

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____Надія БУРАУ

«___»_____20__р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно - інтегровані технології та
системи навігації і керування»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

**на тему: «Датчик горизонту на базі двовісного мікромеханічного
акселерометра»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) III курсу, групи ПГ-п81

Тищенко Богдан Юрійович _____

Керівник: доцент каф. ПСОН, к.т.н., доцент

Мураховський Сергій Анатолійович _____

Рецензент: д.т.н., проф., зав.каф.

Киричук Юрій Володимирович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи навігації та керування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Тищенко Богдану Юрійовичу

1. Тема роботи «Датчик горизонту на базі двовісного мікромеханічного акселерометру», керівник роботи Мураховський Сергій Анатолійович, к.т.н., затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи 10.06.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи

Діапазон вимірювань кутів нахилу основи - до 30°, динамічна похибка - не більше 2%, смуга пропускання від 0 до 200 Гц. Температурний діапазон від - 30° С до +50° С.

4. Зміст роботи

Вступ. Огляд та аналіз сучасних типів акселерометрів. Принцип роботи та математична модель двовісного мікромеханічного акселерометру. Система горизотування на основі датчика горизонту. Розробка математичної моделі та моделювання роботи датчика горизонту на базі ММА. Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Презентація 15-20 слайдів. Рисунки, схеми в пояснювальній записці.

6. Консультанти розділів роботи*

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

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури	12.05.2021	
2	Огляд відомих датчиків і систем	17.05.2021	
3	Аналіз та вибір мікромеханічного акселерометру	17.05.2021	
4	Розробка моделі та моделювання роботи датчика горизонту	24.05.2021	
5	Оформлення пояснювальної записки	10.06.2021	

Студент

Богдан ТИЩЕНКО

Керівник

Сергій МУРАХОВСЬКИЙ

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

Анотація

Дипломна робота присвячена моделюванню датчика горизонту на базі двовісного мікромеханічного акселерометра.

Перший розділ описує різні типи мікромеханічних акселерометрів, класифікацію структури в залежності від виду переміщення інерційної маси та способу підвісу останньої, виду перетворення вимірювальної величини та характеру вимірювання прискорення і вихідного сигналу. Приведені функціональні схеми акселерометрів різних типів, опираючись на їх властивості, але більш детально розглянуто маятниковий мікромеханічний акселерометр.

У другому розділі детальніше йдеться мова про схемно-технічні рішення маяткового ММА, і особливості термічних ММА прикладом яких стали мікромеханічні акселерометри від компанії MEMSIC. Далі приведені характеристики одного з таких акселерометрів. У цьому ж розділі розповідається про використання датчиків у САГ і доведена актуальність використання такого методу.

Третій розділ включає в себе модель ММА, описово показані дослідження вібраційних навантажень відносно положення маси, наведені амплітудно-частотні характеристики маяткового ММА, області стійкості ЧЕ ММА при різних значеннях і аналіз руху інерційної маси. Нижче змодельовано датчик горизонту на базі ММА, і промодельовано використання САГ на основі датчика горизонту де приведено відповідні характеристики, чим і закінчується даний розділ.

Висновок включає проаналізований результат моделювання САГ та підведені підсумки по роботі.

Annotation

The bachelor's thesis is devoted to the modeling of the horizon sensor based on a pendulum micromechanical accelerometer.

The first section describes the different types of micromechanical accelerometers, the classification of the structure depending on the type of movement of the inertial mass and the method of suspension of the latter, the type of conversion of the measured quantity and the nature of acceleration and output measurement. Functional diagrams of accelerometers of different types are given, based on their properties, but the pendulum micromechanical accelerometer is considered in more detail.

The second section discusses in more detail the circuit-technical solutions of pendulum MMA, and the features of thermal MMA, which are exemplified by micromechanical accelerometers from MEMSIC. The following are the characteristics of one of these accelerometers. The same section describes the use of sensors in ALS and proved the relevance of using this method.

The third section includes the MMA model, descriptively shows the study of vibration loads relative to the position of the mass, the amplitude-frequency characteristics of pendulum MMA, the area of stability of the MMA at different values and analysis of the inertial mass. The MMA-based horizon sensor is modeled below, and the use of the ALS based on the horizon sensor is modeled, where the relevant characteristics are given, which is the end of this section.

The conclusion includes the analyzed result of ALS modeling and the summarized results on work.

Зміст

Анотація.....	4
Annotation	5
Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1.....	9
АКСЕЛЕРОМЕТРИ. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ВИДИ.....	9
1.1 Акселерометри прямого перетворення.....	11
1.2 Компенсаційні акселерометри	13
1.3 Принцип роботи та складові частини маятникового акселерометра ..	15
1.4 Рівняння руху маятникового акселерометра	23
РОЗДІЛ 2.....	26
СХЕМНО-ТЕХНІЧНЕ РІШЕННЯ І ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ММА.....	26
2.2 Термічні МЕМС-акселерометри для жорстких умов.....	30
2.3 Використання датчиків у системі	35
2.4 Система горизонтування основи для розміщення високоточного датчика.....	39
РОЗДІЛ 3.....	42
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ДАТЧИКА ГОРИЗОНТУ НА ОСНОВІ ММА	42
3.1 Моделювання датчика горизонту.....	53
3.2 Система автоматичного горизонтування на основі датчика горизонту	
3.2.1 Динамічні характеристики ЕМП.....	58
3.2.2 Динамічна характеристика ГП	60
3.2.3 Аналіз динаміки системи автоматичного горизонтування.....	62
Висновки.....	666
Список літератури.....	677

Перелік скорочень

ММА – мікромеханічний акселерометр;

ЧЕ – чутливий елемент;

САГ – система автоматичного горизонтування;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ФЧХ – фазова-частотна характеристика;

ДГ – датчик горизонту;

ЕМП – електромеханічний перетворювач;

ГП – гідропривід (гідропідсилювач);

ЦМ – центр мас;

МЦ -метацентр;

ДК – датчик кута;

ДС – двигун стабілізатор;

РЛС – радіолокаційна станція;

СПГ – система підйому і горизонтування;

АФЧХ - амплітудна-фазова частотна характеристика;

ЛАЧХ - логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;

ЛФЧХ - логарифмічна фазочастотна характеристика;

Вступ

Акселерометри – датчики лінійних прискорень, призначені для вимірювання прискорення рухомого об'єкту і перетворення в електричний сигнал. Сигнали, пропорційні прискоренню, використовують для стабілізації й автоматичного управління рухомими об'єктами на траєкторії. Акселерометри вимірюють уявне прискорення, що є різницею між абсолютним лінійним прискоренням об'єкта й прискоренням сили тяжіння Землі.

На сучасних літаках, ракетах, супутниках, машинах і космічних кораблях акселерометри застосовуються в автопілотах для поліпшення характеристик стійкості і керованості об'єкту, а в системах інерціальної навігації – як основні датчики, призначені для вимірювання прискорення, з яким переміщається центр мас об'єкту. Акселерометри також використовуються як індикатори площини горизонтування гіростабілізованих платформ і інших пристроїв.

РОЗДІЛ 1.

АКСЕЛЕРОМЕТРИ. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ВИДИ

Акселерометр являє собою прилад, який має інерційний елемент, переміщення котрого відносно корпусу приладу обмежено пружним зв'язком. Акселерометри вимірюють уявне прискорення, що є різницею між абсолютним лінійним прискоренням об'єкта й прискоренням сили тяжіння Землі.

Усі датчики прискорення, незважаючи на типи застосованих перетворювачів переміщення маси чутливого елемента (ЧЕ) в електричний сигнал й підвісу, розділяються на акселерометри прямої дії, тобто без застосування зворотного зв'язку, й компенсаційні, в яких здійснюється автоматичне зрівноваження інерційної сили ЧЕ з застосуванням зворотного зв'язку.

Розділяють низькочастотні акселерометри й віброакселерометри. Низькочастотні акселерометри використовуються для систем орієнтації й автоматичного керування об'єктом, що рухається. Віброакселерометри – для оцінки міцносних характеристик конструкцій.

Акселерометри відрізняються один від одного за принципом дії, габаритами, вагою, конструкцією, діапазоном вимірювання величин, чутливістю. Однак при всьому їхньому різноманітті можна вказати основні ознаки, за якими акселерометри відрізняються один від одного.

По характеру залежності між вимірюваним прискоренням і вихідним сигналом, акселерометри можна розділити: на прості, однократно інтегруючі, дворазово інтегруючі.

По виду переміщення інерційної маси акселерометри розділяються на датчики з лінійним – осьовим переміщенням рухливої системи – осьові акселерометри, і на датчики з кутовим переміщенням рухливої системи – маятникові акселерометри.

По способу підвісу інерційної маси акселерометри підрозділяються на чотири групи:

- з пружинним підвісом рухомої системи;

- з механічним підвісом рухомої системи у твердих опорах;
- з гідравлічним: гідростатичним або гідродинамічним підвісом;
- з комбінованим підвісом рухомої системи.

По виду перетворення вимірюваної величини акселерометри розділяються на датчики із прямим перетворенням і на акселерометри з перетворенням, що врівноважується силою або моментом, які одержали назву компенсаційних [1-3].

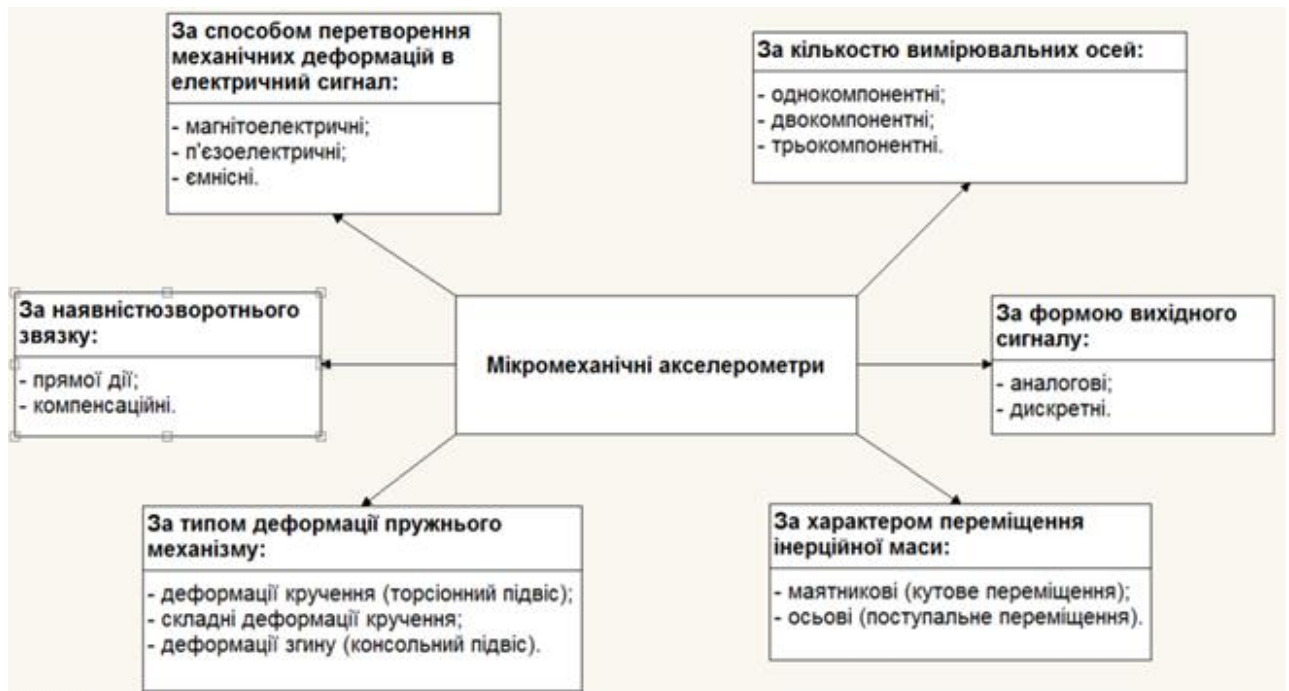


Рис 1.1 Види ММА

Найбільш поширені в техніці одержали низькочастотні акселерометри, які використовуються для рішення завдань керування на літаках, кораблях і ракетах.

Акселерометри можна розділити на дві групи щодо їх можливості вимірювати постійне прискорення: до першої групи належать датчики, здатні вимірювати вібраційні прискорення з частотами від часток герц до кілогерц, однак вони не можуть вимірювати постійні прискорення, це віброакселерометри, п'єзоакселерометри, геофони і інші подібні прилади. До другої групи належать акселерометри, здатні вимірювати як змінні, так і постійні прискорення.

По механізму роботи акселерометри поділяються на датчики з прямим перетворенням і компенсаційні.

Обов'язковою частиною акселерометра є чутливий елемент – фізичне тіло, що має певну масу. Чутлива маса акселерометра, в більшості випадків, має

правильну геометричну форму і пружно зв'язана за допомогою механічних пружин або електричної пружини з корпусом приладу.

У основі конструкції акселерометра – тягарець (інертна маса), який переміщається в корпусі на пружині (або іншому пружному елементі), реагуючи на сили інерції, що виникають при прискоренні або уповільненні об'єкту. Чим більше прискорення, тим більше відхиляється тягарець. Коли сила інерції тягарця врівноважується силою пружини, величина його зсуву від нейтрального положення, що свідчить про величину прискорення (уповільнення), реєструється датчиком переміщення і перетворюється в електричний сигнал на виході приладу. Цей сигнал потім подається в електронний блок або бортовий комп'ютер для обробки.

Конструкція акселерометра така, що він реагує тільки на ту складову прискорення, яка співпадає з напрямом переміщення тягарця, так званою віссю чутливості приладу. Прості акселерометри мають одну таку вісь, але є варіанти з двома або трьома осями чутливості. Особливість акселерометра полягає також в тому, що через його принцип роботи він реагує не тільки на силу інерції, а і на силу тяжіння. У одних випадках це заважає, а в інших, навпаки допомагає [1-3].

1.1 Акселерометри прямого перетворення

У акселерометрів даного типу вимірювальна схема ділиться на два класи. У першому випадку чутлива маса рухається поступально уздовж осі, в іншому випадку вона має форму маятника й робить кутові коливання під дією прискорення.

Кінематична схема акселерометра з лінійним підвісом представлена нижче.

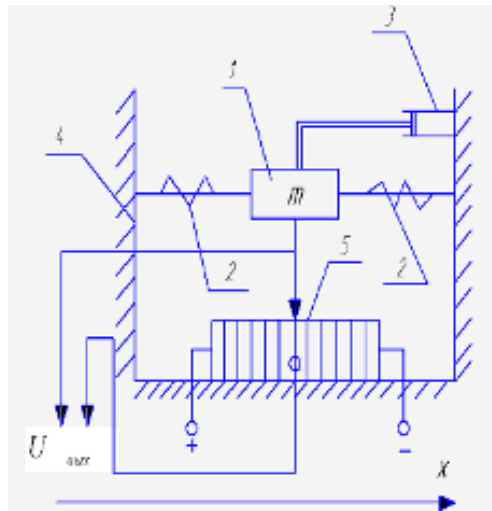


Рис 1.2 Схема акселерометра з лінійним підвісом

Чутливий елемент 1 масою m підвішений у корпусі 4 на двох пружинах 2. Заспокоєння коливань чутливого елемента здійснюється за допомогою демпфера 3, що може бути магнітно-індукційним, рідинним або повітряним. Переміщення чутливого елемента, щодо корпусу акселерометра можна виміряти за допомогою потенціометра 5.

До основних переваг цих датчиків варто віднести їхню простоту й зручність в експлуатації.

До недоліків:

1. Порівняно більшу основну похибку до 3% і нелінійність характеристики.
2. Низьку частоту власних коливань, що має значення одиниць – десятків герц і як наслідок, можливість виміряти з малою динамічною похибкою тільки сталі і інфра низькочастотні прискорення.
3. Значні переміщення чутливого елемента, що позначається на ресурсі датчиків.

4. У випадку застосування повітряних демпферів, виникаюча сила через стискальність повітря запізнюється відносно швидкості руху рухомої системи, крім того, при більших швидкостях повітря, стискуючись, працює як пружина, з'єднана паралельно основний, і на АЧХ з'являється другий резонанс.

До переваг маятникових акселерометрів варто віднести менший, у порівнянні з осьовими, момент тертя і, у зв'язку із цим, більшу чутливість. Однак, у порівнянні з осьовими вони мають додаткову похибку від вібрації та піддається впливу

перехресного прискорення, для компенсації якого вводяться додаткові елементи, що ускладнюють конструкцію.

Слід зазначити, що обидва розглянутих акселерометра мають лінійну характеристику в невеликому діапазоні відхилень чутливого елемента. Збільшення діапазону відхилень тягне використання нелінійних датчиків сигналу, виготовлення яких дорожче звичайних лінійних [2-3].

1.2 Компенсаційні акселерометри

Акселерометри компенсаційного типу виробляють автоматичне зрівноважування сили інерції чутливого елемента силою, значення якої можна виміряти досить точно.

Розглянемо осьовий компенсаційний акселерометр (Рис. 1.3). У цьому датчику переміщення інерційного тіла 3 з масою m відбувається уздовж прямолінійної напрямної, а інерційна сила врівноважується силою «електричної пружини», що складає з датчика лінійних переміщень ДП (наприклад, потенціометра); підсилювача В, і соленоїда зворотного зв'язку С.

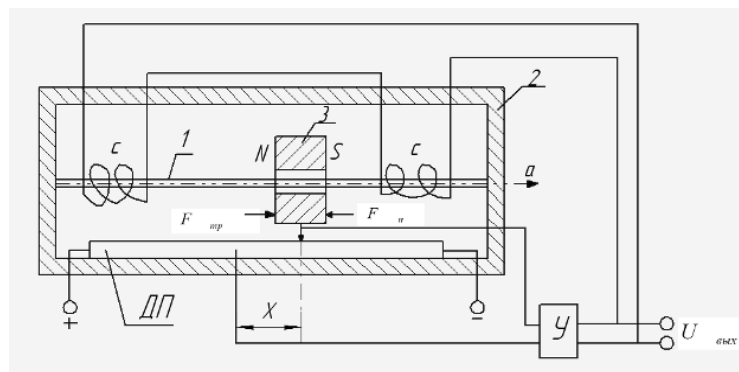


Рис 1.3 Осьовий компенсаційний акселерометр

Переваги осьового компенсаційного акселерометра, у порівнянні з акселерометром розімкнутого типу, очевидні. Це і лінійність градирувальної характеристики, і більше висока частота власних коливань. До недоліків варто віднести складність конструкції датчика і, як наслідок, труднощі його виготовлення

в малих габаритах. У зв'язку зі складністю конструкції зменшується й надійність датчика.

Розглянемо компенсаційний акселерометр маятничого типу (Рис. 1.4), відхилення маятника 1 під дією прискорення перетвориться індуктивним датчиком сигналу 2 в електричний сигнал. Цей сигнал після посилення й випрямлення подається на обмотки моментного магнітоелектричного перетворювача 3, що створює момент, що компенсує електричний струм $i_{\text{вих}}$ на виході підсилювача 4, а, отже, і спадання напруги $U_{\text{вих}}$, створюване цим струмом на додатковому опорі, пропорційні вимірюваному прискоренню a .

Для демпфування коливань маятника, підсилювач містить коригуючу ланку.

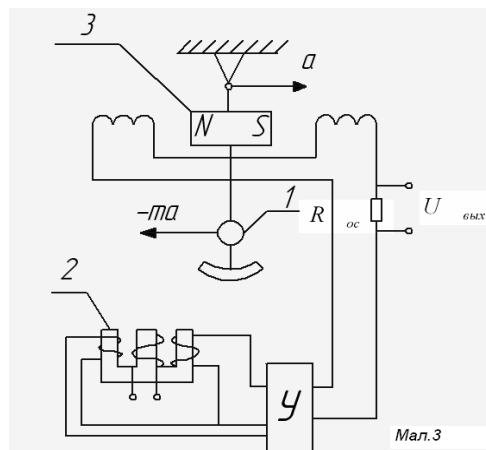


Рис 1.4 Компенсаційний акселерометр маятничого типу

З розглянутого матеріалу стають очевидними переваги маятникових компенсаційних акселерометрів, у порівнянні з датчиками без зворотного зв'язку та осевих акселерометрів, а саме:

- найменший момент тертя в осях, що дозволяє досягти найбільшої чутливості
- малі габарити
- порівняно проста конструкція
- досить висока лінійність характеристики за рахунок малого кута відхилення маятника

Однак основним недоліком цих датчиків є їхня чутливість до перехресного прискорення[2-3].

1.3 Принцип роботи та складові частини маятникового акселерометра

Маятниковий акселерометр – датчик вимірювання прискорень з кутовим рухом чутливого елемента в системі координат, нерухомо зафіксованій з корпусом приладу.

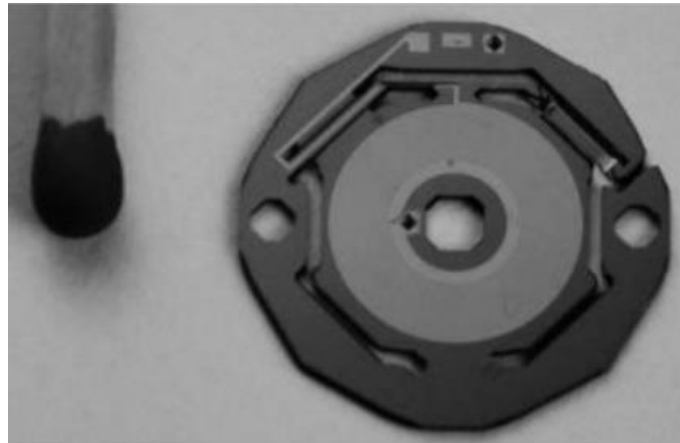


Рис 1.5 Маятниковий вузол акселерометра

Конструктивним вузлом маятникового акселерометра є чутливий елемент. Він в себе включає масу, яка за допомогою елементів підвісу фіксується до опорної рамки (основи). Пружні елементи підвісу можуть бути розташовані по принципу консольної або мостової схеми.

