

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Удосконалення конструкції лабораторного макету для дослідження
(тема)

характеристик 2х-координатного акселерометра

Виконав: студент 2 курсу, гр. КІТПВМ-19-1
Тищенко Сергій Миколайович
(прізвище, ініціали)

Спеціальність
151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ромашов Ю.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Тищенко Сергію Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення конструкції лабораторного макету для дослідження характеристик 2х-координатного акселерометра

затверджена наказом по університету від 02.11.2020 р. № 1511 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Система автоматизованого проектування AutoCAD;

3.2 Система комп'ютерного моделювання MatLab.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз предметної області;

4.3 Обґрунтування проекту удосконалення лабораторного макету;

4.4 Розробка проекту удосконалення лабораторного макету;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів). Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 15 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	09.11.2020	
2	Обґрунтування проекту удосконалення лабораторного макету	16.11.2020	
3	Розробка проекту удосконалення лабораторного макету	23.11.2020	
4	Інформаційно-вимірювальна система спрощених випробувань	25.11.2020	
5	Інформаційно-вимірювальна система для детальних досліджень	28.11.2020	
6	Оформлення пояснювальної записки	07.12.2020	
7	Подання роботи до ЕК	16.12.2020	

Дата видачі завдання 02.11.2020

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

Тищенко. С.М.

(прізвище, ініціали)

проф. Ромашов Ю.В.

(посада, прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Атестаційна робота: 82 с., 45 рис., 1 дод., 27 джерел.

АКСЕЛЕРОМЕТР, AUTOCAD, MATLAB, МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ.

Об'єкт дослідження – 2х-координатний акселерометр.

Мета роботи – удосконалення конструкції існуючого лабораторного макету для виправлення недоліків та розширення функціональних можливостей.

Методи дослідження – комп'ютерне моделювання процесів за допомогою середовища Simulink системи MatLab.

Розроблено проект удосконаленої конструкції існуючого лабораторного макету для дослідження характеристик 2х-координатного акселерометра з використанням комп'ютерної системи автоматизованого проектування AutoCAD та середовища Simulink системи комп'ютерного моделювання MatLab шляхом комп'ютерного моделювання окремих складових лабораторного макету, передбачених проектом його удосконалення.

ABSTRACT

Attestation work: 82 p., 45 pics, 1 pp., 27 sources.

ACCELEROMETER, AUTOCAD, MATLAB, PROCESS SIMULATION.

The object of study – 2-coordinate accelerometer.

The purpose of the work is to improve the design of the existing laboratory model to correct deficiencies and expand functionality.

Research methods – computer modeling of processes using the Simulink environment of the MatLab system.

The project of the improved design of the existing laboratory model for research of characteristics of the 2-coordinate accelerometer with use of computer system of automated designing AutoCAD and environment Simulink of system of computer modeling MatLab by computer modeling of separate components of the laboratory model provided by the project of its improvement is developed.

ЗМІСТ

	с.
Перелік скорочень	7
Вступ.....	8
1 Аналіз предметної області	10
1.1 Загальні відомості про акселерометри та їхні характеристики.....	10
1.2 Підходи щодо організації та планування випробувань датчиків.....	20
1.3 Існуючий лабораторний макет та шляхи його удосконалення	28
1.4 Використання САПР для удосконалення лабораторного макету	32
1.5 Висновки до 1 розділу	33
2 Обґрунтування проекту удосконалення лабораторного макету	34
2.1 Задачі проекту удосконалення лабораторного макету.....	34
2.2 Можливості утворення тестових прискорень у двох напрямках.....	36
2.3 Методика спрощених випробувань акселерометрів	42
2.4 Методика випробувань щодо детальних досліджень акселерометрів	46
2.5 Висновки до 2 розділу	50
3 Розробка проекту удосконалення лабораторного макету.....	51
3.1 Загальна будова удосконаленого лабораторного макету.....	51
3.2 Складові механічної частини.....	52
3.3 Інформаційно-вимірювальна система спрощених випробувань.....	62
3.4 Інформаційно-вимірювальна система для детальних досліджень.....	68
3.5 Висновки до 3 розділу	73
4 Охорона праці.....	74
Висновки	77
Перелік джерел посилання	79
Додаток А Графічний матеріал у вигляді презентації.....	83

