійної вібрації. Для формування сигналу корекції використано математичну модель вібраційної похибки, отриману в роботі [1]. Особливістю датчика є наявність в схемі вторинних вимірювачів, з яких отримується додаткова інформація про рух інерційного тіла (первинного перетворювача).

Ключові слова: осьовий мікромеханічний акселерометр, просторова вібрація, компенсація систематичної похибки.

Вступ

Розробка систем керування сучасними рухомими об'єктами вимагає втілення нових підходів до їх проектування, створення нової елементної бази та використання нових інформаційних технологій. Не дивлячись на досягнуті значні результати в плані розробки інерційних датчиків, подальше покращення їх характеристик традиційними методами з використанням відомих конструктивних рішень, матеріалів і технологій стають надто обмежені.

В зв'язку з цим в останній час в наукових дослідженнях, промисловому виробництві і більшості практичних застосувань велику увагу приділяють дослідженню інтелектуальних датчиків в тому числі датчиків інформаційно – вимірювальних систем визначення параметрів рухомих об'єктів.

Під терміном “ інтелектуальний датчик ” часто розуміють датчик, який має спеціальне інформаційно – програмне оточення, що гарантує заявлені характеристики вимірювача на протязі всього життєвого циклу. Таке оснащення повинно забезпечувати постійну адаптацію датчика до змінних внутрішніх і зовнішніх умов, проводити контроль, аналіз і синтез окремих складових системи і функціонування датчика в цілому.

Стаття присвячена розробці способу корекції вібраційної похибки осьового мікромеханічного акселерометра [2] на основі додаткової інформації про рух чутливого елемента.

Огляд попередніх робіт

Питанням дослідження методів підвищення точності мікромеханічних приладів в умовах інерційних збурень присвячено багато робіт. В першу чергу це робота [3], в якій представлена загальна класифікація методів підвищення стійкості даних приладів.

В роботі виділено структурно - конструктивний підклас методів, який включає:

- зміну параметрів чутливого елемента (жорсткості елементів підвісу, демпфування, зменшення нелінійності характеристики пружного підвісу);
- конструктивні методи, в основі яких - зміна кількості інерційних мас та кінематичної схеми приладу.

Підклас алгоритмічних методів, ґрунтуються на розробці:

- додаткових процедур перетворення сигналу в чутливому елементі (ЧЕ);
- використання декількох ЧЕ;
- використання додаткових вимірювачів для обробки сигналів в реальному часі.

В роботі [4] докладно розглянуті питання алгоритмічної та схемної компенсації вібраційної похибки за рахунок додаткової інформації про зазор в датчику переміщень чутливого елемента. Запропонована структурна схема диференціального ємнісного датчика переміщень дозволяє виділити додаткову інформацію про зазор при дії вібрації та використати її для корекції показань приладу.

Результати досліджень

В даній роботі пропонується в якості засобу забезпечення зменшення впливу вібрації на показання приладу, використати корекцію похибки на основі комплексного використання структурно - алгоритмічний надлишковості [5].

Для цього, в першу чергу, була розроблена модель вібраційної похибки. Пропонується використати модель постійної складової похибки визначення прискорення осьовим мікромеханічним акселерометром в умовах вібрації у вигляді [1]:

$$\langle a_y \rangle = g \frac{m^2 l_z^2 w_y w_z}{2G_\beta \sqrt{(G_\beta - J\beta\omega^2)^2 + k_\delta \beta^2 \omega^2}} \quad (1)$$

де $w_y = y_{BA} \omega^2$, $w_z = z_{BA} \omega^2$ - амплітуди прискорень гармонійних вібрацій відповідно уздовж осей O_y, O_z ; y_{BA}, z_{BA} - амплітуди вібропереміщень відповідно уздовж осей O_y, O_z ; ω - частота вібрацій, m - маса чутливого елемента; G_β - жорсткість підвісу, l_z - зміщення центра мас відносно геометричного центра.

Для визначення реакції осьового акселерометра на інерційне збурення, з ціллю наступної компенсації похибки, структурна схема сенсора доповнена датчиками переміщень, а також датчиками віброшвидкостей.

Для підвищення точності цього методу описана процедура калібровки ЧЕ з метою визначення чутливості ММА до вібраційних збурень.

Знання коефіцієнтів чутливості до прискорень використовуються в подальшому в запропонованому алгоритмі при наступній компенсації. Представлені результати математичного моделювання, проведеного в MATLAB Simulink, показали ефективність запропонованого методу, що дозволило підвищити точність осьового мікромеханічного акселерометра при роботі в умовах вібрації.