При мостовій схемі підвісу маса рухається тільки уздовж вимірювальної осі. Консольна схема підвісу маси має високу чутливість. Але все ж недоліком такої схеми є порушення співвісної рамки і маси при значних її переміщеннях.

Чутливі елементи маятникових мікромеханічних акселерометрів в своїй більшості мають консольну схему підвісу, в якій пружні елементи подібні до балок, що працюють на згин, або кручення.

Маятниковий акселерометр (Рис. 1.6) призначений для роботи в якості чутливого елемента для використання в інерційних авіаційних системах різного класу і призначення.

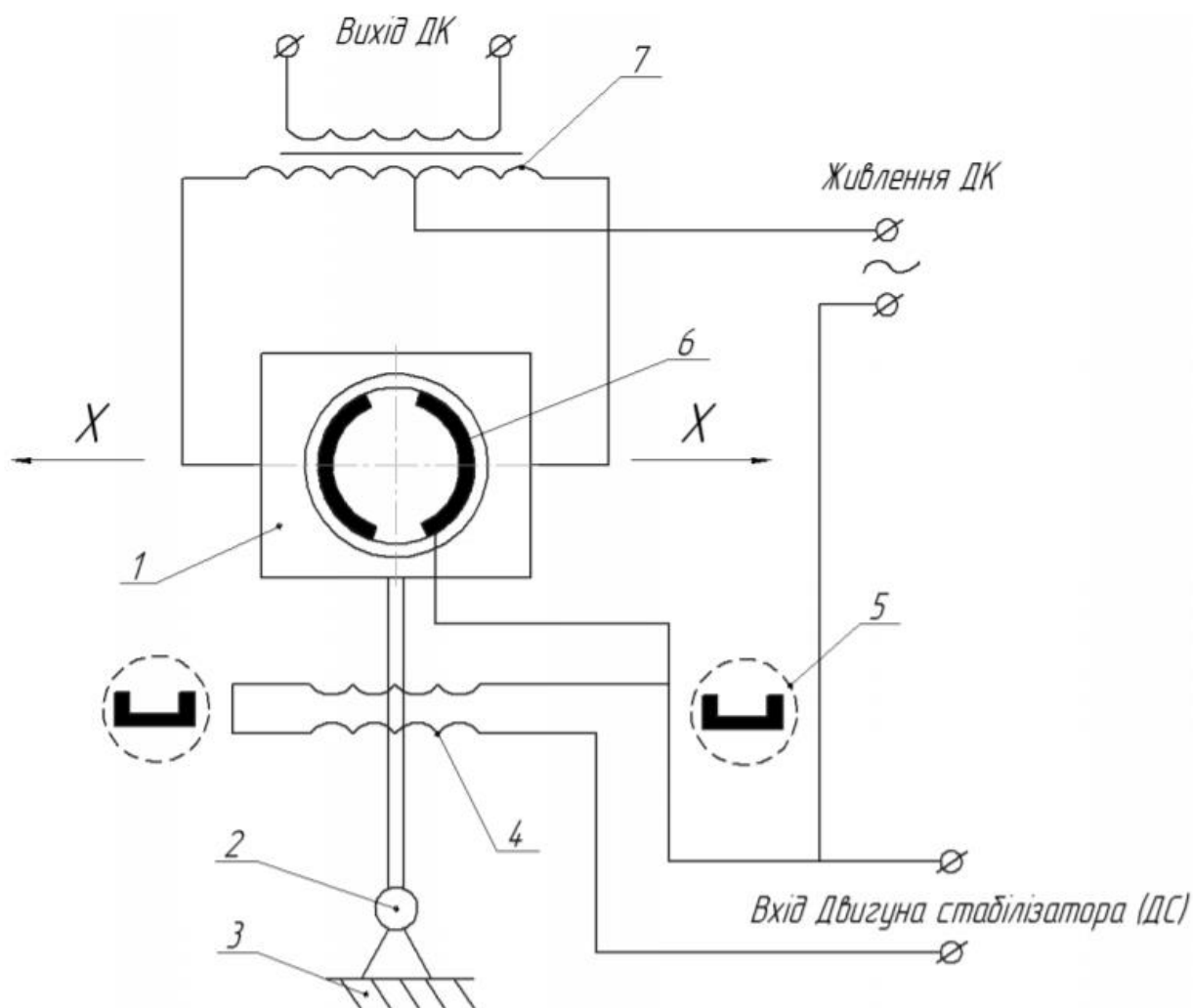


Рис 1.6 Функціональна схема маятникового акселерометра

Чутливим елементом приладу є фізичний маятник поз.1 на пружному підвісі поз.2, що має одну ступінь свободи. При впливі на маятник складової сили земного тяжіння в напрямку вимірювальної осі X-X приладу маятник відхиляється відносно корпусу. Цей поворот маятника за допомогою ємнісного датчика кута, що складається з диференційного конденсатора поз.6 і диференціального трансформатора поз.7, перетвориться в електричний сигнал по напрузі змінного струму і фазою, яка визначається напрямком відхилення маятника. Сигнал з датчика кута, а саме: з вихідної обмотки диференціального трансформатора поз.7, подається на підсилювач-перетворювач, який призначений для посилення і 18 перетворення сигналу. Отриманий і посилений сигнал надходить в обмотку магнітоелектричного датчика сили поз. 4,5. Момент, що виникає при взаємодії струму, що протікає в обмотках датчика сили, з полем постійного магніту поз.5,

врівноважує момент складової сил земного тяжіння. Отже величина цього струму пропорційна куту відхилення плеча маятника від вертикалі місця. Порогом чутливості акселерометра називають мінімальне прискорення, на яку він реагує.

Маятниковість (статичний момент) Pl акселерометра вибирають з умови забезпечення заданого порогу чутливості при наявності можливих шкідливих моментів $M_{вр}$ навколо осі повороту маятника:

$$\frac{Pl}{g} a_{min} \geq M_{вр} \quad (1.1)$$

При використанні маятникового акселерометра в якості датчика, порогове значення чутливості буде визначати чутливість акселерометра до нахилу основи в полі сил земного тяжіння. Розглянемо поведінку маятника, підвішеного на пружному шарнірі, у полі сил тяжіння Землі. Виберемо в якості основи маятника площину, перпендикулярну положенню плеча маятника, коли момент збурення пружного шарніру (пружний момент) дорівнює нулю. Вихідним положенням маятника є положення, коли основа його збігається з площиною горизонту і центру мас маятника знаходиться над площиною горизонту (верхня маятниковість). При повороті основи маятника навколо осі, паралельної осі повороту маятника або такою, що збігається з нею, на малий кут α (Рис. 1.7) від вихідного положення умови рівноваги маятника описується наступною рівністю:

$$Pl \cdot \sin \alpha \cdot (\beta + \alpha) = c \cdot \beta \quad (1.2)$$

де Pl – статичний момент маятника; β – кут повороту маятника відносно незбуреного по пружному моменту положення; α – кут повороту основи маятника відносно площини горизонту; c – кутова жорсткість пружного підвісу.

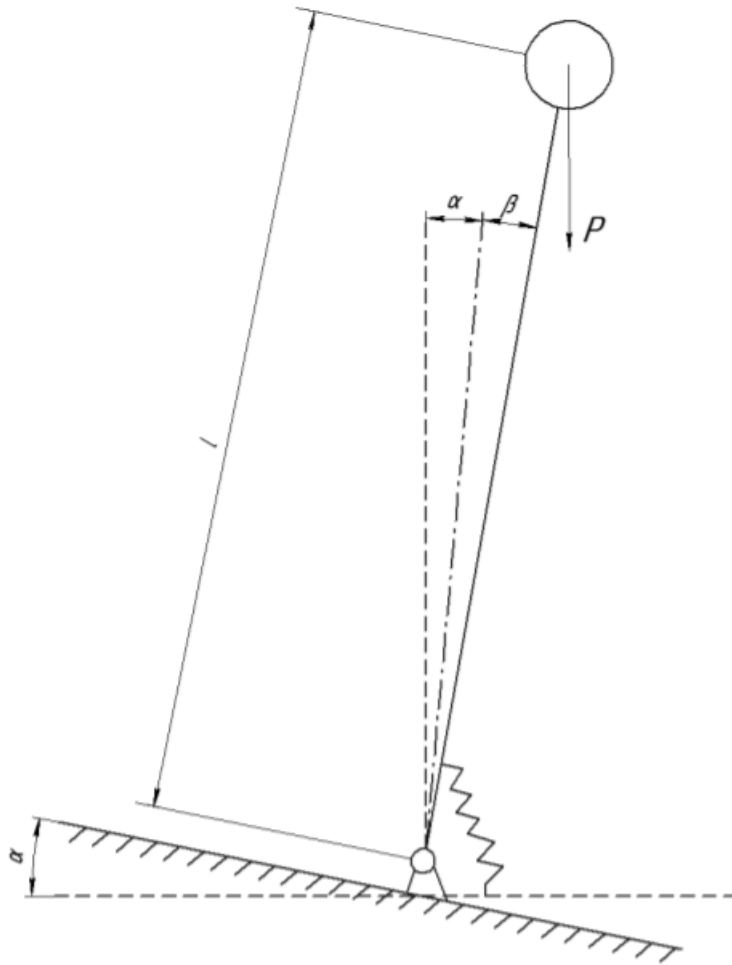


Рис 1.7 Схема повороту основи маятника

При малих кутах α та β умову рівноваги можна записати у вигляді:

$$|\beta| = \frac{\alpha}{1 - \frac{c}{Pl}} \quad (1.3)$$

Із співвідношення видно, що для збільшення чутливості маятника до нахилу основи необхідно, щоб відношення $\frac{c}{Pl}$ наближалось до одиниці або, іншими словами кажучи, щоб жорсткість пружного підвісу дорівнювала статичному моменту маятника.

Чутливі елементи маятникових акселерометрів мають малі габарити і вагу, володіють досить великою стабільністю зміщення нуля, однак похибка коефіцієнта перетворення протягом строку експлуатації становить 1-2%. Крім того, значно збільшуються об'ємно-масові характеристики приладу в зв'язку з необхідністю перетворення аналогового сигналу в імпульсну або цифрову форму[4,7,15].

Основними характеристиками ЧЕ є:

- нормоване значення вимірюваного прискорення;
- основна чутливість;
- поперечна чутливість;
- частотний робочий діапазон;
- габаритно-масові параметри.

Маятникові акселерометри мають більші можливості досягнення меншого тертя в підвісі при менших габаритах.

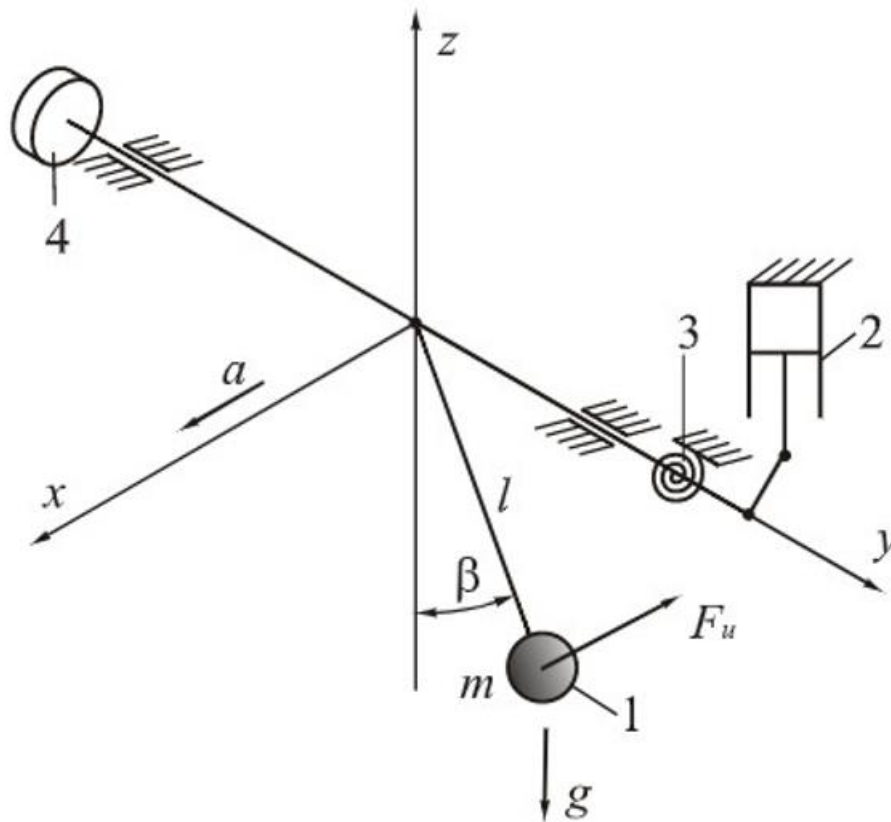


Рис 1.8 Схема маятникового акселерометра прямого перетворення

Тут інертна маса 1 зміщена на плече l від осі підвісу. При відсутності прискорення маятника розташовуються в нейтральному положенні (паралельно осі o_z), що відповідає не напруженому стану пружини 2. Вимірювальна вісь o_x у такого елемента перпендикулярна осі o_z , що з'єднує 8 питань із центром ваги маятника, що перебуває в нейтральному положенні.

При наявності постійного прискорення по осі o_x під дією сили інерції маятника повернеться навколо осі o_y від первісного положення на кут β обертаючий момент навколо осі o_y від інерційних сил дорівнює:

$$M = -ml(a_x \cos\beta - a_z \sin\beta) \quad (1.4)$$

Якщо припустити що кут β досить малий то можна вважати що $\cos\beta \approx 1$, $\sin\beta \approx \beta \approx x/l$.

На основі методу кінетостатики після приведення подібних членів можна записати диференціальне рівняння руху ЧЕ маятникового акселерометра

$$\beta'' + 2h\beta' + \left(\omega_0^2 + \frac{a_z}{l}\right)\beta = \dot{\omega}_y - \frac{a_x}{l} + \frac{M_T}{l} \quad (1.5)$$

Порівняння рівнянь (1.4) і (1.5) показує, що маятниковий акселерометр більше сприятливий до збурювань ніж осьовий. Крім корисної складовою прискорення a_x маятникових акселерометр сприймає також поперечну складову з лінійного прискорення a_z . Як слід з вираження (1.4), вплив перехресного прискорення тим менше, чим менше кут відхилення маятника β . В акселерометрах прямої дії зробити робочий діапазон цього кута дуже малим і зберегти при цьому можливість вимірювати прискорення в широкому діапазоні з високою точністю не представляється можливим [8].

Це завдання успішно вирішуються при використанні компенсаційної схеми акселерометра принцип дії якої пояснюється далі.

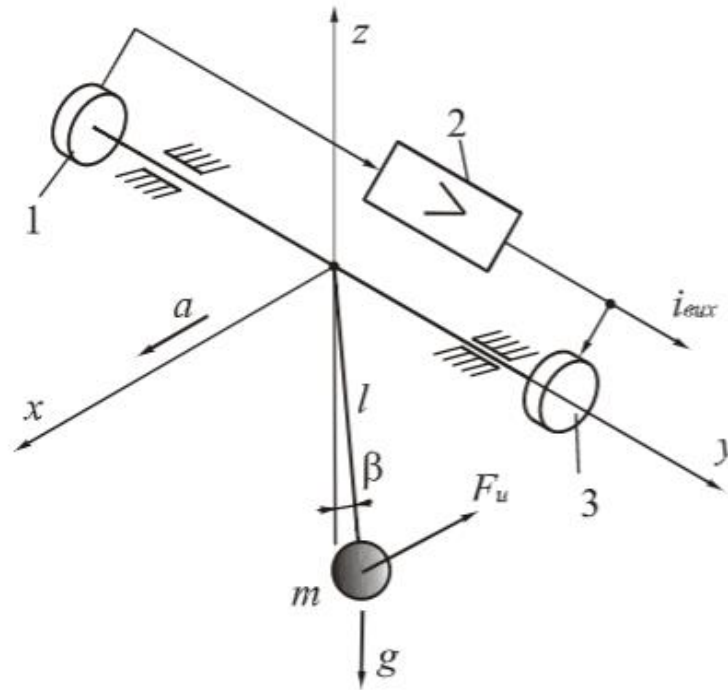


Рис 1.9 Схема компенсаційного маятникового акселерометра

У таких схемах до маятника прикладають момент, рівний по величині моменту, що розвивається силами інерції, але протилежно спрямований датчик кута 1, підсилювач 2 і датчик моменту 3 утворюють так звану «електричну» пружину. Мірою прискорення в такій схемі є вже не кут відхилення маятника, що тут може вже підтримуватися на рівні розв'язуваної здатності датчика кута (тобто теж може бути дуже малим при будь-яких діючих прискореннях), а компенсаційний момент, створюваний датчиком моменту. Якщо характеристика останнього лінійна, то мірою діючого прискорення може бути струм, що протікає по обмотці управління датчика. Дійсно в сталому режимі справедлива рівність між моментом інерційних сил $M_u = mla_x$ і моментом зворотного зв'язку «електричної» пружини $M_{oc} = ci_{oc}$, де $c = k_1k_2k_3$ – жорсткість «електричної» пружини; $k_1k_2k_3$ – крутість датчика кута, коефіцієнт підсилювача і крутість датчика моменту відповідно; i_{oc} – струм у контурі зворотного зв'язку.

Дорівнюючи останні вираження, одержимо:

$$i_{oc} = \frac{mla_x}{c}.$$

Розглянуті схеми акселерометрів мають аналоговий вихідний сигнал, що часто ускладнює його використання [4,7].

Маятникові акселерометри з електричною пружиною і гідравлічним підвісом інерційної маси (Рис. 1.11), знайшли більш широке застосування в інерціальних системах [8].

Рухома частина акселерометра являє собою герметичну циліндричну поплавкову камеру (7) із закріпленими на ній роторами датчиків кута (2) і моменту (6).

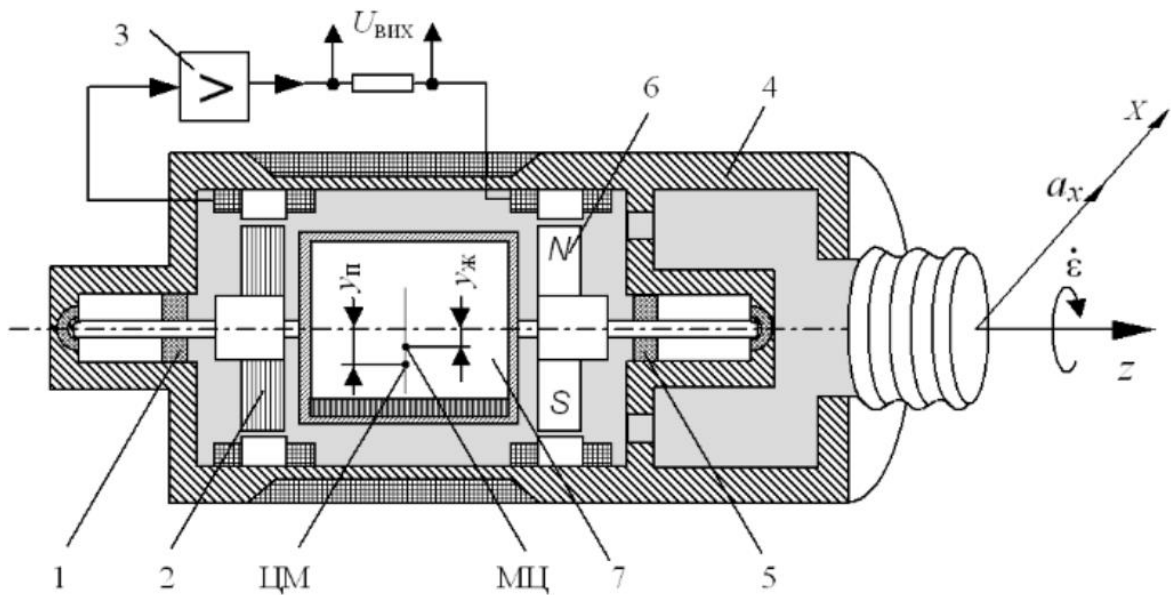


Рис 1.11 Кінематична схема маятникового акселерометра

Поплавкова камера 7 підвішена на кам'яних опорах 1 і 5 у герметичному корпусі 4, заповненому важкою рідиною. Питома густина матеріалу поплавця приблизно дорівнює питомій густини рідини. Поплавець знаходиться в стані нейтральної плавучості, оскільки сила ваги поплавця врівноважується силами гідростатичного тиску рідини. При цьому кам'яні опори 5 практично розвантажуються як від сил ваги, так і від інерційних сил, що виникають при прискореному русі акселерометра (разом з літаком). Центр мас (ЦМ) поплавкової камери акселерометра (Рис. 1.11) зміщений відносно осі її обертання z на величину $y_{\text{п}}$, а метацентр (МЦ) поплавкової камери (центр маси витисненого об'єму рідини) зміщений на величину $y_{\text{р}}$. Якщо акселерометр переміщається в горизонтальній площині з прискоренням a_x у напрямку, перпендикулярному осі z , то навколо осі z поплавкової камери діє інерційний момент

$$M_{z_{in}} = -\frac{G_p}{g} y_p a_x + \frac{G_p}{g} y_p a_x \quad (1.6)$$

де G_p – сила ваги поплавця; g – прискорення сили ваги; G_p – сила ваги рідини, витиснена поплавковою камерою.