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AutoCAD – система автоматизованого проектування;

CAD – computer aided design;

MatLab – система комп'ютерного моделювання;

АНГ – акселерометр з нагрівальним газом;

КДВ – конструкторсько-доводочні випробування;

МЕМС – мікроелектромеханічні системи;

САПР – система автоматизованого проектування;

ТЕ – термоелементи з алюмінію і полі кремнію;

ТУ – технічна умова.

ВСТУП

Технології мікромеханіки, або мікроелектромеханічних систем (МЕМС, або MEMS), швидко розвиваються. Це пояснюється багато в чому тим, що їх ключові переваги, якими є мініатюрність, функціональність, надійність, мале енергоспоживання, простота інтегрування, затребувані сьогодні практично всіма ринками електроніки. У зв'язку з чим широке застосування знайшли датчики, що виготовлені з використанням технології МЕМС. Одними з яскравих її представників, які охопили 80 % ринку виробництва, є акселерометри.

Акселерометри – це прилади для прийому і перетворення інформації про прискорення з метою одержання кількісного результату в формі, яка буде зручною для подальшого використання. Тобто це датчики, які призначені для вимірювання прискорення об'єкта (кутового чи лінійного), що рухається [1].

При цьому поява прискорення може бути обумовлена зовнішнім впливом на об'єкт – зміною положення, ударами, струшуванням, будь-якими рухами об'єкта або виведенням його зі стану рівноваги. Сучасні прилади здатні визначати прискорення по одній або декількох осях і роздільна здатність цих приладів дозволяє фіксувати навіть дуже незначний вплив.

Сфери застосування акселерометрів різноманітні. Вони широко використовуються в системах управління літальними апаратами, в космічних системах, в системах озброєння, для виявлення землетрусів та вимірювання кутів нахилу, сил інерції, ударних навантажень і вібрацій. Також їх використовують в медицині, у промислових системах вимірювань і керування, в інерційних системах навігації.

Багато наукових праць таких видатних вчених, як: М. А. Павловський, Б. Б. Самотокін, Д. А. Браславський, С. С. Рівкін, А. Ю. Ішлінський, С. Ф. Коновалов, Д. С. Пельпор та інші [2], присвячені дослідженням акселерометрів.

Провідними виробниками акселерометрів є фірми Analog Devices,

Motorola, Sensor Nor, Nippodenco, SNL.

Таким чином метою магістерської випускної атестаційної роботи є удосконалення існуючого лабораторного макету для дослідження характеристик акселерометрів, принципу їх дії, підвищення точності вимірювань.

Об'єкт дослідження – 2х-координатний акселерометр.

Предмет дослідження – характеристики 2х-координатного акселерометра.

Методи дослідження – комп'ютерне моделювання процесів за допомогою середовища Simulink системи MatLab.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути існуючий лабораторний макет та шляхи удосконалення його конструкції;
- розробити проект удосконалення механічної частини лабораторного макету за допомогою системи AutoCAD;
- розробити проект апаратної частини лабораторного макету за допомогою середовища Simulink системи MatLab;
- провести дослідження характеристик двохкоординатного акселерометра шляхом комп'ютерного моделювання процесів;
- оформити пояснювальну записку згідно з рекомендаціями [3], та вимогами ДСТУ 3008:2015 [4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Загальні відомості про акселерометри та їхні характеристики