Висновки

В роботі проведено дослідження методу корекції вібраційної похибки осьового мікромеханічного акселерометра. З метою корекції цієї похибки запропоновано використовувати інформаційно – надлишковий датчик.

Корекція похибки здійснюється в режимі реального часу на основі розробленої моделі вібраційної похибки і додаткової інформації про рух чутливого елемента. Для отримання необхідної інформації структурна схема акселерометра доповнена додатковими датчиками переміщень і датчиками вимірювання віброшвидкостей.

Як показало математичне моделювання, комплексне використання структурно – алгоритмічної надлишковості дозволило зменшити похибку датчика та підвищити експлуатаційні характеристики осьового мікромеханічного акселерометра зі зміщеним центром мас відносно центра підвісу при роботі в умовах вібрації.

Список використаних джерел

1. Мироненко П.С. Модель погрешности осевого микромеханического акселерометра в условиях вибрации / П.С. Мироненко, В.В. Демьяненко, Т.В. Демьяненко // Вісник НТУУ “КПІ” Серія Приладобудування .- 2014. - № 47. С. 39 -43.
2. Влияние трехкомпонентной вибрации на осевой микромеханический акселерометр / В. Я. Распопов, В. В. Турчанинов, Ю. В. Иванов // Датчики и системы. – 2009. – № 8. – С. 63 – 65.
3. Елисеев Д.П. Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2014.- №4. С.56 -68.
4. Евстифеев М.И. Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре / М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Ковалев, Д.В. Розенцвейн // Научно – технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. - №4 (74).- С. 69 – 73.

5. Храпов Ф.И. Комплексное использование избыточности для обнаружения метрологических отказов измерительных систем // Измерительная техника. – 2012. – №7. С. 11 – 15.

УДК 548.76

М.О. Романов студент, П.С. Мироненко ктн., доц..

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»

Исследование датчиков давления резонансного типа

Современное развитие специальной техники, к которой можно отнести ракетную, морскую, авиационную и двигателестроительную промышленности, как правило зависят от технического уровня информационно-измерительных систем. Качество и технико-экономические показатели этих систем определяются в первую очередь использованием в них измерительной аппаратуры. В специальной технике такая аппаратура эксплуатируется в условиях действия большого количества внешних возмущений типа вибраций, перепадов температур, линейных ускорений. По этому при создании измерительных комплексов, особенно систем ориентации и навигации, стоит вопрос о своевременном фиксировании различных измерительных параметров, что непосредственно влияют на работу специальной техники. Особенно остро заключается проблема в температурных перепадах, к которым очень чувствительны современные разработанные датчики давления (ДД). Они отличаются по своим конструктивным особенностям и методам обработки сигналов с чувствительных элементов (ЧЭ).

Наибольшее распространение среди ДД получили емкостные и пьезо датчики давления, которые характеризуются стабильностью своих метрологических характеристик и относительно малыми габаритами. К недостаткам можно отнести нелинейную зависимость емкости от приложенного давления.

В то же время они имеют свои недостатки, к которым следует отнести:

- изменение параметров датчиков от перепадов температур окружающей среды, ускорений, как (линейных так и угловых) и вибраций;
- недостаточная стойкость при механических возмущениях.
- нелинейную зависимость емкости от приложенного давления.

Для устранения этих и других недостатков возникает необходимость разработки и исследование новых датчиков давления, которые базируются на новых методах измерения и структурно-конструктивных особенностях. В то же время, использование микромеханических датчиков резонансного типа, которые приобретают в наше время все большего распространения, благодаря своим более стабильным характеристикам, могут решить выше упомянутые проблемы. Создание и разработка непосредственно

температурной коррекции, для мониторинга влияния температурных перепадов окружающей среды, что должна устранить одну с главных проблем неточности измерения резонансных ДД.

Резонансный принцип действия используется в датчиках давления на основе вибрирующего цилиндра, струнных датчиках, кварцевых датчиках, резонансных датчиках на кремнии. В основе метода лежат волновые процессы: акустические или электромагнитные. Это и объясняет высокую стабильность датчиков и высокие выходные характеристики прибора. Преимуществами резонансных датчиков давления являются высокая точность и стабильность характеристик, которая зависит от качества используемого материала. К недостаткам можно отнести индивидуальную характеристику преобразования давления, значительное время отклика, невозможность проводить измерения в агрессивных средах без потери точности показаний прибора.