У даному випадку $G_p = G_p = G_i$, отже

$$M_{z_{in}} = \frac{Gb}{g} a_x; b = y_p - y_p \quad (1.7)$$

де Gb_i – маятниковість поплавкової камери акселерометра.

Під дією інерційного моменту $M_{z_{in}}$ поплавкова камера починає обертатися навколо осі z . З датчика кута повороту поплавця 2 на підсилювач 3 надходить сигнал, пропорційний куту повороту ε . Сигнал підсилювача надходить на моментний датчик 6, який розвиває момент, пропорційний куту повороту поплавця («електрична» пружина). Таким чином, момент, що розвивається датчиком 6, врівноважує інерційний момент, а з виходу підсилювача 3 знімається сигнал, пропорційний діючому прискоренню a_x [7-8].

1.4 Рівняння руху маятникового акселерометра

Принцип дії акселерометра полягає у вимірюванні переміщень інерційної маси, яка підвішена на пружині, відносно корпусу приладу, тобто на вимірюванні інерційної сили, яка діє на цю масу. Чутливий елемент акселерометра є інерційною масою m (Рис 1.10).

Навігаційні акселерометри вимірюють тільки уявне, а не дійсне прискорення того місця літака, де він знаходиться, тобто вони вимірюють різницю між прискоренням точки установки акселерометра відносно нерухомої системи координат й прискоренням сили тяжіння.

Рівняння руху маси акселерометра показує, що по лінійному або кутовому переміщенню вздовж осі чутливості інерційної маси можна судити про уявне прискорення точки установки акселерометра на ЛА.

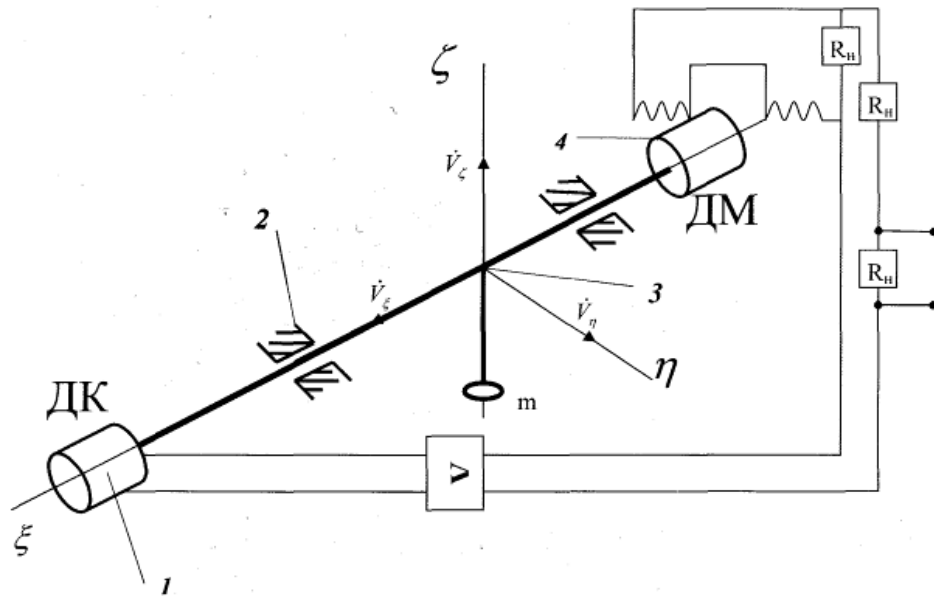


Рис 1.10 Кінематична схема маятникового акселерометра

де 1 – датчик кута; 2 – опора; 3 – рухомий вузол; 4 – датчик моментів.

Маятниковий акселерометр являється вимірювачем прискорень з кутовим переміщенням ЧЕ в системі координат, жорстко зв'язаної з корпусом приладу. Чутливим елементом являється плоский маятник, утворений масою m . Центр мас маятника видалений від осі обертання на відстані l . Два датчика: кутів і моментів встановленні на осі ξ . Рівняння руху рухомого вузла акселерометра відносно корпусу має вид:

$$J_{\xi}\beta'' + B\beta' + k\beta = mlV'_{\eta} \cos \beta + mlV'_{\xi} \sin \beta + M_{\xi} \quad (1.6)$$

де J_{ξ} – момент інерції рухомого вузла, B – коефіцієнт кутового демпфірування, k – кутова жорсткість пружини, ml – маятниковість рухомого вузла, M_{ξ} – сума неврахованих шкідливих моментів, які діють на вісь ξ .

Маятникові акселерометри використовуються в системах стабілізації центру мас у позиційному і інтегруючому варіантах. Відомо досить велика різноманітність конструктивних схем маятникових акселерометрів. Однак загальною для них ознакою є наявність механічної системи, пов'язаної з маятником, і електричної або фотооптичної (а також електростатичної, ємнісної) системи знімання корисної інформації[7-9].

Компенсаційний метод вимірювання, покладений в основу більшості маятникових акселерометрів, в принципі, забезпечує високу точність вимірювання. Реалізація цього методу в акселерометрах здійснюється за допомогою компенсуючих силових або моментних пристроїв, заснованих на різних фізичних принципах - механічних, електромагнітних, електростатичних.

- фотоприймач (ФП) типу ФД –19КК;
- закріплену на пластині ЧЕ шторку зі щілиною;
- датчик моменту (ДМ);
- блок електронних перетворювачів БЭП49, що включає:
 - підсилювач попередній (ПП35);
 - пристрій перетворення інформації (ППІ86);
 - широтно-імпульсний модулятор (ШІМ43);
- нагрівач (Н).

При дії прискорення ЧЕ зі шторкою зміщуються, порушується рівність засвічення двох пар фотодіодів координатного фотоприймача, сигнали з якого через двоканалний ПП35 надходять на пристрій ППІ86, що формує:

- дискретний сигнал у контур зворотного зв'язку для управління через ШІМ43 датчиком моменту;
- аналоговий сигнал і ланцюг регулятора (у складі ШІМ43) струму світлодіода для стабілізації його світлового потоку;
- послідовний двійковий вхід в шину даних на ППІ88 в якості вихідної інформації акселерометра про збільшення лінійної швидкості об'єкта, а також про температуру середовища під кожухом приладу.

Пристрій ППІ88 через комутатор термостабілізації КТС45 забезпечує включення-відключення нагрівача, розміщеного на корпусі акселерометра.

У мікромеханічному виконанні реалізуються в основному три схеми акселерометрів з пружними підвісами ЧЕ як прямого, так і компенсаційного перетворення:

- ММА з поступальним переміщенням ЧЕ;
- ММА з пружним підвісом маятникового типу;
- вібраційний ММА.

Як датчики переміщення ЧЕ використовуються ємнісні, а також тензорезистивні і п'єзоелектричні датчики.

Компенсація вимірюваних інерційних сил і моментів здійснюється за допомогою датчиків сили або моменту магнітоелектричного або електростатичного типів[7].

Діапазон максимальних прискорень, вимірюваних за допомогою ММА, може досягати величини порядку 105 g.

На рис. 2.1 (а, б) показані митників ММА. Конструкція на рис. 2.1 (а) призначена для використання в спеціальних боєприпасах, що зазнають дуже високі ударні навантаження, і дозволяє вимірювати прискорення до 105 g. ММА, конструкція якого представлена на (Рис. 2.1, б) , призначена для використання в системах орієнтації і навігації різноманітних рухливих об'єктів; похибка цього ММА становить $(10^{-4} - 10^{-3})$ g.

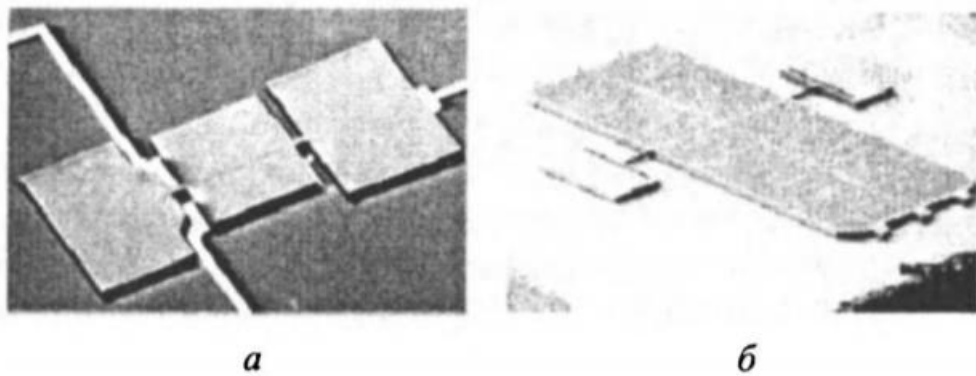


Рис 2.1. ММА маятникового типу

Великих успіхів в розробці ММА домоглася компанія Analog Devices, чії ММА стали практично першими масово випускаються інерційних МЕМС датчиками. В основі ММА - одно - або двокомпонентний пружний підвіс, поступально переміщується в площині підкладки ЧЕ. В якості системи знімання застосовується ємнісний датчик, виконаний у вигляді гребінчастої структури. Підвіс виготовлений методом поверхневої мікромеханічними обробки в полікремнію товщиною 2 мкм. В обсязі кристала кремнію і в поверхневих полікремнієвих шарах крім ЧЕ розміщені підсилювачі сигналів з виходу первинного перетворювача інформації, аналогово-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі, демодулятор, джерело опорного напруги, схеми самодіагностики і термостабілізації параметрів.

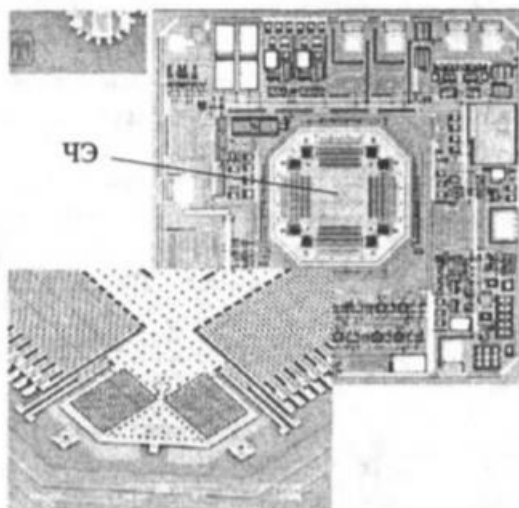


Рис 2.2 MMA від компанії Analog Devices

Області утворені двома найважливішими характеристиками акселерометрів (рис. 2.3), що визначають їх клас точності: чутливість і стабільність масштабного коефіцієнта[7-9].

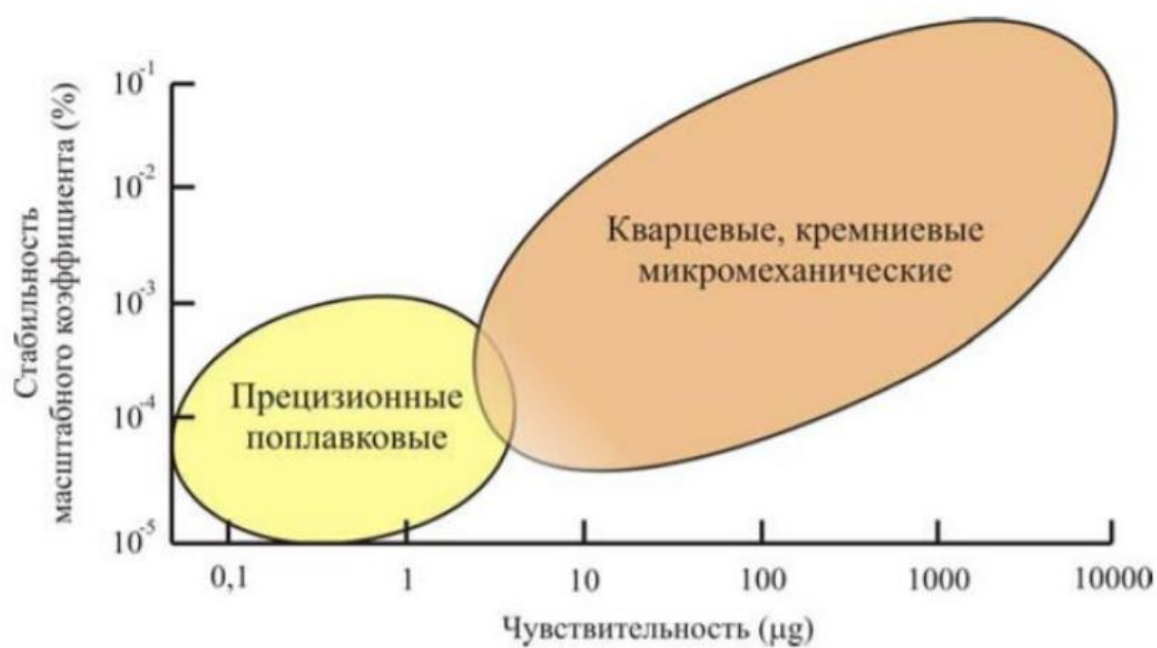


Рис 2.3 Области розподілу характеристик, що визначають клас точності акселерометрів різного типу

2.2 Термічні MEMC-акселерометри для жорстких умов

Якщо розглянути акселерометри у сфері, де на апаратуру чи систему діють вібраційні навантаження, або навіть ударні навантаження, то слід відзначити, що звичайні MEMC-акселерометри, в яких основним елементом є мікромеханічний осередок (рис.1), (де на поверхні кремнієвої підкладки вирощують мембрану і при виникненні прискорення в напрямку перпендикулярному мембрані, виникає деформація вгору або вниз і в залежності від цього ємність конденсатора збільшується або зменшується.), працюючи в таких умовах несуть за собою декілька негативних наслідків.

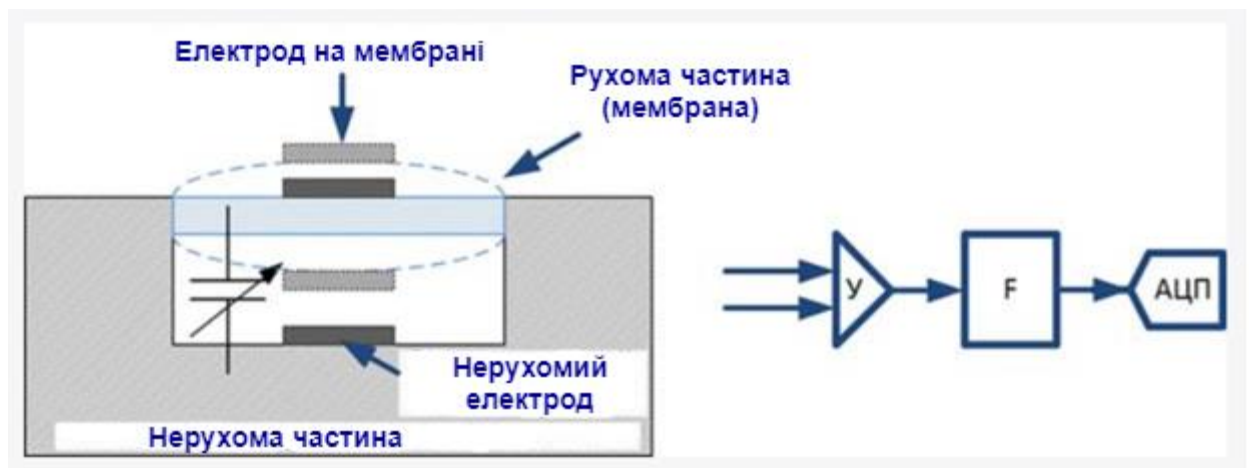


Рис 2.4 Структура ємнісного MEMC-акселерометра

Найперший з них – при частоті, близькій до резонансу, виникає ефект постійного прискорення, коли мембрана без наявності реального прискорення буде мати деформований стан. По-друге, при наявності потужних вібрацій осередок може зруйнуватися або деградувати. Деградація може початися і при значних ударних навантаженнях. По-третє, при поступовій деградації все калібрування, зроблене раніше, виявляється порушеним, і датчик починає виробляти невірні вимірювання. Остання - звичайні MEMC схильні до старіння, як і всі рухомі механізми - це виражається в зменшенні чутливості осередків з плином часу, особливо при наявності сильних прискорень протягом часу експлуатації.

Для боротьби з цими ефектами виробники датчиків вдаються до різних конструктивних ускладнень, а точніше, MEMSIC Inc винайшла власний підхід,

який полягає у кардинально іншій побудові осередку датчика і створенні термічного MEMC-акселерометра. Елементарна комірка при цьому має герметичну структуру з нагрівачем і датчиками температури.

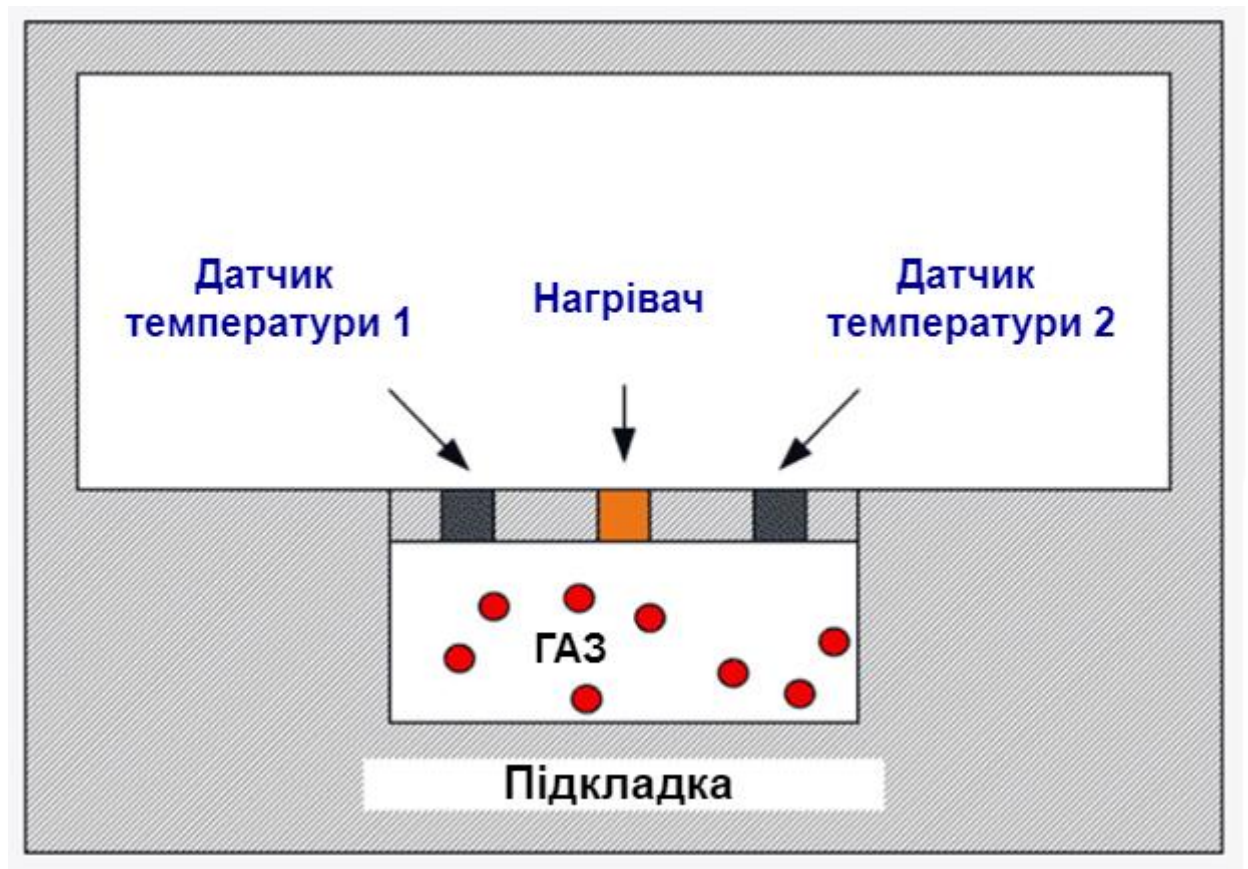


Рис 2.5 Структура термічних MEMC-акселерометрів (MEMSIC Inc)

У спрощеному вигляді принцип роботи такої структури полягає в наступному: нагрівач виробляє нагрів молекул газу в камері, а надчутливі датчики фіксують диференціальну температуру цього газу. Навіть при найменшому прискоренні або повороті відбувається зміна числа молекул, що вдаряються об поверхню датчиків температури. Наприклад, при повороті представленої осередки за годинниковою стрілкою кількість молекул, що потрапляють на датчик 1, зменшиться, а потрапляють на датчик 2 зросте. По різниці показань можна визначити прискорення. Як зазначено вище, система не має механічних рухомих частин, а отже теоретично вільна від виникнення резонансу і несприйнятлива до ударних навантажень.

Як висновок дана структура базової комірки акселерометра має такі переваги:

- відсутність частоти резонансу і стійкість до вібрацій в широкому діапазоні частот;
- максимальна стійкість до ударних навантажень (до 50 000 g);
- немає ефекту залипання;
- відмінна температурна і тимчасова стабільність;
- не вимагають особливої технології виробництва.

Номенклатура MEMSIC налічує більше двох десятків термічних MEMC-акселерометрів з багатьма інтерфейсами [10]. Нижче приведений двовісний акселерометр з SPI-інтерфейсом MXP7205VF.