Прискорення є важливим параметром для вимірювання абсолютних переміщень загального призначення, а також для вимірювання вібрації і ударів. Прискорення вимірюється акселерометрами, які серійно випускаються в широкому асортименті, різних типів і форм для задоволення вимог різних областей застосування. Вони виготовляються малого розміру, легкі по вазі, міцні і надійні для роботи в жорстких умовах навколишнього середовища. Вони можуть бути налаштовані як активні або пасивні датчики. Активний акселерометр (наприклад, п'єзоелектричний) дає вихід без використання зовнішнього джерела живлення, в той час як пасивний акселерометр змінює тільки свої електричні властивості (наприклад, ємність) і потребує зовнішнього джерела живлення. Вибір акселерометра активного або пасивного типу має важливе значення, оскільки активні датчики не можуть вимірювати роботу в статичному або режимі постійного струму. У тих випадках, коли мова йде про статичні виміри, необхідно використовувати пасивні датчики. Як правило, акселерометри краще датчиків переміщення і швидкості з наступних причин:

- вони мають широкий діапазон частот від нуля до дуже високих значень. Постійні прискорення можна легко виміряти;
- прискорення відбувається частіше, так як руйнують сили часто пов'язані з прискоренням, а не зі швидкістю або зміщенням;
- легше виконати вимір перехідних процесів і ударних хвиль, ніж вимір переміщень або швидкостей;
- зсув і швидкість можна отримати шляхом простого інтегрування прискорення за допомогою електронної схеми. Інтеграція краще, ніж диференціація.

Акселерометри можна класифікувати як динамічні, тобто їх робота заснована на вимірі сили, необхідної для стримування сейсмічної маси, щоб простежити за рухом прискореної бази, наприклад, пружинно-натягнуті типи кулі. Іншим типом є кінематичний акселерометр, який ґрунтується на часі проходження необмеженої доказової маси з точок, позначених на прискореному підставі. Ці типи акселерометрів використовуються в вузькоспеціалізованих додатках, таких як космічні апарати та гравіметричні вимірювання.

Для практичних цілей акселерометри можна також класифікувати як механічні або електричні в залежності від того, заснована чи відновлює сила або інший вимірювальний механізм на механічні властивості (наприклад, на законі руху, деформації пружини або гідродинаміки і т.д.) або на електричних або магнітних силах .

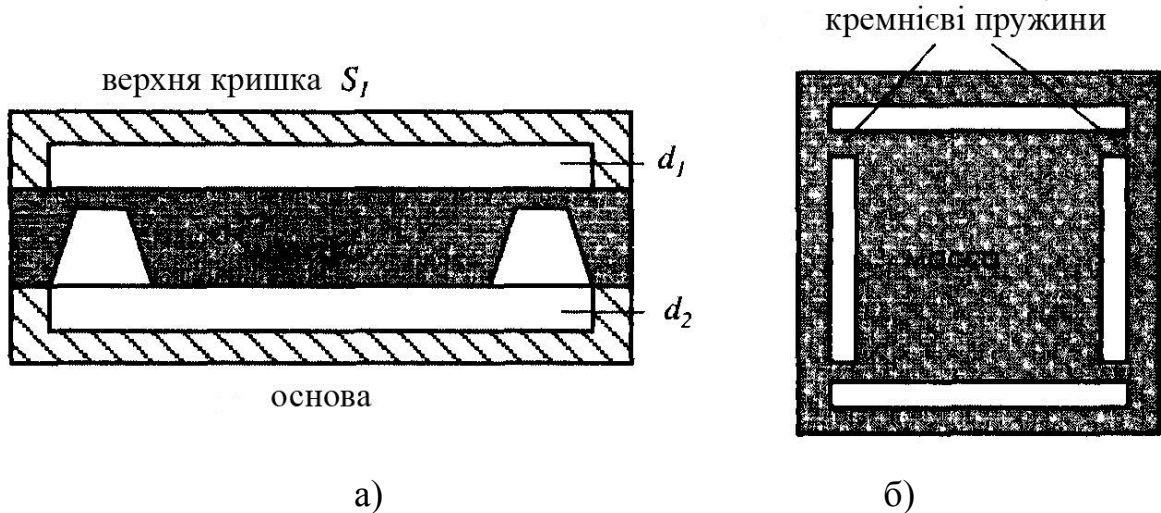
Калібрування акселерометрів дуже важливе і необхідне при вимірах прискорення, вібрації і ударів. Методи калібрування в широкому сенсі можна класифікувати як статичні або динамічні. Статична калібрування проводиться при одному або декількох рівнях постійного прискорення. Наприклад, якщо обраний метод калібрування за допомогою похилого столу, то використовується вертикальна складова вільного падіння без вибору величини. З іншого боку, якщо обрана центрифуга, то вона виробляє постійне прискорення в залежності від швидкості обертання, а величини можуть бути обрані в широкому діапазоні від 0 g до 50 000 g. Динамічне калібрування зазвичай виконується за допомогою електродинамічного вібростенда. Електродинамічний вібростенд призначений для коливання у синусоїдальному русі зі змінними частотами і амплітудами. Вони стабілізуються на обраних рівнях калібрування. Це абсолютний метод, який складається з вимірювання зміщення за допомогою лазерного інтерферометра і точного частотного вимірювача для точних частотних вимірювань. Вібростенд повинен приводитися в рух підсилювачем потужності, що дає синусоїдальний вихід з мінімальними спотвореннями. Високоточні акселерометри, в основному