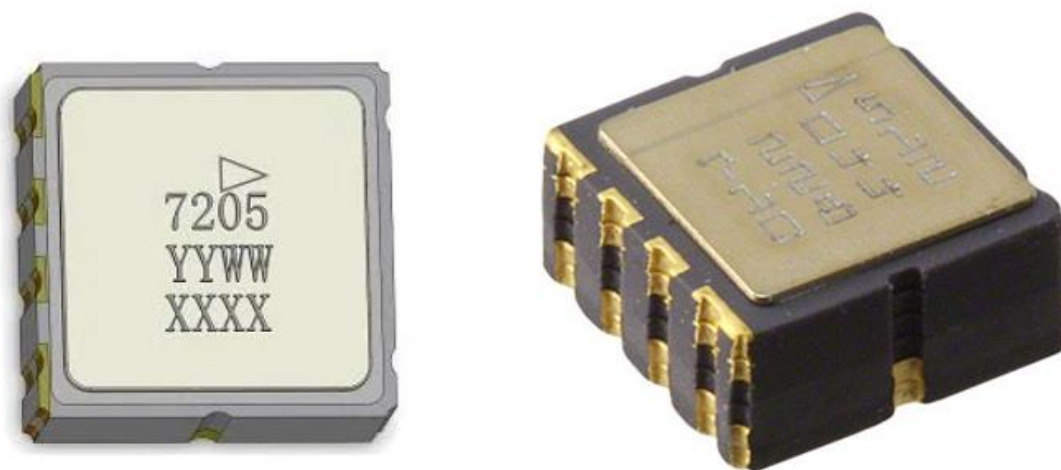


Рис 2.6 Акселерометр MXP7205VF

MEMSIC MXP7205VF - це високоефективний тепловий акселерометр XZ або XY, який відповідає вимогам AEC-Q100. Унікальна упаковка цього акселерометра дозволяє горизонтально або вертикально встановлювати SMT безпосередньо на друковану плату, забезпечуючи орієнтацію XZ або XY. Його діяльність базується на запатентованій компанії MEMS-тепловій технології, яка забезпечує ключові корисні експлуатаційні характеристики для автомобільного застосування. Теплова технологія зондування MEMS забезпечує неперевершену вібростійкість із властивою частотною характеристикою низьких частот 29 Гц, усуваючи помилки, пов'язані із ударами гравію та іншими прискореннями поза зоною. Він має чудову 0g та стабільність чутливості у повному діапазоні робочих температур. Він побудований монолітно, використовуючи стандартний процес CMOS 0,6 мкм.

Насправді немає рухомих частин і відсутні помилки, що спричиняють резонанси структури сенсора, таким чином забезпечуючи більш точні вимірювання прискорення з меншими пошкодженнями поля, ніж конкурентна технологія. Він не має вимірюваного термічного або механічного гістерезису. Він ідеально підходить для вимірювання прискорення в автомобілі з низьким рівнем г. Інтерфейс SPI використовується для зв'язку з цим пристроєм та доступу до надійних функцій самоперевірки, необхідних для критичних програм безпеки. Стійкість при ударі перевищує 50000г [11].

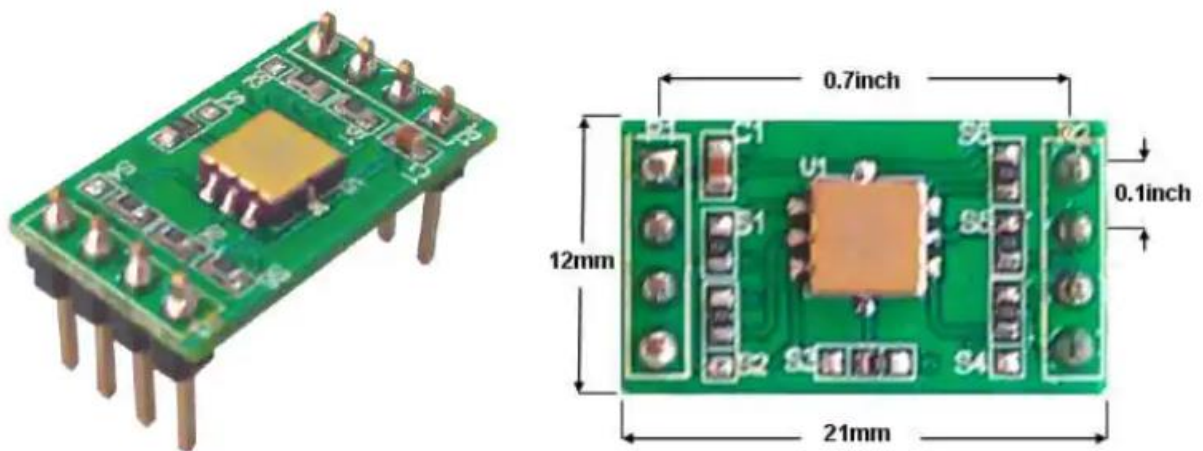


Рис 2.7 Розміри MXP7205VF-B

MXP7205VF - це двовісний акселерометр, побудований за стандартним субмікронним процесом CMOS. Він вимірює прискорення з повномасштабним діапазоном $\pm 5g$ та чутливістю 800LSB / g при 14-бітному режимі роботи та 50LSB / g при 10-бітному режимі роботи. MXP7205VF забезпечує інтерфейс SPI.

Типовий рівень шуму становить 0,6 мг / Гц, що дозволяє сигналам нижче 1 мг розпізнаватися на смузі пропускання 1 Гц. Властивий відкат пристрою 3dB становить 29 Гц, що забезпечує стійкість і послаблення вібрацій більш високої частоти, присутніх у автомобілях [11-13].

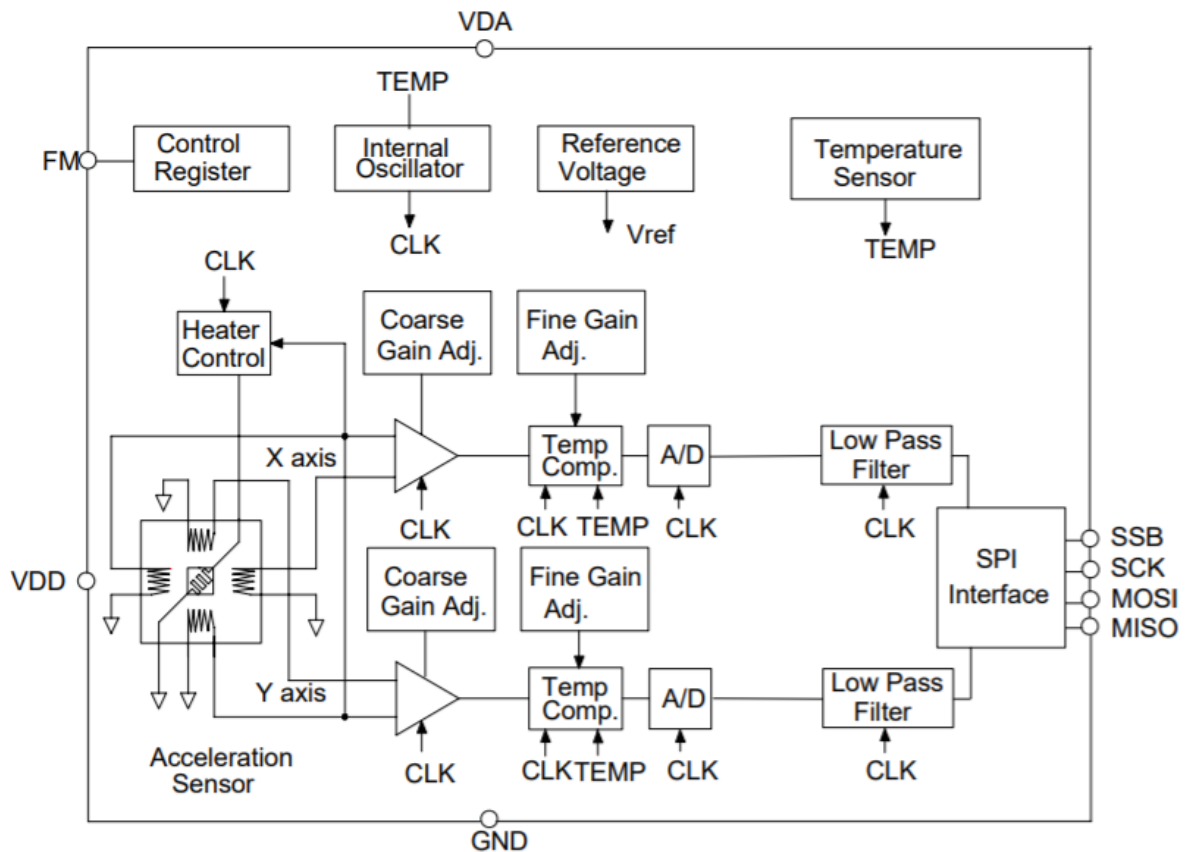


Рис 2.8 Функціональна блок-схема MXP7205VF

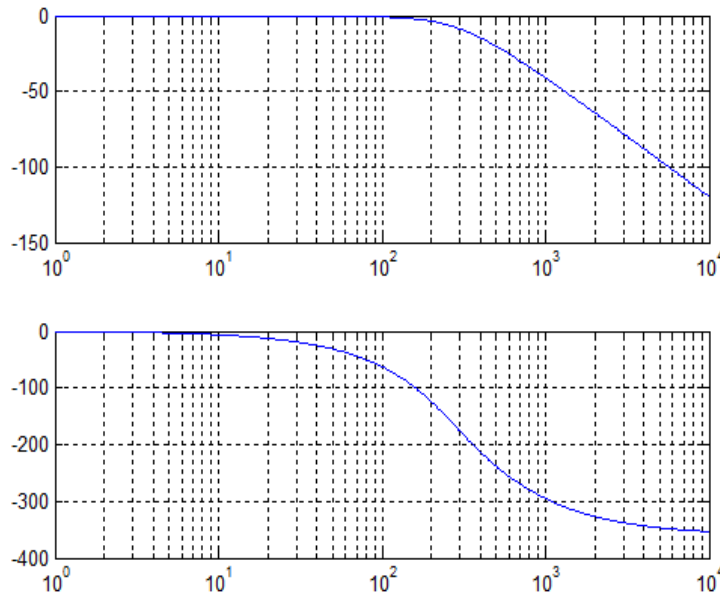
Табл.1 Опис штифта: Пакет LCC-8

Контакт	Ім'я	Опис
1	FM	Заводський режим
2	SSB	Функція SPI підлеглого вибору
3	VSS	Земля
4	SCK	Послідовний тактовий сигнал
5	MISO	Вхід ведучого, вихід веденого
6	MOSI	Вихід ведучого, вхід веденого
7	Vda	Аналогове живлення
8	Vdd	Цифрове живлення (VDA, VDD повинен мати однакову напругу)

Передатна функція датчика може бути представлена у вигляді добутку передатної функції чутливого елемента та цифрового фільтра Батерворта 2-го

порядку. Власні частоти ЧЕ складають - 40 Гц та 85 Гц, номінальна частота зрізу фільтра - 44 Гц:

$$W(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \cdot \frac{1}{(T_3 p + 1)^2} \quad (1)$$



Частотні
характеристики,
побудовані на
основі (1)
представлені на
Рис.1.

Рис 2.9 Частотні характеристики датчика

Смуга пропускання датчика на основі частотних характеристик складає від 0 до 150 рад/с. При високочастотних вібраційних навантаженнях датчик буде поводитись як фільтр низьких частот.

2.3 Використання датчиків у системі

Незалежно від типу опор горизонтування платформи можна здійснити тільки при наявності трьох і більше (зазвичай чотирьох) опорних агрегатів. При цьому обов'язковим елементом будь-якої СПГ є двохкоординатний (крену і тангажу) датчик нахилу, а іноді і вимірювач висоти підйому опорної платформи над поверхнею землі. Для зниження впливу швидкості переміщення опор на роботу датчиків їх зазвичай встановлюють поблизу центру маси. При великих розмірах та низькій жорсткості платформи відбувається її «скручування» і тоді використовують два двохкоординатні датчики нахилу, рознесених по поздовжній

осі. В деяких випадках застосовують дво-, однокоординатний датчик нахилу, які встановлюють по діагоналі платформи.

Існує велика різноманітність методів і способів підйому і горизонтування опорних платформ різного призначення, проте складність конструкції і відсутність єдиного підходу обмежують їх застосування. У зв'язку з цим виникла необхідність розробки нового способу автоматичного підйому і горизонтування опорної платформи, на якій розміщується антенно-щоголові пристрій і апаратура РЛС.

Пропонований спосіб автоматичного підйому і горизонтування дозволяє вирішити завдання визначення можливості підйому і горизонтування; оцінки просідання ґрунту; підйому, горизонтування, контролю і корекції поточного стану опорної платформи; видачі параметрів контролю на пульт управління; аварійного захисту елементів системи. З урахуванням виконуваних завдань згідно запропонованого способу автоматична СПГ повинна містити необхідний склад обладнання; мати запас ходу опор, достатній для підйому платформи на задану висоту і забезпечення необхідного діапазону кутів нахилу платформи по крену і тангажу; мати опорні і базові поверхні, що виключають погіршення точності горизонтування платформи в процесі роботи спеціального обладнання, а також виконувати різні діагностичні та захисні функції елементів системи.

При використанні чотирьох гідравлічних опор згідно способу автоматична СПГ, що відповідає вимогам і призначенням, повинна містити необхідний набір елементів і відповідати структурній схемі, зображеної на (Рис. 2.10).

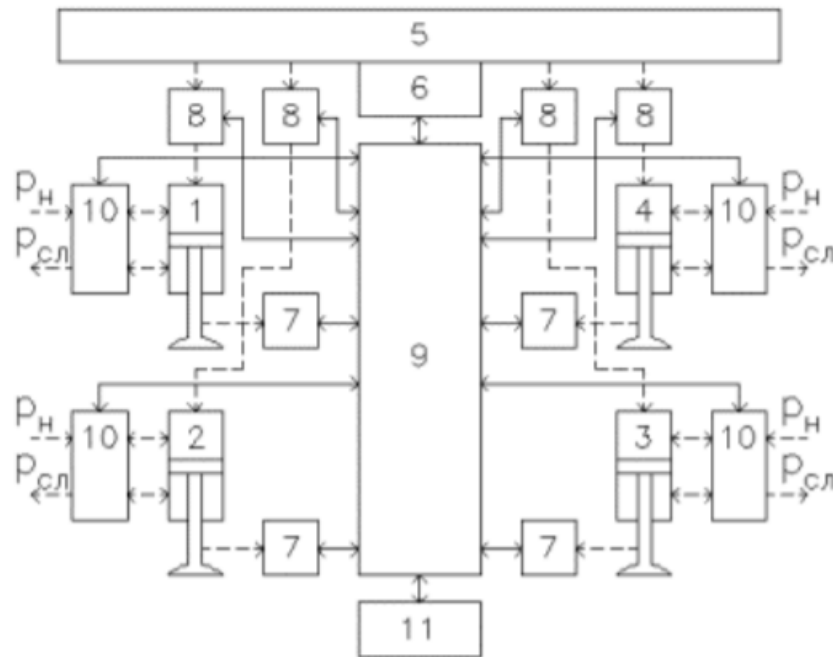


Рис 2.10 Структурна схема автоматичної СПГ

До складу системи (Рис. 2.10) входять гідравлічні опори 1-4, приєднані до опорної платформи 5. На платформі розташований двохкоординатний датчик нахилу 6, вимірювальні осі якого паралельні поздовжньої і поперечної осях платформи 5. Кожен з гідроциліндрів опор 1-4 обладнаний датчиком положення штока 7 і датчиком зусилля 8, прикладеного до гідроциліндра. Датчики 6-8 своїми виходами з'єднані з інформаційними входами блоку управління (БУ) 9, що входить до складу системи управління. Керуючими виходами БУ пов'язаний з чотирьохсекційним електрогідораспределітелі 10, виходи якого, підключені до гідроциліндрів опор 1-4. Включення і відключення системи здійснюється з пульта управління 11, вихід якого є керуючим входом БУ. Слід зауважити, що замість датчиків зусилля 8 можна використовувати датчики тиску, що встановлюються в поршневу порожнину гідроциліндрів.

При реалізації автоматичної СПГ запропонованим способом потрібно використовувати параметри просторової моделі опорної платформи.

Розроблений спосіб автоматичного підйому і горизонтирования опорної платформи на відміну від існуючих аналогів передбачає виконання за один цикл роботи наступних операцій: оцінки стану ґрунту, підняття платформи, розвантаження елементів ходової частини та горизонтирования опорної

платформи. Це дозволяє використовувати даний спосіб не тільки в різних статичних, але і динамічних системах горизонтирования типу активної підвіски, де для виключення поздовжньої і поперечної качки опорної платформи при її русі одночасно беруть участь в роботі всі опорні агрегати. Для реалізації способу потрібні Двохкоординатний (крену і тангажу) датчик нахилу, зорієнтований по поздовжній і поперечній осях платформи; чотири датчика зусилля (або тиску робочої рідини в поршневій порожнині при використанні гідравлічних опор) і чотири датчика положення опор.

Спосіб ґрунтується на застосуванні двох контурів управління по зусиллю і положенню, що дозволяє оцінити стан ґрунту і підвищити точність роботи системи.

Даний спосіб може бути реалізований і при наявності більш чотирьох керованих опорних агрегатів. В роботі визначені параметри якісної оцінки стану опорної платформи на всіх етапах функціонування системи і необхідні коригувальні та заборонені сигнали. Застосування нового способу виключає відрив опор від ґрунту, висування опор на максимальну довжину, а також торкання коліс машини опорної поверхні.

Для виключення небезпечних перекосів платформи при її підйомі і опусканні застосована автоматична синхронізація руху опор. Надані рекомендації щодо реалізації способу і експериментального визначення параметрів просторової моделі опорної платформи [16]. З метою формування рекомендацій практичного характеру в подальшому планується провести дослідження гідравлічної системи горизонтирования радіолокаційної станції, що реалізує запропонований спосіб.

2.4 Система горизонтування основи для розміщення високоточного датчика

Структура системи (Рис. 2.11) включає в себе основу 1 і приєднані до основи по кутах чотири електромеханічних домкрата 2. На платформі закріплений інклінометр 7. Кожен з електромеханічних домкратів 2 обладнаний трьома кінцевими датчиками 6. Інклінометр з'єднаний своїм виходом з входом мікроконтролера 8, що входить до складу системи управління. Іншими інформаційними входами МК пов'язаний з кінцевими датчиками 6. Керуючими виходами МК, через керуючі мікросхеми 5, пов'язаний з чотирма електричними двигунами 4, виходи яких, в свою чергу, підключені через редуктори 3 до входів домкратів 2. Включення і відключення пристрою проводиться блоком управління 9, який пов'язаний з мікро контролером двобічної зв'язком.

Система працює наступним чином. Перед початком роботи машини оператор на пульті управління переводить тумблер в положення включення пристрою, після чого блок управління 9 подає сигнал в МК 8. Надалі пристрій виробляє всі маніпуляції з електромеханічними домкратами в автоматичному режимі. БУ отримує сигнали з інклінометра 7, які пропорційні кутам нахилу платформи по осях крену і тангажа. У МК надходять сигнали з кінцевих датчиків 6, ці сигнали інформують про стан домкратів (торкання опори, висування домкратів до упору вниз, або вгору). БУ формує керуючі сигнали для керуючих мікросхем 5, які керують роботою електродвигунів 4. Вони в свою чергу передають крутний момент через черв'ячний редуктор 3 і опускають, або піднімають опори домкратів 2. Залежно від положення опор змінюються кути нахилу підстави 1 в горизонтальній площині.

Весь процес роботи системи розділений на два етапи: вивішування і горизонтування. Підстава встановлюється на спеціально підготовлений майданчик. Щоб забезпечити дотик усіма опорами домкратів поверхні, проводиться процедура

вивішування. Для цього, необхідно, щоб кожен домкрат був оснащений кінцевим вимикачем на опорі, яка буде сигналізувати про те, що домкрат торкнувся поверхні.

Після запуску системи горизонтування, відбувається опитування всіх чотирьох кінцевих вимикачів на опорах на предмет їх спрацювання. Якщо кінцевий вимикач на певному домкраті не спрацював, значить потрібно висувати домкрат до тих пір, поки опора не торкнеться поверхні і вимикач не спрацює. Для цього на двигун подається імпульс із заздалегідь заданою тривалістю, після якого відбувається повторне опитування кінцевого вимикача. Процедура повторюється до тих пір, поки не надійдуть сигнали з усіх кінцевих вимикачів на опорах.

Після того, як основу вивішено, відбувається безпосередньо процес горизонтування. Алгоритм заснований на застосуванні системи координат, прив'язаної по діагоналям основи (Рис. 2.11). Осями координат будуть прямі, що проходять через розташовані на кінцях однієї діагоналі домкрати. Це дозволить забезпечити незалежне регулювання по двох діагоналях. Таким чином, гарантується можливість одночасної роботи всіх чотирьох домкратів. Домкрати, розташовані на кінцях однієї діагоналі об'єднуються в пари і працюють одночасно.

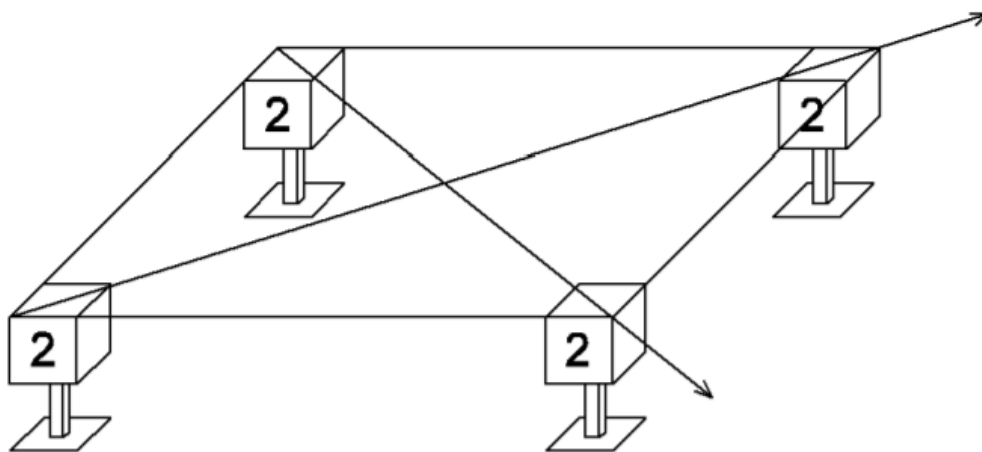


Рис 2.11 Схема розташування домкратів

Від інклінометра надходить інформація про поточні відхилення основи по поздовжній і поперечній осях, відносно горизонту. На підставі цих даних розраховується відхилення по осях діагоналей, виходячи з чого, визначається

напрямок обертання для кожного електродвигуна. Для кожної пари домкратів, напрямок обертання двигунів буде протилежним. Таким чином, перший двигун піднімає домкрат, другий опускає, що прискорює процес горизонтування.

Після того, як напрямки обертання задані, на електродвигуни подається імпульс із заздалегідь заданою тривалістю. Після чого відбувається повторне опитування інклінометра. Вся процедура повторюється до тих пір, поки показання інклінометра не будуть у межах заданого допуску. На цьому процедура горизонтування вважається завершеною. Паралельно з цим, між керуючими імпульсами здійснюється опитування додаткових кінцевих вимикачів на домкратах. Вони повинні бути встановлені у верхній і нижній частині кожного домкрата і сигналізують про досягнення штоком крайнього верхнього, або крайнього нижнього положення.

Це необхідно для того, щоб вчасно виявити ситуацію, коли домкрат досяг свого крайнього положення і уникнути отримання травм через механізму електродвигуна, редуктора, або самого домкрата. У разі надходження сигналу від будь-якого з цих кінцевих вимикачів, відбувається аварійна зупинка всіх електродвигунів, і процес горизонтування вважається перерваним.

Керуючий імпульс для електродвигунів розраховується заздалегідь і заснований на максимальному ході домкратів і номінальною швидкості обертання двигунів. Імпульс підбирається таким чином, щоб кут, на який підстава може відхилитися по одній діагоналі в результаті зміни положення домкратів за момент імпульсу, не перевищував похибка горизонтирования. З іншого боку, імпульс не повинен бути надто малим, інакше це зробить частішим непотрібні перевірки.

Запропонована структура і принцип роботи автоматичної системи дозволить забезпечити горизонтування основи для розміщення високоточного обладнання та суттєво скоротити час горизонтування з необхідним показником точності [17].

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ДАТЧИКА ГОРИЗОНТУ НА ОСНОВІ ММА

З пластиною маятникового ММА пов'язана система координат $Sx'y'z'$ з початком в центрі мас пластини, вісь спрямована ортогонально площині пластини, осі x' і y' - в площині пластини (рис. 3). Положення чутливого елемента - пластини маятникового ММА щодо корпусу приладу визначається переміщеннями z і y центру мас пластини, відлічуваними від положення статичної рівноваги і кутами α , β_1 , β_2 (Рис. 2,а). Приймається, що центр мас пластини маятникового ММА розташований на осі y' на відстані l від осі торсіона. Використовуються такі позначення:

m - маса, $J_x, J_y, J_z, J_{xy}, J_{yz}, J_{zx}$ - моменти інерції щодо осей $x' y' z'$ і відцентрові моменти інерції пластин ММА.

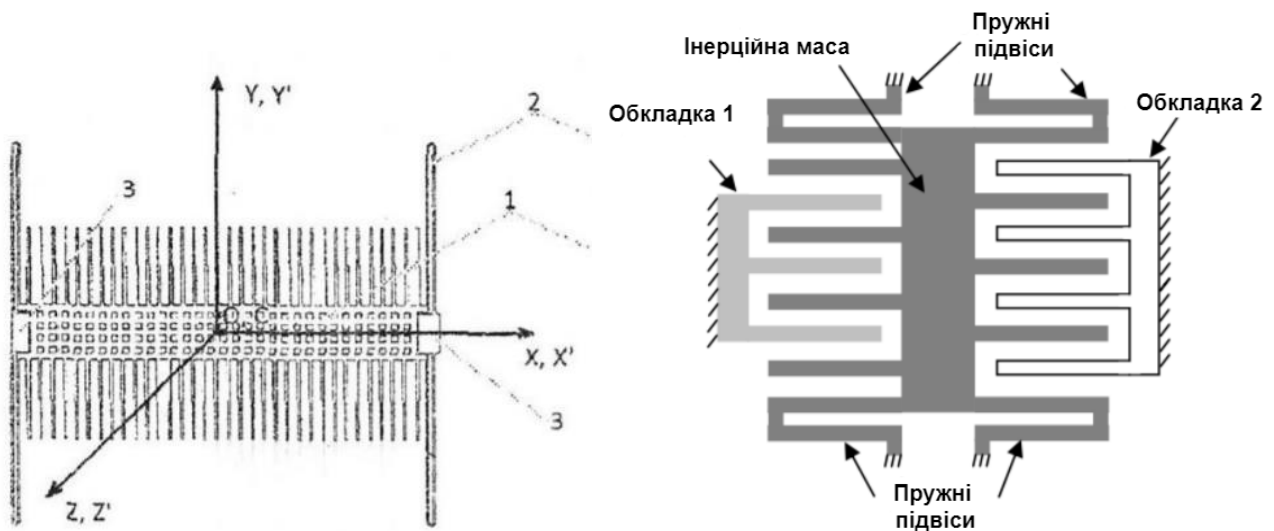


Рис 3. Конструкційна схема маятникового акселерометра

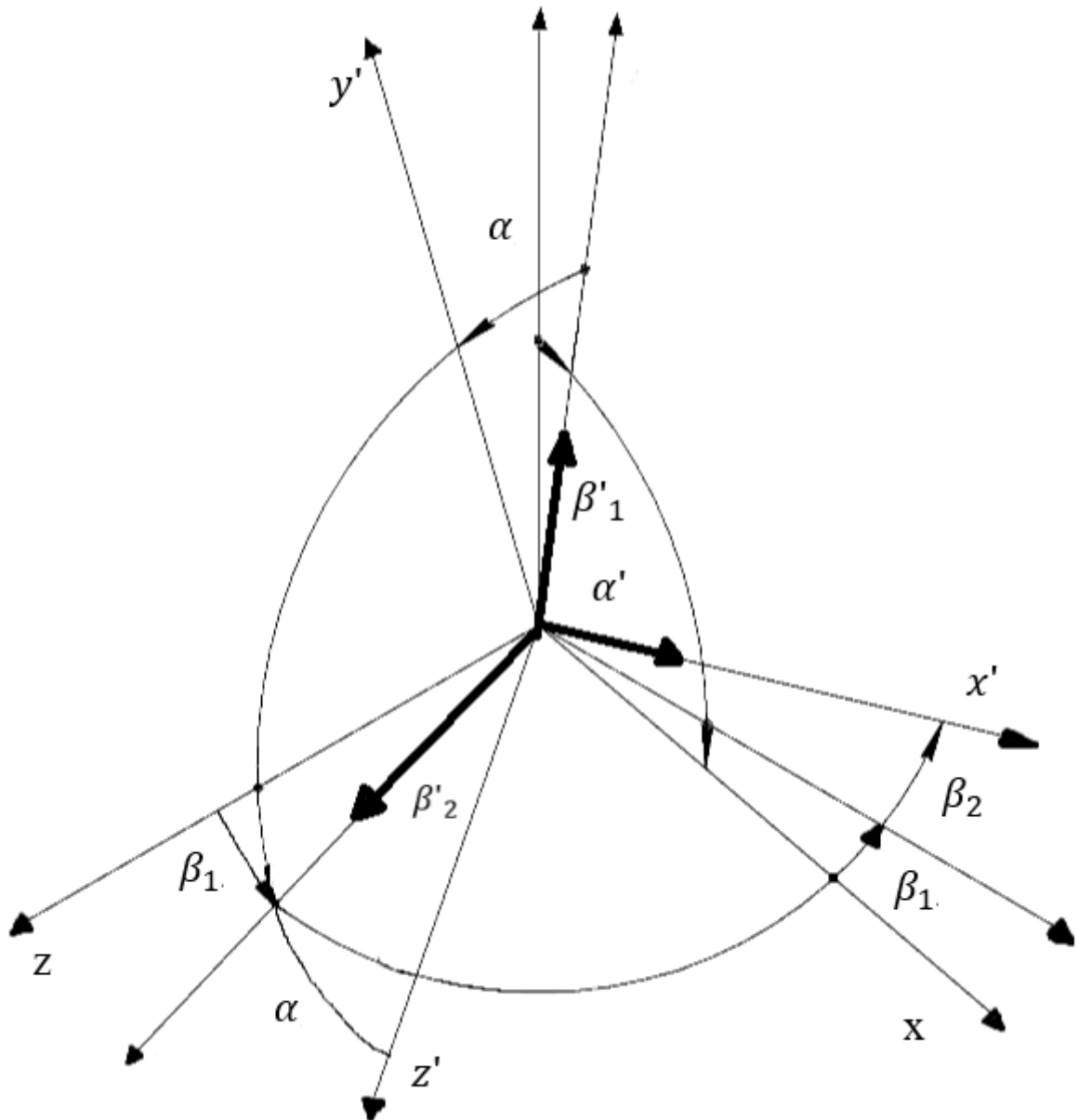


Рис 3.1 Система координат ММА

Амплітуди коливань основи, узагальнені координати ЧЕ ММА $x, z, y, \alpha, \beta_1, \beta_2$ і їх похідні за часом вважаються малими величинами. Склавши вираження для кінетичної енергії ЧЕ ММА і використавши рівняння Лагранжа другого роду, диференціальні рівняння руху пластини з урахуванням доданків другого порядку малості отримані у вигляді:

$$\begin{aligned}
 (J_x + m * l^2) * \alpha'' + \mu_\alpha * \alpha' + M(\alpha) - J_{xy} * \beta''_1 - J_{xz} * \beta''_2 - m * l * z'' = & -m * l * V'_{oz} + J_{xz} * \Omega'_z + J_{xy} * \Omega'_y - J_x * \Omega'_x - m * l^2 * \Omega'_x + Q_\alpha, \\
 J_{xy} * \beta''_1 + \mu_{\beta_1} * \beta'_1 + C_{\beta_1} * \beta - J_{xy} * \alpha'' - J_{yz} * \beta''_2 = & -J_y * \Omega'_y + J_{yz} * \Omega'_y + Q_{\beta_1},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (J_z - m * l^2) * \beta''_2 + \mu_{\beta_2} * \beta''_2 + C_{\beta_2} * \beta_2 - J_{yz} * \beta''_1 - J_{xz} * \alpha'' = \\
& m * l * (V'_{oz} + l * V'_{oz}) + J_z * \Omega'_y + J_{yz} * \Omega'_z + J_{xz} * \Omega'_x + Q_\alpha, \\
& m * z'' + \mu_z * z' + C_z * z - m * l * \alpha'' = -mV'_{oz} + m * l * \Omega'_x + Q_z, \\
& m * y'' + \mu_y * y' + C_y * y = -mV'_{oy} + Q_y \quad (3)
\end{aligned}$$

У рівнянні прийняті позначення:

$M(\alpha) = C_\alpha \alpha + k_\alpha \alpha^3, k'_\alpha, k'_x$ - коефіцієнти нелінійної складової жорсткості пружного підвісу ЧЕ ММА;

$C_\alpha, C_{\beta_1}, C_{\beta_2}, C_y, C_z, C_x$ - коефіцієнти жорсткості лінійної складової сили пружного підвісу;

$Q_\alpha, Q_{\beta_1}, Q_{\beta_2}, Q_y, Q_z, Q_x$ - складові другого порядку малості (для скорочення докладні вираження в авторефераті наведено тільки для Q_α);

$\mu_\alpha, \mu_{\beta_1}, \mu_{\beta_2}, \mu_y, \mu_z, \mu_x$ - коефіцієнти демпфування.

Отримані системи нелінійних диференціальних рівнянь руху на віброуючій основі ЧЕ осьового і маятникового ММА. В диференціальних рівняннях руху ЧЕ збережені складові, обумовлені нелінійною залежністю сил пружності підвісу від переміщення інерційної маси, і складові, що пояснюються особливостями динаміки чутливих елементів на пружних підвісах. Наведено основні параметри розроблюваних ММА. Дано опис технології виготовлення ЧЕ ММА [7,14].

При дослідженні вібраційного зміщення положення рівноваги при полігармонічних коливаннях основи рішення диференціальних рівнянь (3) знаходилося методом послідовних наближень, обмежуючись першим і другим наближеннями. Для вирішення рівнянь першого наближення використовувався комплексний метод. Зміщення (α) положення рівноваги ЧЕ ММА визначалося з рівнянь другого наближення усереднення нелінійних доданків на рішеннях рівнянь першого наближення. Для маятникового акселерометра найбільш істотний вплив на похибки приладу надає постійний зсув ЧЕ по координаті α :

На Рис. 3.2 наведені амплітудно-частотні характеристики маятникового ММА, побудовані на підставі рішень рівнянь першого наближення. На Рис. 3.3 - графіки постійного зміщення ЧЕ ММА маятникового типу при вібраційному

впливі одночасно відносно двох осей y та z при різних значеннях коефіцієнта демпфірування. Величина постійного зміщення ЧЕ ММА при прийнятих значеннях параметрів ЧЕ і вібрації може досягати $3.5 \cdot 10^{-7}$ рад, що складає $1.5 \cdot 10^{-4}$ мкм переміщення центру мас пластини в напрямку осі чутливості, і відповідає похибці 2.4mg. Отримане значення погрішності значно перевищує допустимий для ММА навігаційного класу точності (0.1mg). Для зниження даної погрішності необхідно:

1. Вибирати параметри приладу так, щоб власні частоти ЧЕ на пружному підвісі не потрапляли в спектр частот вібраційного впливу.
2. Використовувати інертні гази, для заповнення корпусу приладу, що збільшують параметр згасання системи.
3. Застосовувати компенсаційний метод вимірів.

Аналіз динаміки ЧЕ маятничового ММА при гармонійному впливі проводився на основі першого рівняння системи (3):

$$\alpha'' + 2h * \alpha' + n_{\alpha}^2 * \alpha + k_{\alpha} * \alpha^3 = Q * \sin \theta(t) \quad (3.1)$$

$$\text{де } 2h = \frac{\mu_{\alpha}}{(J_x + m * l^2)}; n_{\alpha}^2 = \frac{C_{\alpha}}{(J_x + m * l^2)}; k_{\alpha} = \frac{k'_{\alpha}}{(J_x + m * l^2)}; Q = \frac{m * l * (V'_{oz} - l * \Omega'_x)}{(J_x + m * l^2)};$$

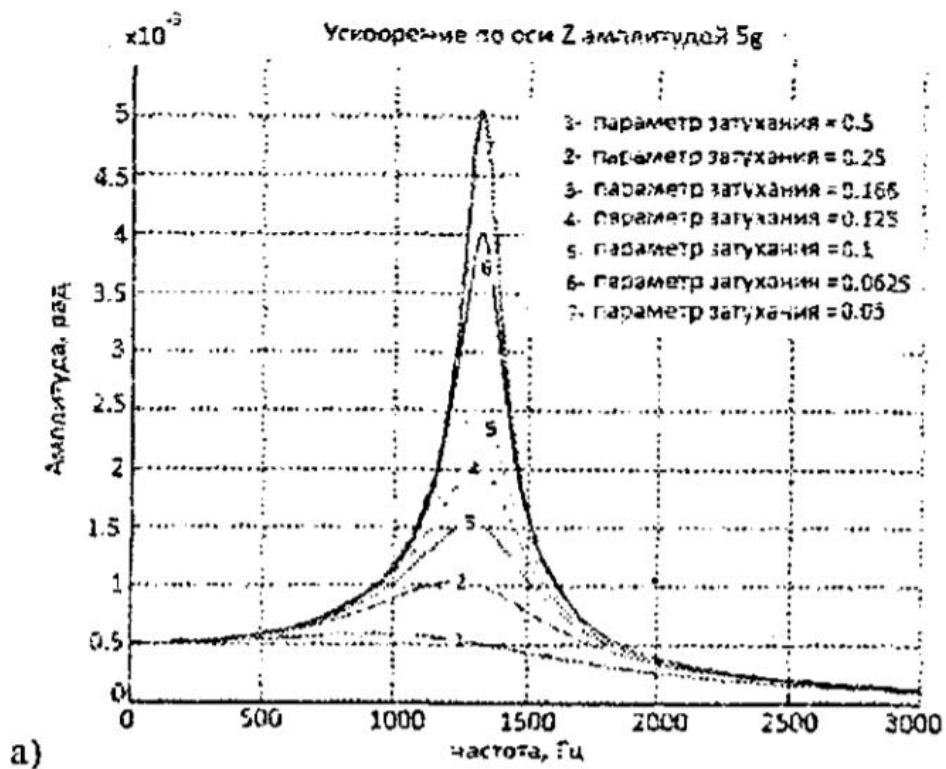


Рис 3.2 Амплітудно-частотна характеристика маятничового ММА при поступальних коливаннях основи вздовж осі Z

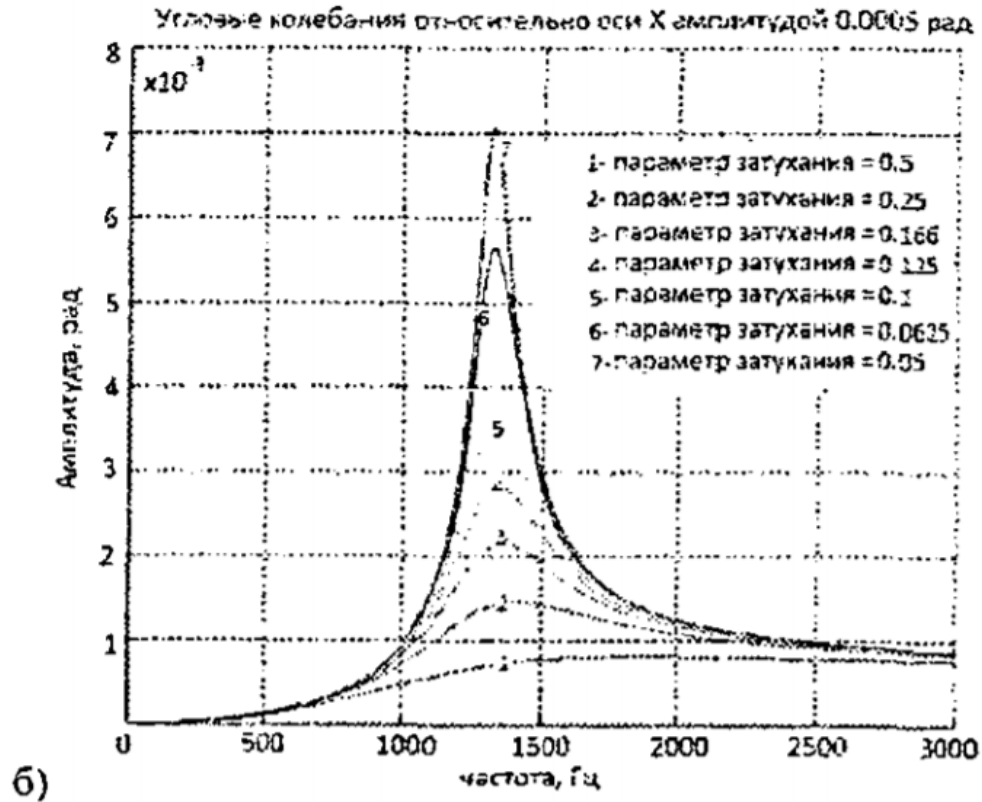


Рис 3.3 Амплітудно-частотна характеристика маятникового ММА при кутових коливаннях основи відносно осі X

У разі гармонійного зовнішнього впливу з постійною частотою ($\theta = v * t$) рішення рівняння (3.1) знайдене у вигляді $\alpha = a * \cos(v * t + \theta)$, $\alpha' = -a * v * \sin(v * t + \theta)$.

Використовуючи метод повільно змінних коефіцієнтів, отримано рівняння стаціонарної резонансної кривої $\alpha^2 \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 + \left(n_\alpha^2 - v^2 + \frac{3}{4} * k_\alpha * \alpha^2 \right)^2 \right] = \frac{Q^2}{(n_\alpha + v)^2}$ і умова стійкості стаціонарного руху ЧЕ ММА.

$$q = \frac{1}{4} h^2 + \left(n_\alpha - v + \frac{3 * k_\alpha * \alpha^2}{4 * (n_\alpha + v)} \right) * \left(n_\alpha - v + \frac{\theta * k_\alpha * \alpha^2}{4 * (n_\alpha + v)} \right) > 0$$

На рис. 3.4 наведено графіки стаціонарної резонансної кривої і границі області стійкості при різних значеннях коефіцієнта нелінійної складової жорсткості пружного підвісу ЧЕ ММА. На рис 3.4, а - стаціонарна резонансна крива системи з малим значенням коефіцієнта нелінійної складової жорсткості пружного підвісу ЧЕ ММА; на рис. 3.4,б - стаціонарна резонансна крива системи з високим

значенням коефіцієнта нелінійної складової жорсткості пружного підвісу ЧЕ ММА. Область нестійкості виділена штрихуванням.