п'єзоелектричного типу, калібрується за абсолютним методом і потім використовуються в якості робочого стандарту. Кращим методом є зворотне калібрування, при якому зразок випробування монтується безпосередньо на робочий стандарт, який, в свою чергу, монтується на електродинамічний вібростенд [5].

1.1.1 До складу всіх акселерометрів входить спеціальний елемент, названий інерційної масою, рух якого відстає від руху корпусу. І незалежно від конструкції датчика прискорень його основна мета полягає у виявленні переміщення цієї маси щодо корпусу пристрою і перетворенні його в пропорційний електричний сигнал. Тому іншою складовою частиною всіх акселерометрів є детектор переміщень, здатний вимірювати мікроскопічні амплітуди вібраційних коливань і лінійних прискорень. Ємнісний метод перетворення переміщень в електричний сигнал є перевіреним і надійним. Ємнісний датчик прискорення складається з двох пластин: стаціонарної, часто з'єднаної з корпусом, і що вільно переміщується всередині корпусу, до якої приєднана інерційна маса [6]. Ці пластини формують конденсатор, величина ємності якого залежить від відстані d між ними, а значить і від прискорення руху, яке відчуває датчиком. Максимальне переміщення, яке визначається ємнісним акселерометром, рідко перевищує 20 мкм. Отже, в таких датчиках завжди необхідно компенсувати дрейф різних параметрів, а також пригнічувати всілякі перешкоди. Тому зазвичай акселерометри мають диференціальну структуру, для чого в їх склад вводиться додатковий конденсатор, ємність якого повинна бути близька до ємності основного конденсатора. При цьому напруги на конденсаторі подаються із зсувом фаз 180 градусів. Тоді величина прискорення датчика буде пропорційна різниці значень ємностей конденсаторів.

На рисунку 1.1, а показано поперечний переріз ємнісного диференціального акселерометра, в якому інерційна маса розташована між верхньою кришкою і основою [7]. Маса підтримується чотирма кремнієвими пружинами (рис. 1.1, б). Верхня кришка і основа відокремлені від маси

відстанями d_1 , и d_2 . Всі три елементи виготовлені методами мікротехнологій на одній кремнієвій підкладці.