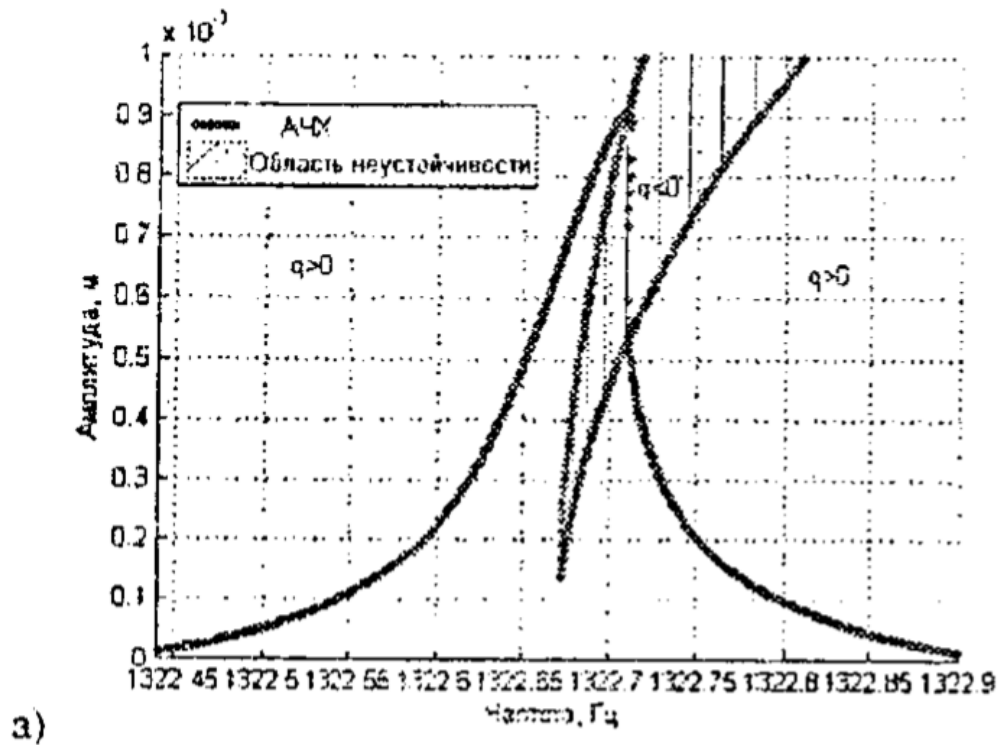


Рис 3.4(а) Стаціонарна резонанса крива и область нестійкості стаціонарного руху ЧЕ маятникового ММА

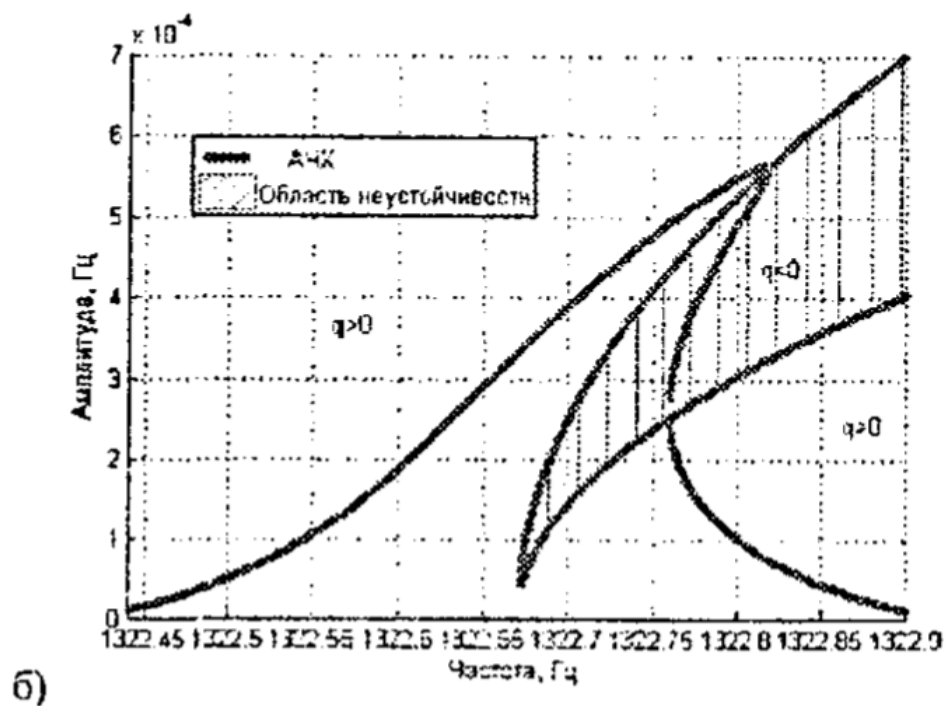


Рис 3.4(б) Стаціонарна резонанса крива и область нестійкості стаціонарного руху ЧЕ маятникового ММА

Аналіз показав, що область нестійкості розширюється зі збільшенням коефіцієнту нелінійної складової жорсткості системи. При проектуванні приладу необхідно вибирати параметри системи таким чином, щоб залежність жорсткості системи від переміщень була близька до лінійної. Для аналізу динаміки ЧЕ маятникового ММА, що проходить зі змінною частотою вібраційного впливу через частоту основного резонансу, використаний асимптотичний метод Крилова-Боголюбова. Рішення рівняння (3.1) знаходилося у вигляді $\alpha = a * \cos(v * t + \theta)$, де α і θ при $v(t) = v_Q \pm \gamma * t$ визначаються з системи рівнянь

$$\frac{da}{dv} = \frac{l}{\gamma} \left(-\frac{l}{2} * h^* * a - \frac{Q^* \cos \theta}{1+v} \right), \frac{d\theta}{dv} = \frac{l}{\gamma} \left(l - v + \frac{3+k_a^* a^2}{4*(l+v)} + \frac{Q^* \sin \theta}{a*(l+v)} \right) \quad (3.2)$$

$$\text{де } Q^* = \frac{Q}{n_\alpha^2}, h^* = \frac{h}{n_\alpha}, k_a^* = \frac{k_\alpha}{n_\alpha^2}.$$

На рис. 3.5 наведено графіки амплітудних кривих при проходженні ЧЕ маятникового ММА через резонанс з різною швидкістю. На рис. 3.5, а - амплітудні криві проходження через резонанс лінійної системи при зростанні частоти ($v(t) = v_Q \pm \gamma * t$). На рис 3.5,б - амплітудні криві проходження через резонанс нелінійної системи при зростанні частоти.

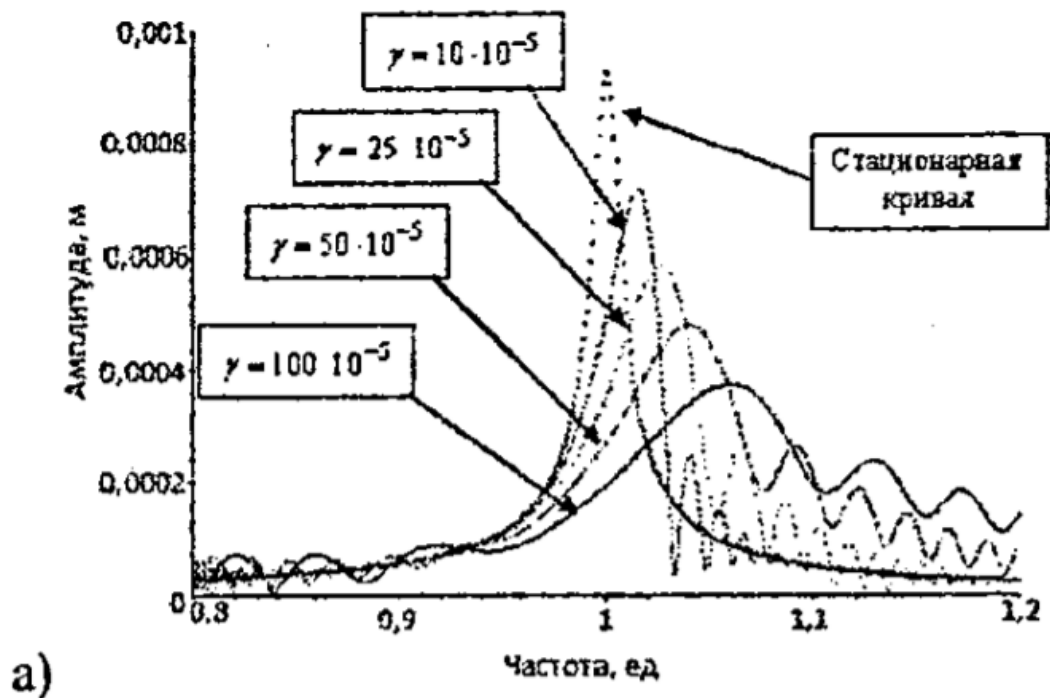


Рис 3.5(а) Амплітудні крива проходження через резонанс

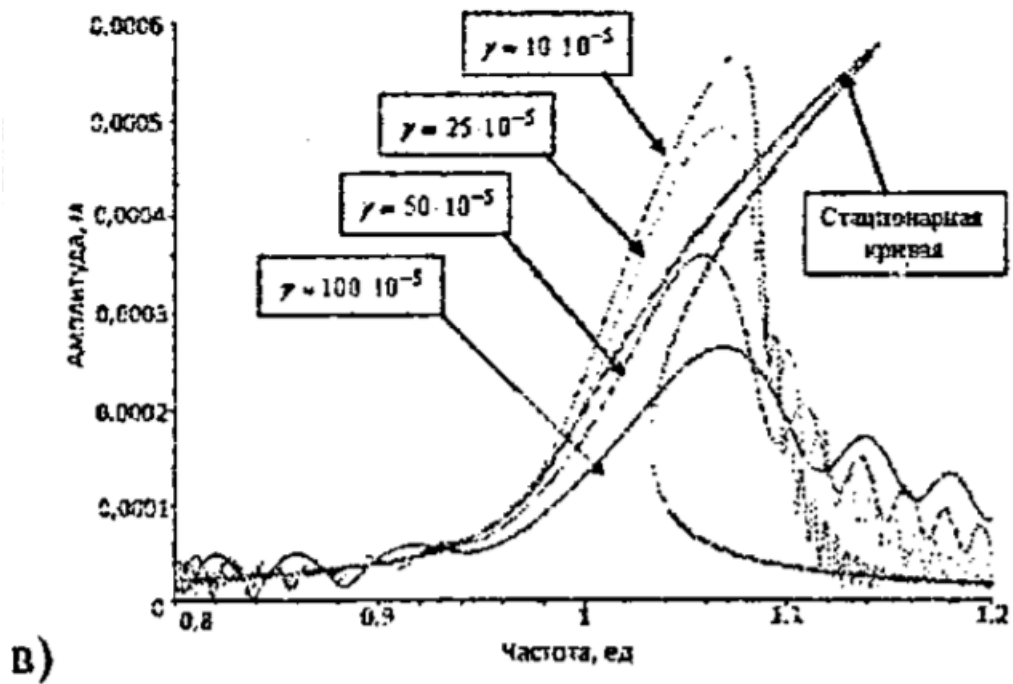


Рис 3.5(б) Амплітудна крива проходження через резонанс

Таким чином, у розділі побудована математична модель динаміки ЧЕ маятничого ММА на рухомій основі. Виконано аналіз впливу полігармонічного вібраційного впливу на ЧЕ маятничого ММА. Отримано рівняння резонансних кривих ЧЕ маятничого ММА. Досліджено залежність резонансних кривих при дії вібро-збурення на ЧЕ маятничого ММА від параметра загасання системи. Виконано, дослідження вібраційного зміщення положення рівноваги ЧЕ маятничого ММА при вібраційних впливах, викликаних коливаннями підстави, дані оцінки вібраційних зсувів і рекомендації по їх усуненню. Досліджено динаміка ЧЕ маятничого ММА при вібраційних впливах, викликаних коливаннями підстави зі змінною частотою, що проходить в процесі зміни через частоту основного резонансу. Визначено області нестійкості при різних значеннях коефіцієнта нелінійності пружного підвісу ЧЕ маятничого ММА.

Динамічна схема моделі показана на (Рис. 3.6 а,б). Система складається з інерційної маси m , яка може зміщуватися вздовж осей x та z . Рух її обмежений пружинами з жорсткостями c_x і c_z відповідно.

Для аналізу руху інерційної маси використаємо узагальнені координати: x – у напрямку осі Ox і y – у напрямку коливань уздовж вимірювальної осі Oz . Основа обертається з кутовою швидкістю $\vec{U}$ уздовж осі Oy .

Положення центра мас інерційної маси задамо вектором $\vec{r} = \{x, 0, z\}$

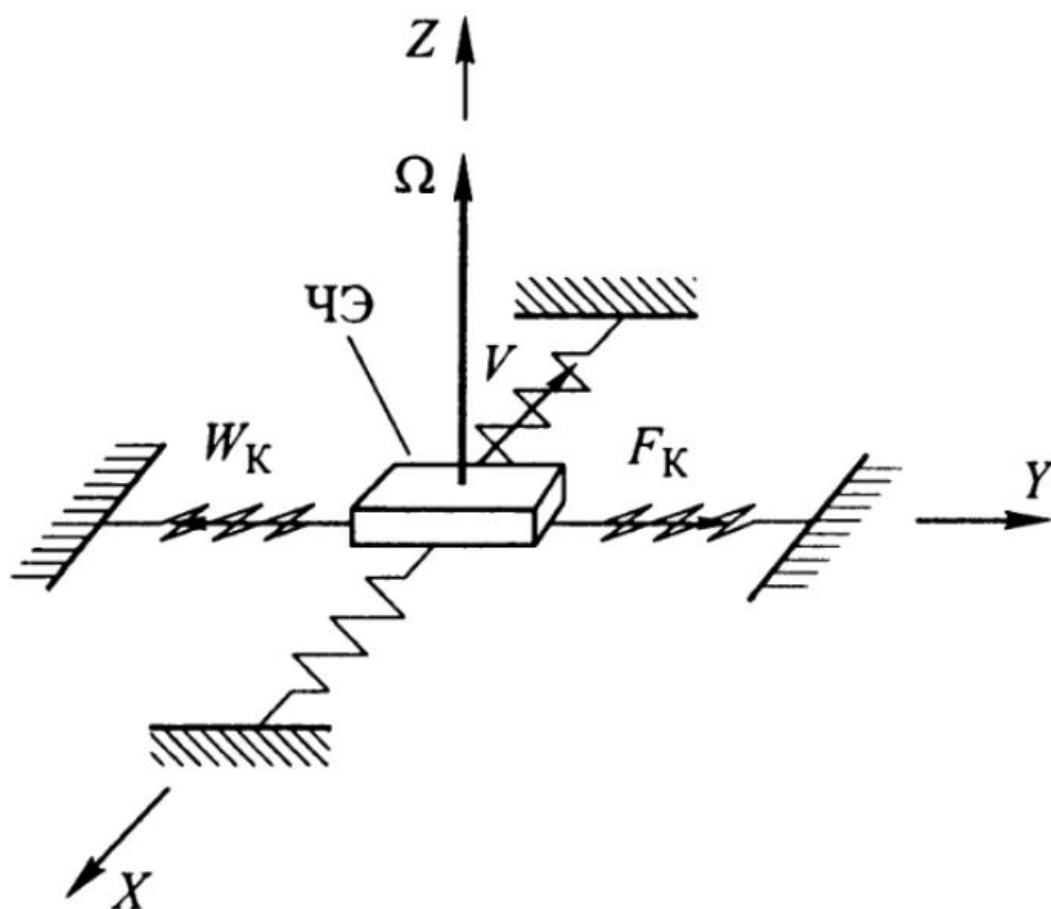


Рис 3.6,(а) Динамічна модель двочастотної коливальної системи

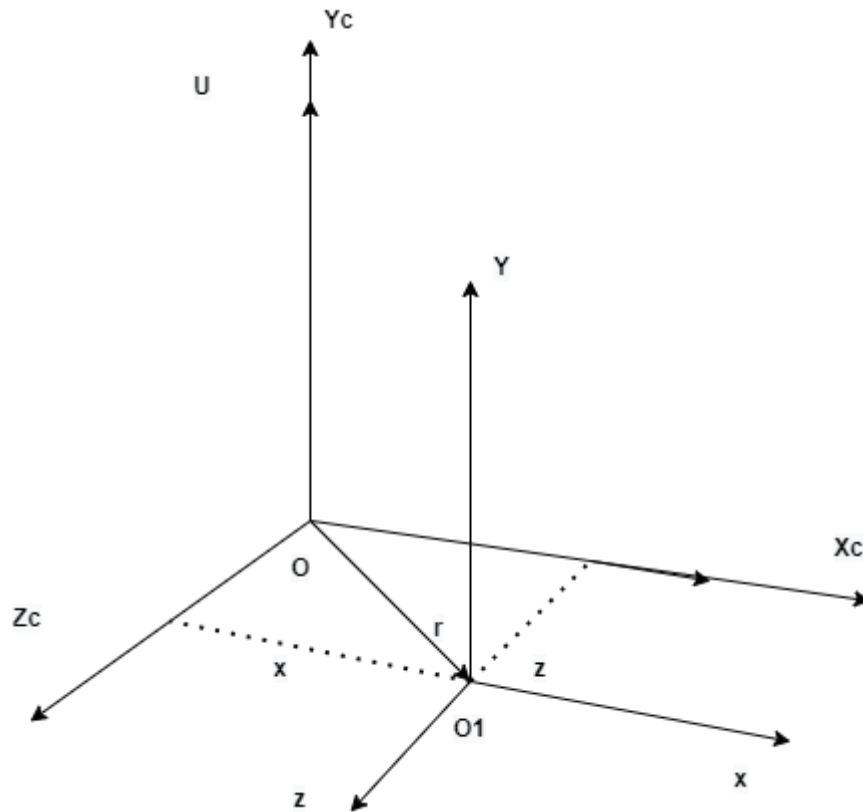


Рис 3.6(б) Динамічна модель двочастотної коливальної системи

Абсолютна лінійна швидкість інерційної маси: $\vec{V} = (\vec{\dot{r}} + \vec{U} * \vec{r})$, або в проекціях на осі O_1, x_c, y_c, z_c :

$$\vec{V} = \{\dot{x} + U_z; 0; \dot{z} - U_x\} \quad (3.3)$$

Для складання рівнянь руху використаємо рівняння Лагранжа II роду у вигляді

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} = Q_i - \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}, (i = 1, 2),$$

де $L = T - P$ – функція Лагранжа; Q_i – узагальнені сили; Φ – дисипативна функція, що визначається формулою

$$\Phi = \frac{1}{2} (f_1 \dot{x}^2 + f_1 \dot{z}^2) \quad (3.4)$$

Потенційна енергія пружного підвісу дорівнює

$$P = \frac{c_1}{2} x^2 + \frac{c_2}{2} z^2 \quad (3.5)$$

Кінетична енергія інерційної маси з урахуванням (3.3) дорівнює

$$T = \frac{m}{2} \vec{V}^2 = \frac{m}{2} [(\dot{x} + U_z)^2 + (\dot{z} - U_x)^2] \quad (3.6)$$

Визначимо необхідні частинні похідні:

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} m(\dot{x} + U_z); \quad \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} &= m(\dot{x} + U_x); \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) &= m(\ddot{x} + U_{\dot{z}} + \dot{U}_z); \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = m(\ddot{z} + U_{\dot{x}} + \dot{U}_x); \\ \frac{\partial L}{\partial x_1} &= -mU(\dot{z} - U_x) - c_1 x_1; \quad \frac{\partial L}{\partial x_2} = mU(\dot{x} - U_z) - c_2 x_2;\end{aligned}$$

Узагальнені сили Q_1 та Q_2 складаються з сил інерції лінійних прискорень W_x, W_z , та штучно створюваної (збуджуючої) сили F_x , що прикладається до інерційної маси в напрямку осі O_x .

Після підстановки знайдених виражень у рівнянні Лагранжа одержимо рівняння руху у вигляді:

$$\begin{aligned}m\ddot{x} + f_1\dot{x} + (c_1 - mU^2)x + 2mU\dot{z} + m\dot{U}z &= -mW_x + F_x; \\ m\ddot{z} + f_2\dot{z} + (c_2 - mU^2)z - 2mU\dot{x} - m\dot{U}x &= -mW_z\end{aligned}\quad (3.7)$$

Отримані рівняння за формою запису збігаються з рівнянням руху коливальної системи з одним ступенем вільності, але зміст правих частин розглянутих рівнянь відрізняється від змісту відповідних членів рівняння руху коливальної системи з одним ступенем вільності. Узагальнені сили рівнянь (3.7) є функцією і для другої узагальненої координати і її похідних. Таким чином маємо зв'язну систему двох рівнянь із двома узагальненими координатами.

Для розкриття фізичного змісту членів, що входять у рівняння руху, будемо формально розглядати кожне рівняння системи як рівняння руху деякої парціальної коливальної системи з одним ступенем вільності з накладеними зв'язками. Тобто коливальну систему із двома ступенями вільності будемо подавати у вигляді двох пов'язаних між собою коливальних систем з одним ступенем вільності. «Зв'язок» між парціальними системами виражається в тому, що коливання однієї парціальної системи впливають на коливання іншої парціальної системи, і навпаки [6,7].