а) поперечний переріз акселерометра, б) вид зверху на інерційну масу, підтримувану чотирма кремнієвими пружинами

Рисунок 1.1 – Ємнісний акселерометр з диференціальним конденсатором [8]

1.1.2 Чутливим елементом таких акселерометрів є тензодатчик, що вимірює деформацію пружин, що підтримують інерційну масу. Ця деформація пропорційна величині і швидкості переміщення маси, а значить і прискоренню. Такі пристрої можуть вимірювати прискорення в широкому частотному діапазоні: від 0 кГц до 13 кГц. При розробці відповідної конструкції п'єзорезистивні акселерометри витримують перевантаження, що дорівнює 10000 g. Природно, що інтервал вимірювань таких датчиків значно вужчий: ± 1000 g з похибкою менше 1 %. Параметр перевантаження є критичним для багатьох застосувань. Акселерометри, реалізовані з дискретних компонентів, що володіють індивідуальними температурними характеристиками, страждають від високої температурної залежності вихідної напруги, що вимагає ретельного підбору параметрів складових елементів кожного датчика. Ця проблема вирішується при інтегральному виготовленні таких датчиків методами мікротехнологій.

На рисунку 1.2 показаний твердотільний акселерометр, що володіє широким динамічним діапазоном, розроблений Endevco/Allied Signal Aerospace Co (Sunnyvale, CA). Мікродатчик складається з трьох шарів кремнію. Внутрішній шар (ядро) включає в себе інерційну масу і пружну підвісну конструкцію. Маса кріпиться всередині рамки, сформованої методом травлення, на підвісі, з двох сторін якого розташовані тензодатчики, які виявляють рух маси. Зовнішні два шари: кришка і підстава, захищають рухомі частини від зовнішніх забруднень. В обох зовнішніх шарах зроблені поглиблення, що дозволяють інерційній масі вільно переміщатися [9]. У цього датчика є кілька важливих особливостей. Одна з них полягає в тому, що чутлива вісь датчика лежить в площині підкладки, тоді як в більшості конструкцій аналогічних датчиків вона перпендикулярна підкладці. Виготовлення всіх компонентів датчика на одному кремнієвому кристалі дозволяє реалізувати надійну і міцну механічну конструкцію.

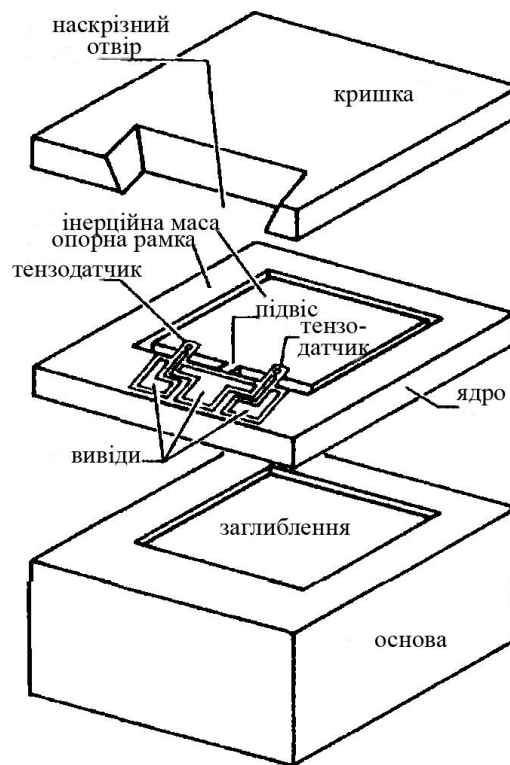


Рисунок 1.2 – Пристрій п'єзорезистивного акселерометра [8]

Коли прискорення діє на чутливу вісь, інерційна маса повертається навколо підвісу. При цьому один з тензодатчиків відчуває стиснення, а другий – розтягнення. Оскільки тензодатчики мають невелику довжину, навіть маленькі переміщення викликають великі зміни опору. Для балансування мостової схеми в тому ж кремнієвому кристалі сформовані п'ять підлаштованих резисторів.

1.1.3 П'єзоефект часто лежить в основі датчиків вібрацій і прискорень. Цей ефект полягає в прямому перетворенні механічної енергії в електричну в матеріалах, що мають кристалічну структуру, що включає в себе електричні диполі. Ці датчики працюють в частотному діапазоні менше від 2 Гц до 5 кГц. Вони також володіють хорошим придушенням позавісних шумів, високою лінійністю і широким температурним діапазоном (до 120 °С). Хоча іноді в якості чутливих елементів застосовуються кварцові кристали, все ж більшого поширення для цих цілей отримали керамічні п'єзоелектричні матеріали, такі як титанат барію, титанат цирконат свинцю (PZT) і метаніобат свинцю. Кристал розташовується між кожухом і інерційною масою, на яку діє сила, пропорційна прискоренню (рис. 1.3). Мікродатчик зазвичай реалізуються з кремнію. Оскільки кремній не володіє п'єзоелектричними властивостями, при формуванні інтегрованого мікродатчик на кремнієву консольну балку наноситься тонка плівка з титанату свинцю. Для поліпшення частотних характеристик п'єзоелектричний сигнал посилюється за допомогою перетворювачів заряд-напруга або струм-напруга, вбудованих в один і той же корпус з п'єзоелектричним кристалом.

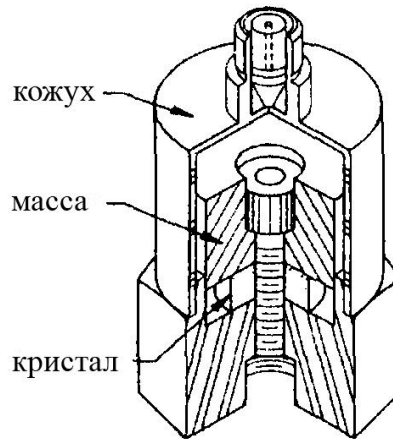
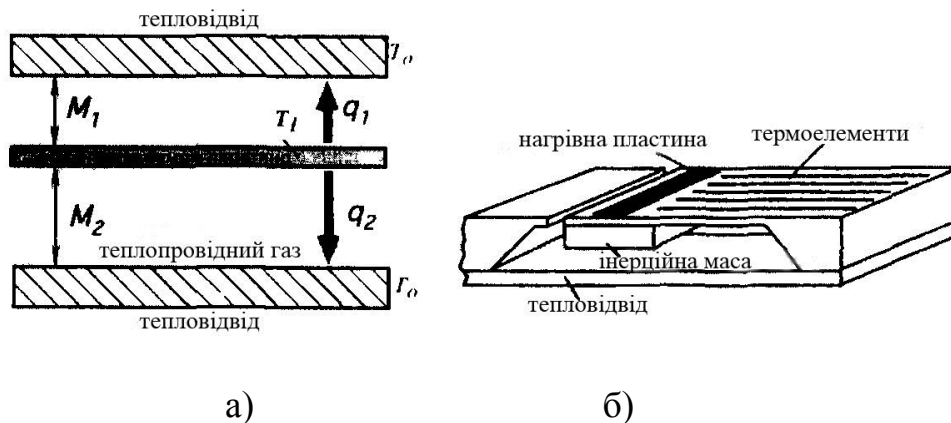


Рисунок 1.3 – Принципова схема п'єзоелектричного акселерометра [8]

1.1.4 Тепловий акселерометр, як і будь-який інший датчик прискорень, складається з інерційної маси, підвішеною на тонкій консольній балці, розташованій поруч з тепловідводною пластинною або між двох тепловідвідних пластин (рис. 1.4) [10]. Маса і балка виготовлені методами мікротехнологій. Простір між ними заповнений теплопровідним газом. Маса нагрівається за допомогою вбудованого нагрівача до заданої температури T_1 . Коли прискорення немає, між масою і тепловідведенням встановлюється теплова рівновага: кількість тепла q_1 , і q_2 , передане пластинам через газ пропорційно відстаням M_1 і M_2 .