3.1. Моделювання датчика горизонту

Розглядалась динамічна система, побудована на основі передатної функції ЧЕ датчика $W(p) = \frac{1}{T_3^2 p^2 + 2\xi T_3 p + 1}$, і математичної моделі, описуючої сигнали і шуми ЧЕ. Реалізація математичної моделі здійснювалась на основі стандартної бібліотеки MATLAB. Досліджувалось оптимальне значення коефіцієнту затухання по одній осі.

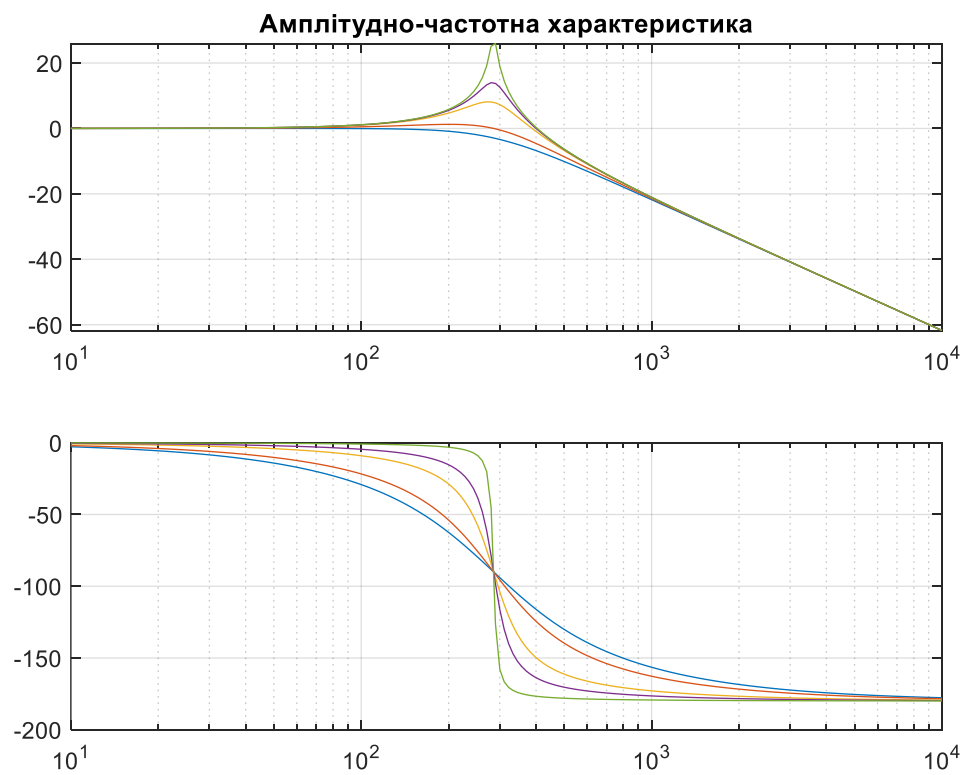


Рис 3.7 Амплітудно-частотна характеристика

З амплітудно-частотної характеристики видно, що оптимальний коефіцієнт затухання $\xi = 0.7$.

Перехідна характеристика з початковим вхідним сигналом 1 м/с^2

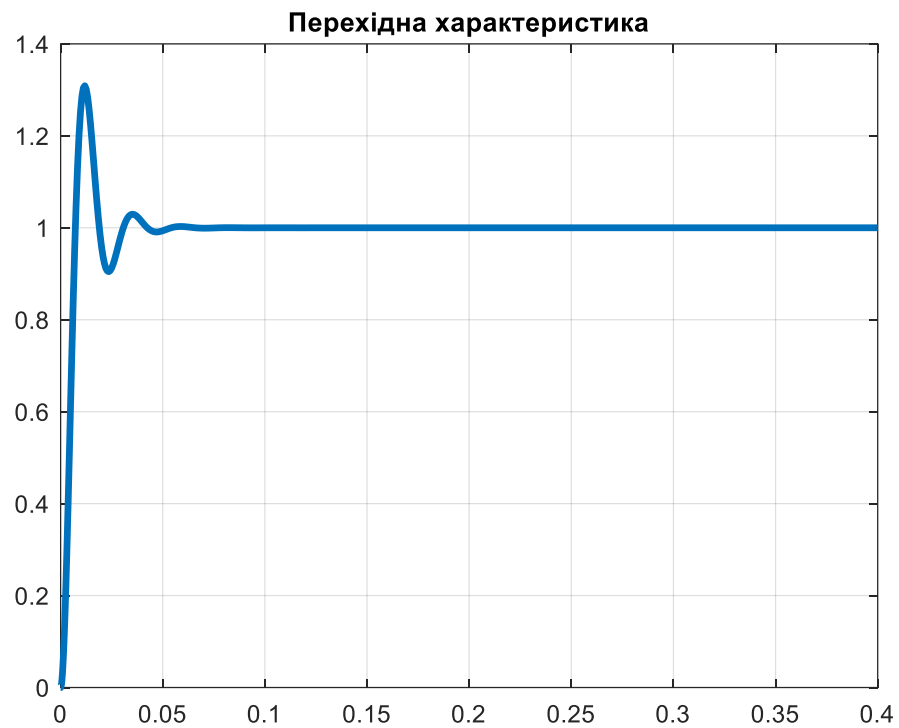


Рис 3.8 Перехідна характеристика чутливого елементу

Вихідний сигнал акселерометра з амплітудою $am * \sin(w * t)$, де $am = 10^{-3}$
 $am = 10^{-3}$ при частоті $w = 10$

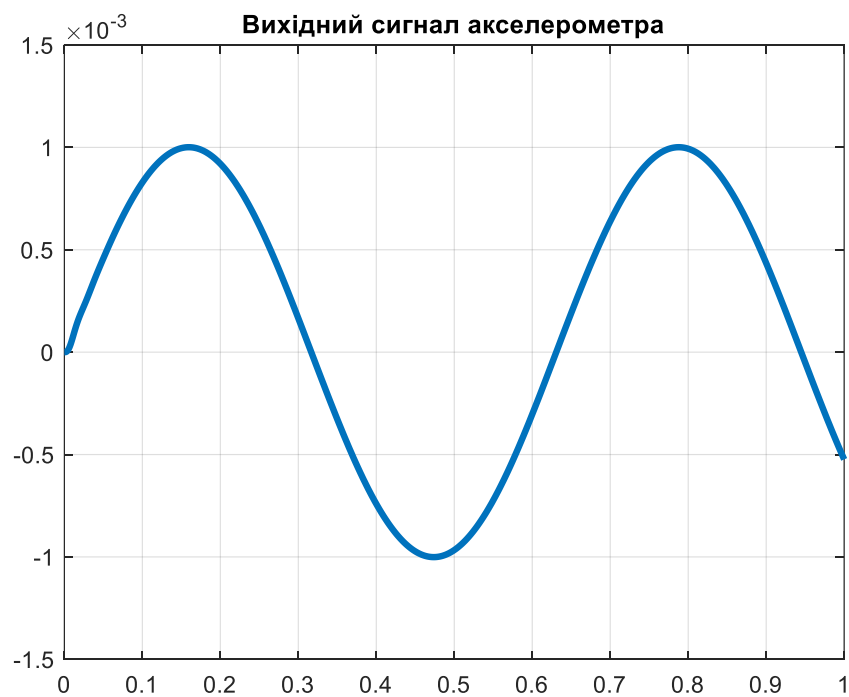


Рис 3.9 Вихідний сигнал акселерометра

Вихідний сигнал акселерометра з амплітудою $am * \sin(w * t)$, де $am = 10^{-3}$
 $am = 10^{-3}$ при частоті $w = 100$

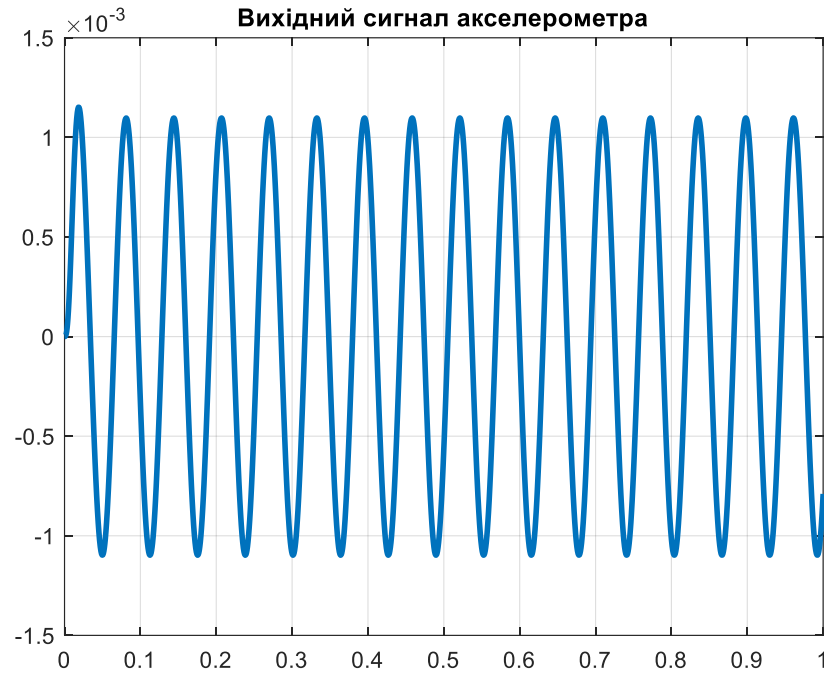


Рис 3.10 Вихідний сигнал акселерометра

Вихідний сигнал акселерометра з амплітудою $am * \sin(w * t)$, де $am = 10^{-3}$
 $am = 10^{-3}$ при частоті $w = 1000$

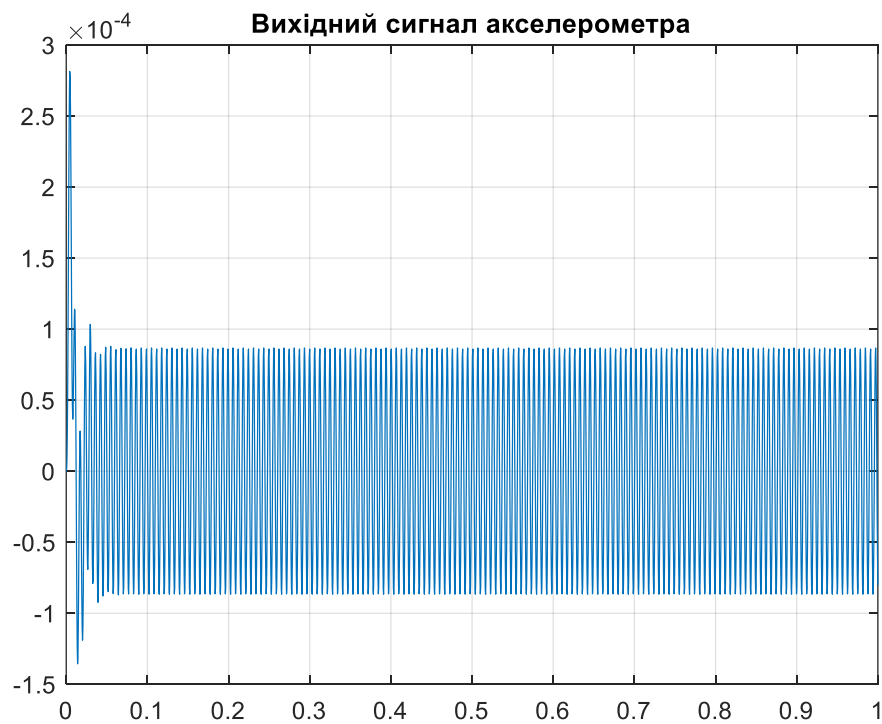


Рис 3.11 Вихідний сигнал акселерометра

Перехідна характеристика системи показує коливання при початку роботи, моделювання проводились за різний проміжок часу та зі змінною частотою, що є допустимим і говорить про коректно вибраний коефіцієнт затухання і нормальну роботу самого датчика.

3.2 Система автоматичного горизонтування на основі датчика горизонту

Робота датчика горизонту в системі горизонтування може бути представлена на основі структурної схеми, що наведено на рис. 3.12.

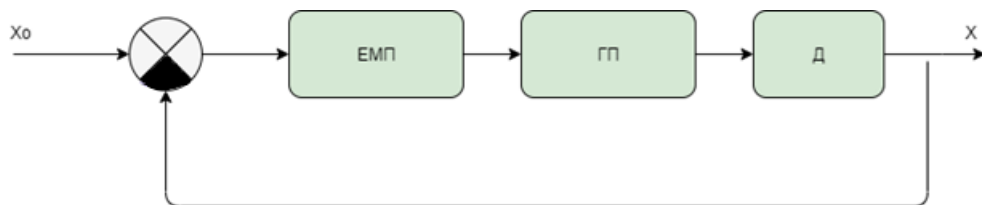


Рис 3.12 Структурна схема системи горизонтування

де – ЕМП – електромеханічний перетворювач, ГП – гідропривод, Д – датчик кута нахилу(акселерометр)

Електромеханічний перетворювач сприймає електричний сигнал і перетворює його в лінійне або кутове переміщення якоря, пов'язаного з золотником, заслінкою або струменевою трубкою.

Статична характеристика електромеханічного перетворювача визначає залежність лінійного $h_{\text{я}}$ або кутового $\varphi_{\text{я}}$ переміщення якоря від струму управління. При використанні перетворювача спільно з гідро- або пневмопідсилювача якір буде навантажений зусиллями, що діють з боку потоку робочого середовища на золотник, заслінку або струменевий трубку. Статичну характеристику перетворювача з урахуванням цих зусиль можна знайти за допомогою зовнішньої силової чи зовнішньої моментної характеристик.

Гідравлічний привід складається з підсилювача, електромеханічного перетворювача, гідравлічного підсилювача, золотника, силового механізму,

кінематичної передачі, охоплених негативним зворотним зв'язком за допомогою потенціометра зворотного зв'язку. Вихід приводу пов'язаний з об'єктом управління. Двигун гідравлічного приводу є двохкаскадним. Перший каскад становить електромеханічний перетворювач (ЕП) і гідропідсилювач (ГП), а другий золотник (З) і силовий механізм (СМ). Кут α повороту ЕП перетворюється в переміщення h золотника. Електричний зворотній зв'язок реалізується за допомогою потенціометра зворотного зв'язку (ПЗЗ) на валу органу управління або на штоку силового механізму. Електромеханічний перетворювач управляється електронним підсилювачем (УС).

У приводах наведення і стабілізації установок на великі потужності (понад 0,5 кВт) застосовуються приводи з об'ємним регулюванням швидкості.

У більшості гідроприводів з дросельним регулюванням для управління золотником застосовується електрогідравлічний підсилювач (ЕГУ), що має в своєму складі електромеханічний перетворювач малої потужності.

Гідропідсилювачами називають пристрої, що збільшують потужність керуючих сигналів завдяки використанню енергії, що підводиться з потоком рідини від зовнішнього джерела. Відповідно до цього визначення до гідропідсилювача часто відносять також приводи з дросельним або об'ємним регулюванням, мають механічне управління. Гідропідсилювач електрогідравлічного приводу, сприймаючи і підсилюючи сигнали електромеханічного перетворювача, забезпечують керуванням виконавчим гідродвигуном.

Два або кілька гідропідсилювачів можуть бути з'єднані послідовно для збільшення потужності переданих сигналів. В результаті такого з'єднання виходить багатоступінчастий гідропідсилювач, в якому зворотні зв'язки від ступені до ступені здійснюються за допомогою механічних або електричних пристроїв [18-19].

3.2.1 Динамічні характеристики ЕМП

Електромеханічний перетворювач представимо аперіодиною ланкою з постійною часу $T_1 = 0.05$ с. Коефіцієнт підсилення $k_1 = 10$ В/см.

Передатна функція елементу системи:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} \quad (3.8)$$

Перехідна характеристика:

$$h_1(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W_1 p}{p} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{k_1}{p(T_1 p + 1)} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{k_1}{T_1} * \frac{k_1}{p(p + \frac{1}{T_1})} \right\} = k_1 (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (3.10)$$

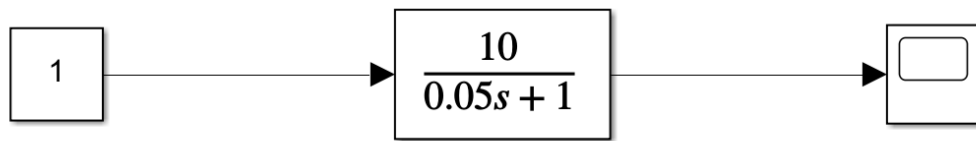


Рис 3.13 Схема побудови у Simulink

Графік перехідної характеристики представлений на рисунку

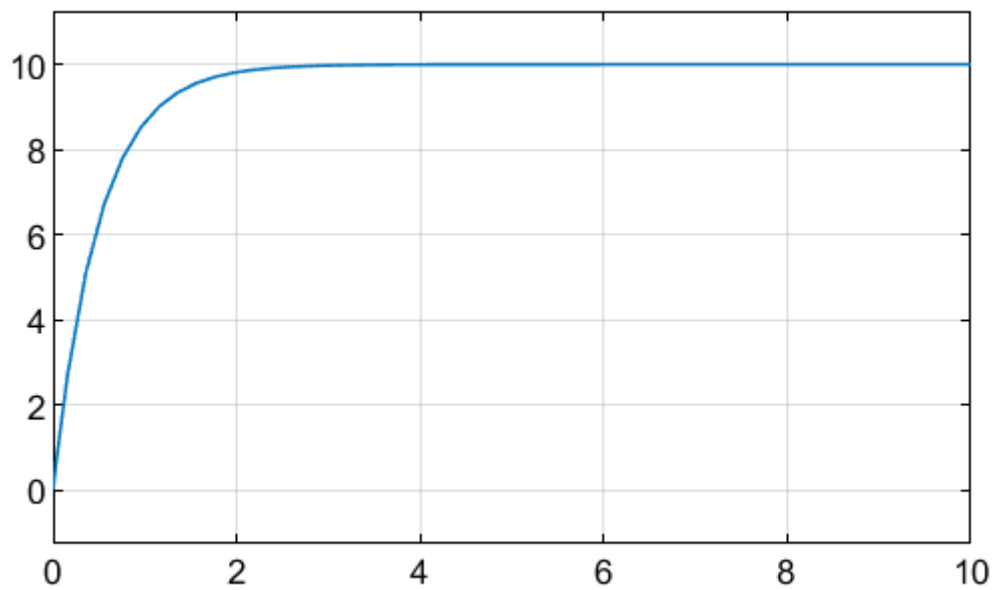


Рис 3.14 Графік перехідної характеристики ЕМП

Вагова характеристика елемента:

$$w_1(t) = L^{-1}\{W_1 p\} = L^{-1}\left\{\frac{k_1}{T_1 p + 1}\right\} = \frac{k_1}{T_1} * e^{\frac{-t}{T_1}} \quad (3.11)$$

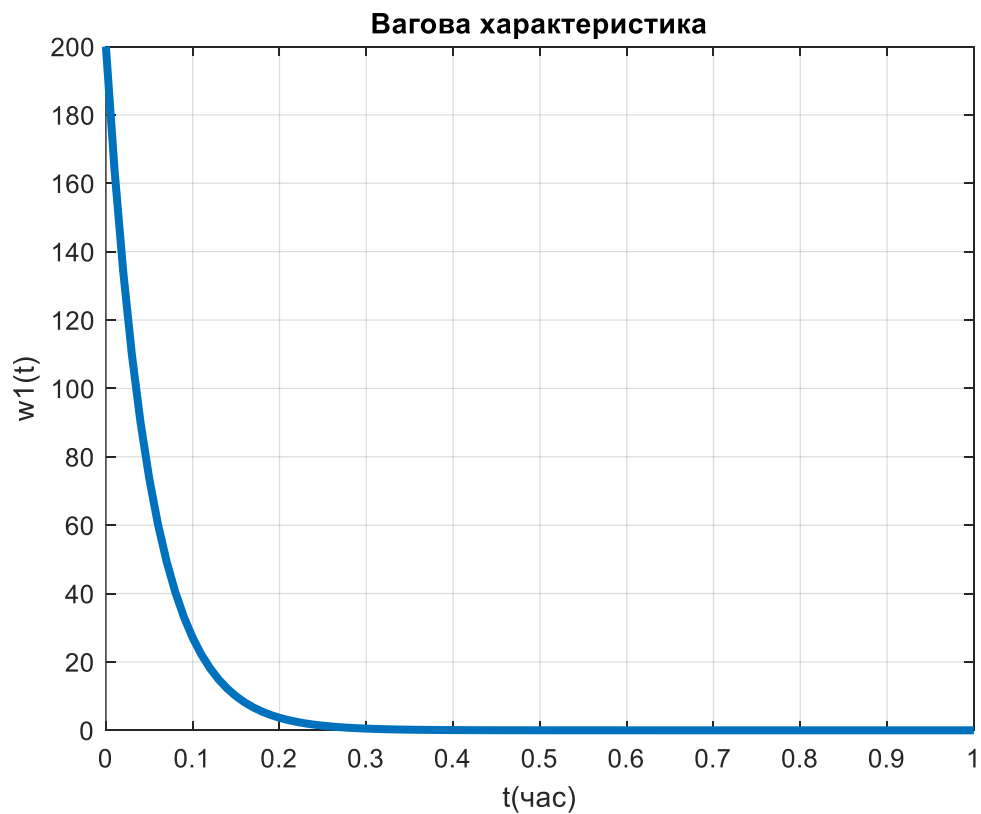


Рис 3.15 Графік вагової характеристики ЕМП

Частотні характеристики:

$$W_1(j\omega) = \frac{k_1}{T_1 j\omega + 1} - \text{амплітудно- фазова частотна характеристика} \quad (3.12)$$

$$N_1(\omega) = \frac{k_1}{\sqrt{1+T_1^2 \omega^2}} - \text{амплітудно частотна характеристика} \quad (3.13)$$

$$\varphi_1(\omega) = \arctg \omega T_1 - \text{фазова частотна характеристика} \quad (3.14)$$

3.2.2 Динамічна характеристика ГП

Гідропривід можна у простому варіанті представити періодичною ланкою 1-го порядку з постійною часу $T_1 = 0.2$ с, коефіцієнт підсилення $k_2 = 1$.