а) поперечний переріз, що нагрівається частини; б) пристрій датчика без кришки

Рисунок 1.4 – Тепловий акселерометр [10]

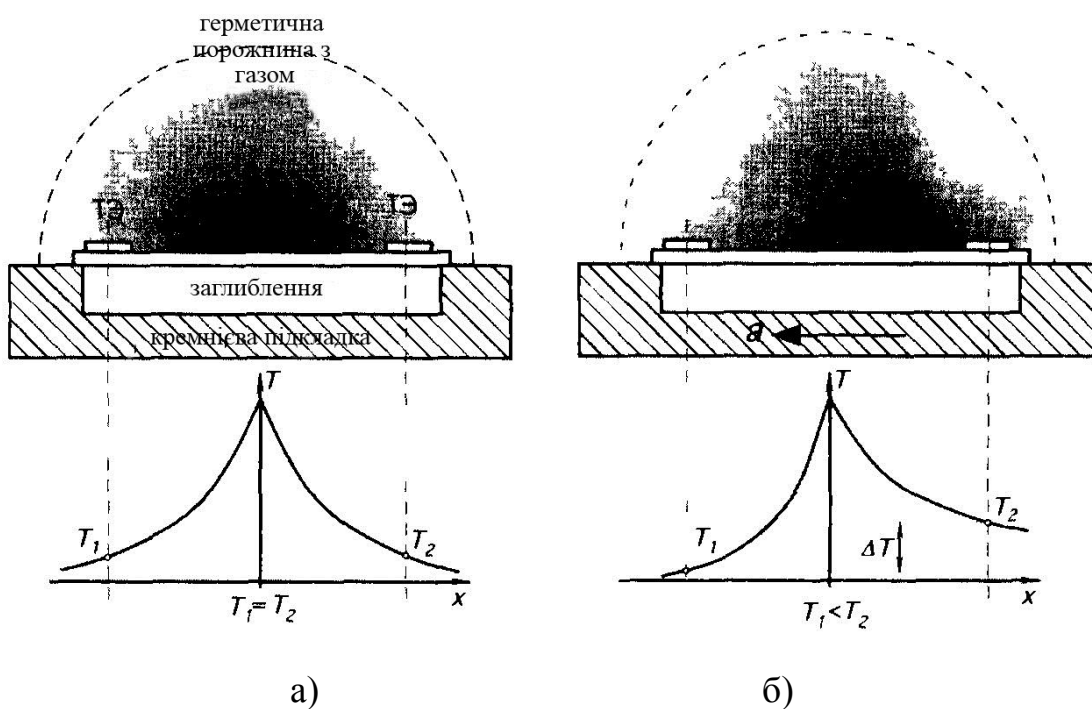
Температура в будь-якій точці консольної балки, на якій закріплена інерційна маса, залежить від відстані між нею і опорою x , а також від величини зазорів від неї до тепловідводів.

Для вимірювання температури на балці формується детектор температури, в якості якого можуть виступати інтегровані в балку діоди або нанесення на її поверхню послідовно з'єднані термопари. Ця температура, перетворена в електричний сигнал, і є мірою величини прискорення. Чутливість теплових акселерометрів трохи нижче, ніж у датчиків прискорень ємнісного і п'єзоелектричного типів, однак вони менш схильні до впливу температурних змін навколишнього середовища, а також електромагнітних і електростатичних перешкод.

1.1.5 Інший тепловий акселерометр використовує в якості інерційної маси – газ. Такий акселерометр розроблений MEMSIC Corporation. Він виготовлений на КМОП кристалі і є двовісний вимірником прискорень. Принцип дії такого пристрою заснований на передачі тепла методом примусової конвекції. Тепло може передаватися трьома способами: за рахунок теплопровідності, конвекцією і випромінюванням. Конвекція може бути природною (обумовленої силою гравітації) і примусової (для якої потрібно застосування зовнішніх пристроїв, наприклад, вентилятора). У акселерометрах з нагрітим газом (АНГ) джерелом такої зовнішньої сили є прискорення. Такі датчики визначають внутрішні зміни в процесах теплопередачі в замкнутому просторі газу. АНГ функціонально еквівалентні традиційним акселерометрам з інерційною масою. В даному випадку в ролі інерційної маси виступає нерівномірно нагрітий газ. Така інерційна маса має низку переваг у порівнянні з традиційною твердотільною масою. Головною перевагою є високий рівень допустимих перевантажень (до 50 000 g), що значно підвищує їх надійність.