Передатна функція:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1} \quad (3.15)$$

Перехідна характеристика $h_2(t)$:

$$h_2(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W_2 p}{p} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{k_2}{p(T_2 p + 1)} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{k_2}{2} * \frac{k_2}{p(p + \frac{1}{T_2})} \right\} = k_2 \left(1 - e^{-\frac{1}{T_2} t} \right) \quad (3.16)$$

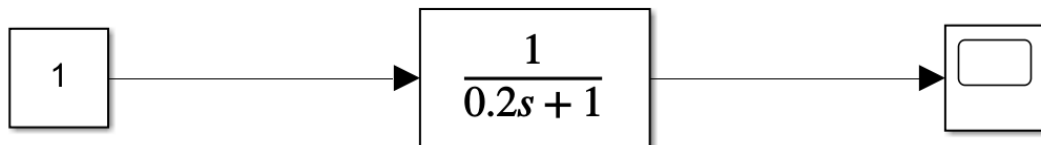


Рис 3.16 Схема побудови у Simulink

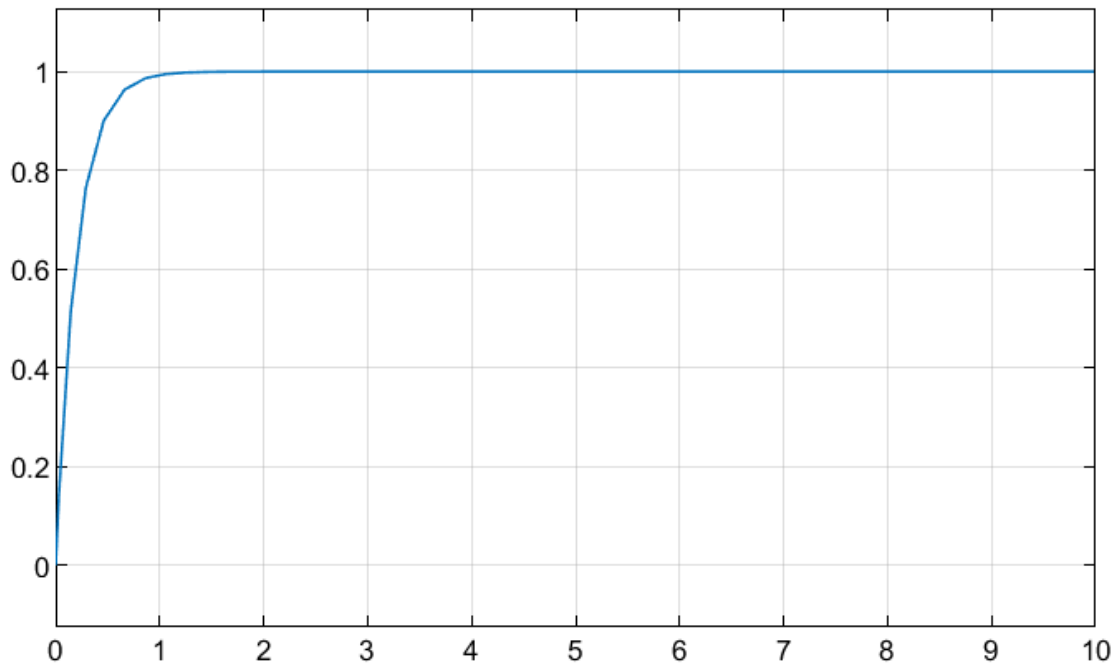


Рис 3.17 Графік перехідної характеристики ГП

Вагова характеристика $w_2(t)$:

$$w_2(t) = L^{-1}\{W_2 p\} = L^{-1}\left\{\frac{k_2}{T_2 p + 1}\right\} = \frac{k_2}{T_2} * e^{\frac{t}{T_2}} \quad (3.17)$$

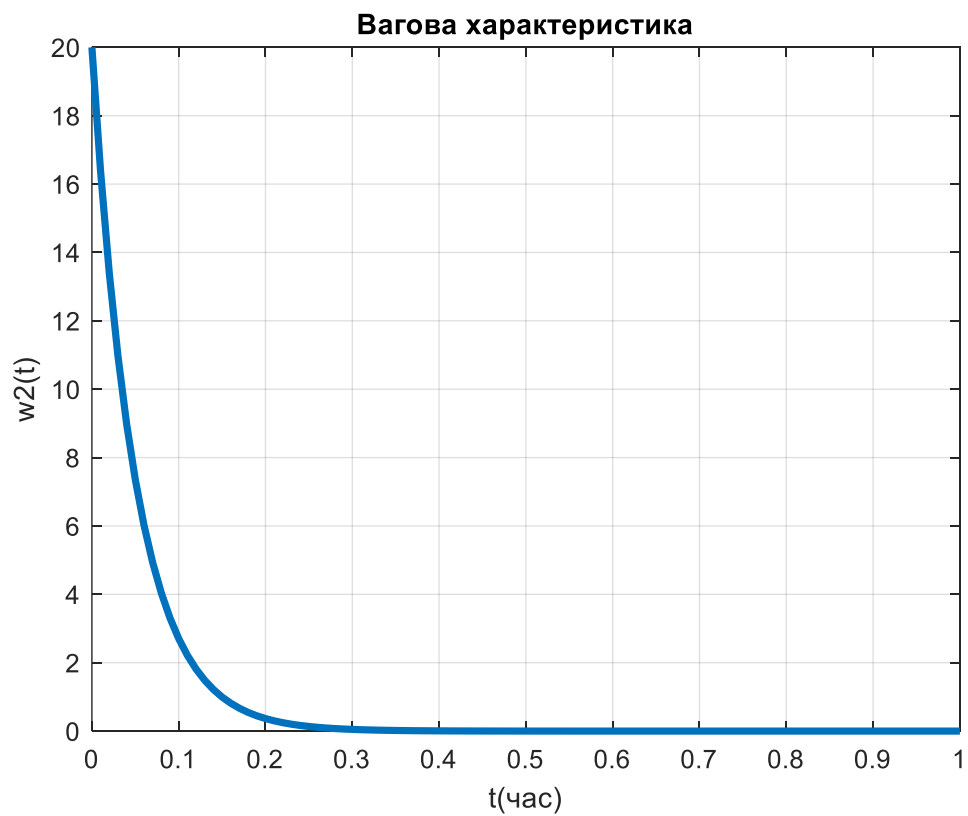


Рис 3.18 Графік вагової характеристики ГП

Частотні характеристики:

$$N_2(\omega) = \frac{k_2}{\sqrt{1+T_2^2\omega^2}} \quad (3.18)$$

$$\varphi_2(\omega) = \arctg \omega T_2 \quad (3.19)$$

3.2.3 Аналіз динаміки системи автоматичного горизнотування

Знайдемо передатну функцію розімкненої системи

$$\begin{aligned} W_{\text{роз}} &= W_1(p) * W_2(p) * W_3(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} * \frac{k_2}{T_2 p + 1} * \frac{k_3}{T_3^2 * p^2 + 2\xi * T_3 p + 1} = \\ &= \frac{k_{\text{роз}}}{(T_2 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3^2 * p^2 + 2\xi * T_3 p + 1)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Передатна функція замкненої системи за вхідним діянням:

$$\begin{aligned} \Phi(p) &= \frac{W_{\text{роз}}}{1 + W_{\text{роз}}} = \frac{\frac{k_{\text{роз}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3^2 * p^2 + 2\xi * T_3 p + 1)}}{1 + \frac{k_{\text{роз}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3^2 * p^2 + 2\xi * T_3 p + 1)}} = \\ &= \frac{k_{\text{роз}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3^2 * p^2 + 2\xi * T_3 p + 1) + k_{\text{роз}}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Перехідна характеристика замкненої системи:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{\Phi(p)}{p} \right\} = \frac{\frac{k_{\text{роз}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3^2 * p^2 + 2\xi * T_3 p + 1) + k_{\text{роз}}}}{p(T_2 p + 1)} \quad (3.22)$$

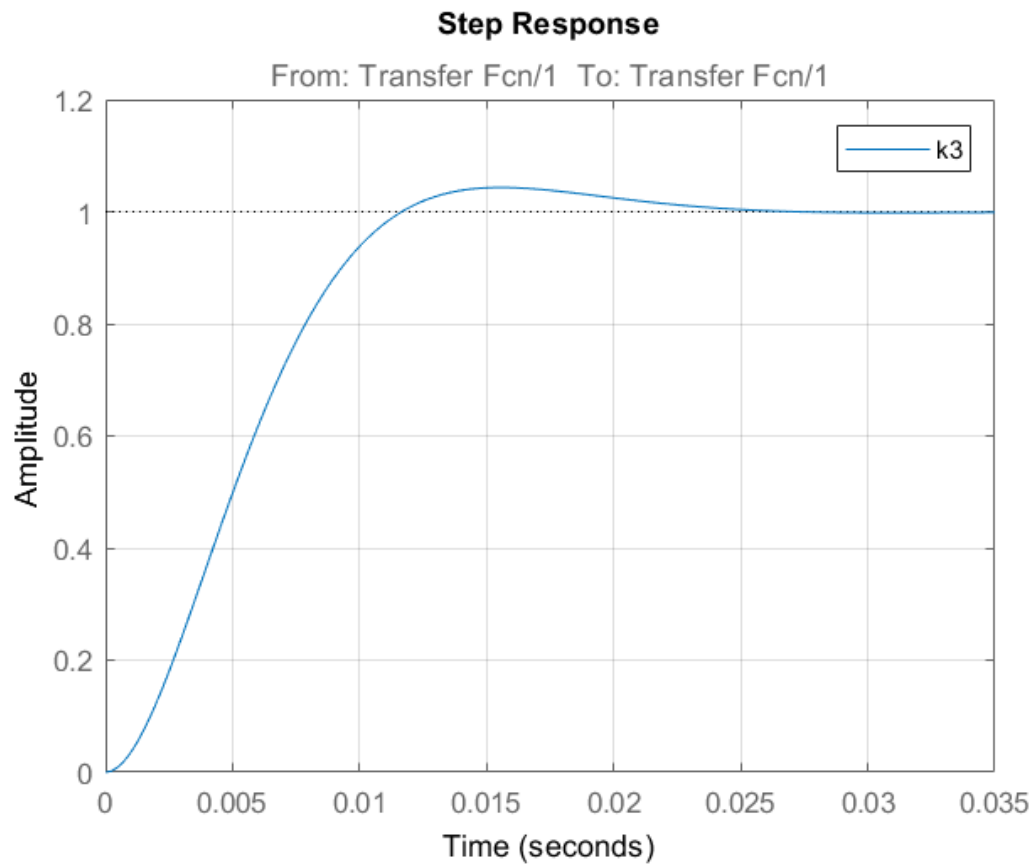


Рис 3.21 Перехідна характеристика замкненої системи

Побудуємо графіки логарифмічних частотних характеристик розімкненої системи для аналізу стійкості. Логарифмічна АЧХ розімкненої системи:

$$L_{\text{роз}}(\omega) = 20 \lg N_{\text{роз}}(\omega) = 20 \lg \frac{k_{\text{роз}}}{\sqrt{1+T_1^2 \omega^2} \sqrt{1+T_2^2 \omega^2} \sqrt{(1-T_3^2 \omega^2)^2 + 4\xi^2 T_3^2 \omega^2}} \quad (3.23)$$

Фазова частотна характеристика розімкненої системи:

$$\varphi_{\text{роз}}(\omega) = -\arctg \omega T_1 - \arctg \omega T_2 - \arctg \frac{2\xi T_3 \omega}{1-T_3^2 \omega^2} \quad (3.24)$$

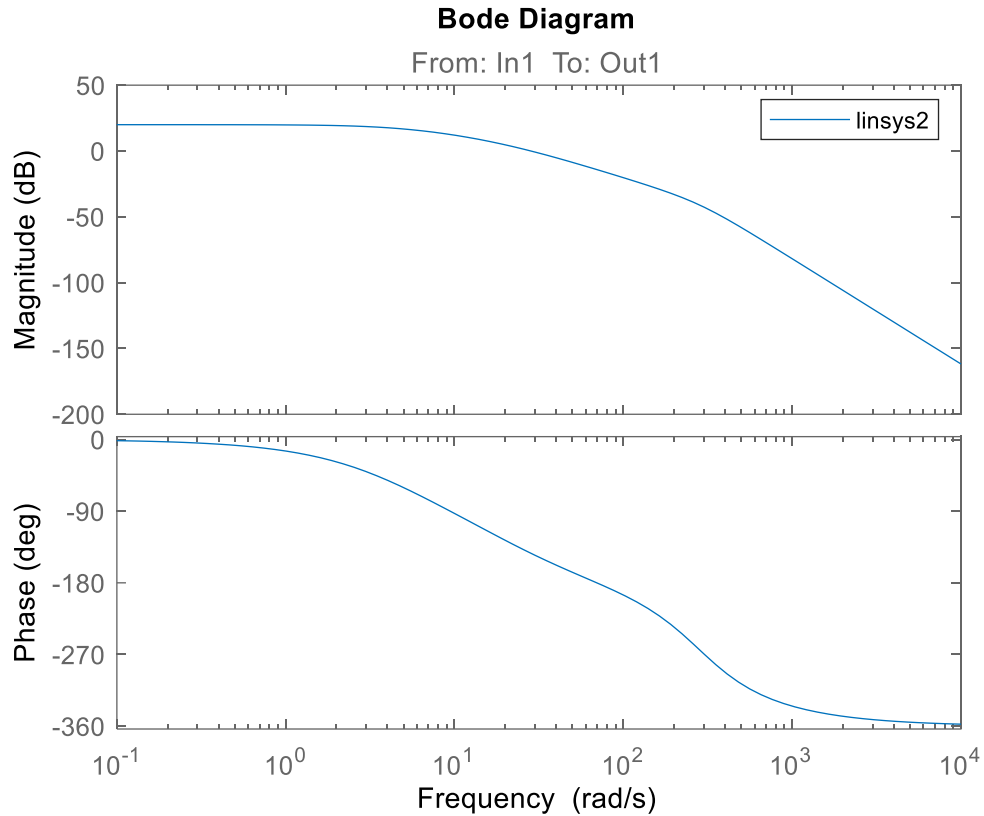


Рис 3.23 Графіки ЛАЧХ, ЛФЧХ

На основі побудованих графіків визначимо запаси стійкості при $k_{\text{роз}} = 10$

а) по амплітуді 14 дБ;

б) по фазі 35° .

Розглянемо характеристичний поліном замкненої системи, який є знаменником $\Phi(p)$:

$$\begin{aligned}
 D(p) &= (T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3^2 p^2 + 2\xi * T_3 p + 1) + k_{\text{роз}} = \\
 &= T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1(T_3^2 p^2 + 2\xi * T_3 p + 1) + k_{\text{роз}} = \\
 &= T_3^2 T_1 T_2 p^4 + [T_3^2(T_1 + T_2) + T_1 T_2 * 2\xi * T_3]p^3 + \\
 &+ (T_1 T_2 + T_3^2 + (T_1 + T_2)2\xi * T_3)p^2 + (T_1 + T_2 + 2\xi * T_3)p + 1 + k_{\text{роз}} \quad (3.25)
 \end{aligned}$$

Відповідно до критерію стійкості Гурвіца запишемо визначник:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_4 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} = a_0 * \Delta_3, \text{ де}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_3^2 a_0$$

Для забезпечення стійкості замкненої системи необхідно, щоб всі визначники Гурвіца були додатніми, оскільки $a_4 = T_1 T_2 T_3^2 = 1.225 * 10^{-6} > 0$

$$\begin{aligned}\Delta_1 = a_3 &= T_3^2(T_1 + T_2) + T_1 * T_2 * 2\xi * T_3 = \\ &= 24.87 * 10^{-8}(0.2 + 0.5) + 0.2 * 0.5 * 2 * 0.7 * 0.0035 > 0\end{aligned}$$

умова виконується

$$\begin{aligned}\Delta_2 &= \begin{vmatrix} a_3 & a_4 \\ a_4 & a_2 \end{vmatrix} = a_3 a_2 - a_4 a_1 = \\ &= 4.986 * 10^{-4} * 0.1034 - 1.225 * 10^{-6} * 1.7049 = 4.9 * 10^{-4}\end{aligned}$$

умова виконується

Якщо виконується умова $\Delta_3 > 0$, то також буде виконуватись і умова $\Delta_4 > 0$.

Розглянемо умову $\Delta_3 > 0$ та визначимо границі коефіцієнту передачі розімкненої системи при яких система буде стійкою:

$$a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_3^2 a_0 > 0$$

$$a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 > a_3^2 a_0$$

$$a_0 > \frac{a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4}{a_3^2}$$

$$k_{\text{роз}} < \frac{a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4}{a_3^2} - 1$$

$$k_{\text{роз}} < \frac{1.7049 * 0.1034 * 4.986 * 10^{-4} - 1.7049^2 * 1.225 * 10^{-6}}{24.87 * 10^{-8}} - 1$$

Отже, для збудження стійкості системи $k_{\text{роз}}$ має лежати в межах від 0 до 338.11

Висновки

В дипломній роботі представлено результати аналізу та розробки датчика горизонту на базі мікромеханічного акселерометру для автоматизованої системи горизонтування.

В якості основного датчика горизонту обрано двовісний термічний мікромеханічний акселерометр. Проведено розробку математичної моделі датчика горизонту, проведено аналіз динамічних характеристик датчика в часовій та частотній області. Результати показали задовільні результати, що відповідають заданим параметрам в технічному завданні.

Проведено моделювання роботи датчика горизонту в складі автоматизованої системи горизонтування. Проведено аналіз частотних характеристик розімкненої системи, зроблено висновок про стійкість замкненої системи на основі частотних та алгебраїчних критеріїв стійкості. Визначено запаси стійкості за амплітудою та за фазою. Визначено діапазон загального коефіцієнту передачі розімкненої системи, в якому забезпечується стійкість системи.

Список літератури

- [1] Лазарєв Ю.Ф. Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації [Текст]: підруч./ Ю.Ф.Лазарєв, П.М.Бондар. – К.: НТУУ "КРІ", 2011. – 644 с. – бібліогр.: с.526-628. ISBN 978-966-622-434-0
- [2] Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие. - Тульский Государственный Университет. Тула, 2002.
- [3] Б. Б. Самоткин, В. В. Мелешко, Ю. В. Степановский. Навигационные приборы и системы – Киев: Вища школа, 1986. – 343 с.
- [4] Никитин Е.А. Балашов А.А. Проектирование дифференцирующих и интегрирующих гироскопов и акселерометров – Москва 1969 г.
- [5] Первицкий Ю.Д. Расчёт и конструирование точных механизмов. – Ленинград: «Машиностроение» Ленинградское отделение, 1976 г.
- [6] П. М. Бондар, Ю. В. Степанковський, Фізичні основи орієнтації і навігації Ч.2., Елементи теорії гіроскопічних явищ, Ч.3 Коливання й хвилі, 2009
- [7] Метод підвищення точності вимірювання прискорень гіростабілізованих платформ
<https://osatrq.edu.ua/wp-content/uploads/2016/11/Metod-pidvishhennya-tochnosti-vimiryuvannya-priskoren-girostabilizovanih-platform.pdf>
- [8] П. М. Бондар, Ю. В. Степанковський, Фізичні основи орієнтації і навігації Лабораторний практикум для студентів спеціальності «Прилади і системи орієнтації» – Київ 2011
- [9] Гібридні мікроелектромеханічні гіроскопи і акселерометри / Коновалов С.Ф., Пономарьов Ю.А., Майоров Д.В., Подчезерцев В. П., Сидоров А.Г. //Наука та освіта
- [10] WEB-портал для разработчиков электроники
<https://www.terraelectronica.ru/news/4320>
- [11] WEB-портал для разработчиков электроники
<https://www.terraelectronica.ru/product/2195706>
- [12] Технічна специфікація MXP7205VF:
<http://www.memsic.com/uploadfiles/2020/08/20200828130053176.pdf>

- [13] MXP7205VF-B User Guide Datasheet by Memsic Inc.
<https://www.digikey.pl/htmldatasheets/production/1226429/0/0/1/mxp7205vf-b-user-guide.html>
- [14] Micromachined Fluid Inertial Sensors
<https://www.mdpi.com/1424-8220/17/2/367/htm>
- [15] Оценка погрешностей определения параметров движения по информации инерциального измерительного блока:
<https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-pogreshnostey-opredeleniya-parametrov-dvizheniya-po-informatsii-inertsialnogo-izmeritelnogo-bloka/viewer>
- [16] А.И. Рыбка, А.В. Алексахин, Проблемные вопросы систем горизонтирования современных РЛС
- [17] Р.А. Святун, В.А. Резников, Автоматическая система горизонтирования основания для размещения высоко точного оборудывания
- [18] А. А. Заславский, Ф.Ф. Заславский, В.С. Фимушкин, Релейный пневмо-гидропривод с вибрационной линеаризацией систем управления ракет и установок вооружения
- [19] Д.Н. Попов, Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем — 2-е изд., перераб. и доп. — М.; Машиностроение, 1987.