Датчик складається з пластини, що примикає до герметичної порожнини, заповненої газом. В пластині витравлені поглиблення. У центрі кремнієвої пластини над поглибленням підвішений нагрівач (рис. 1.5). На пластині

встановлені чотири датчика температури: термоелементи з алюмінію і полікремнію (ТЕ). ТЕ розташовані на однаковій відстані з чотирьох сторін від нагрівача (дві осі). Відзначимо, що ТЕ визначають тільки градієнт температур, тому лівий і правий ТЕ можна вважати одним ТЕ, де ліва частина відповідає холодного спаю, а права – гарячого. В даному випадку ТЕ використовуються замість термопар з єдиною метою: збільшити електричний вихідний сигнал. Інша пара ТЕ застосовується для визначення градієнта температур уздовж осі x .



- а) нагрітий газ розташовується симетрично навколо нагрівача;
 б) прискорення змушує нагрітий газ зміщуватися вправо, що призводить до перепаду температур

Рисунок 1.5 – Поперечний переріз АНГ уздовж осі x [8]

При нульовому прискоренні розподіл температури всередині порожнини з газом симетрично щодо джерела тепла, тому всі чотири ТЕ виявляють однакову температуру, що призводить до нульового вихідній напрузі в кожній парі чутливих елементів. Нагрівач розігрівається до температури вище температури навколишнього середовища (зазвичай близько $200\text{ }^{\circ}\text{C}$). На рис.

1.5, а показані два ТЕ, що вимірюють градієнт температури вздовж осі x . З малюнка видно, що найбільша температура газу спостерігається поруч з нагрівачем, і вона досить різко падає ближче до країв, де розташовані ТЕ. Коли на газ не діють ніякі сили, температура має конусоподібний розподіл навколо нагрівача, при цьому температура лівого ТЕ T_1 , дорівнює температурі T_2 правого ТЕ. Прискорення акселерометра в будь-якому з напрямів через конвекційної теплопередачі змінить температурний профіль, який стане несиметричним. На рисунку 1.5, б показано, як зміниться температурний профіль при прискоренні a , напрямом якого вказано стрілкою. Під дією прискорення теплі молекули газу зміщуються до правого ТЕ, передаючи йому частину своєї енергії. В результаті цього температури, a , отже, і вихідні напруги правого і лівого ТЕ перестануть бути рівними ($T_1 < T_2$). Різниця температур ΔT , а значить, і напруга між виходами ТЕ прямо пропорційна прискоренню. У даній конструкції існує два ідентичних вимірювальних каналу, що дозволяють визначати прискорення вздовж осі x та y .

АНГ здатні вимірювати прискорення в діапазоні від ± 1 g до ± 100 g. Такі акселерометри можуть визначати і динамічне прискорення (наприклад, вібрації), і статичну прискорення (наприклад, прискорення вільного падіння). Аналогові вихідні напруги знімаються з чіпа як в абсолютному, так і у відносному вигляді. Абсолютна вихідна напруга не залежить від прикладеної напруги, а відносна – пропорційно йому. Типовий шумовий поріг для АНГ нижче 10^{-3} g/Гц, що дозволяє на дуже низьких частотах вимірювати субміліметрові сигнали прискорення. Швидкодія датчика, тобто його здатність виявити швидкі зміни прискорення, залежить від його конструкції. -3 дБ спад частотної характеристики для типового АНГ відбувається на частоті близько 30 Гц. Цей діапазон може бути розширений до 160 Гц із застосуванням компенсаційних схем.

Слід зазначити, що чутливість вихідного сигналу АНГ змінюється при зміні навколишньої температури (рис. 1.6). Для компенсації цієї зміни в чіп

акселерометра вбудовується температурний датчик (резистивний детектор температури або кремнієвий перехід).

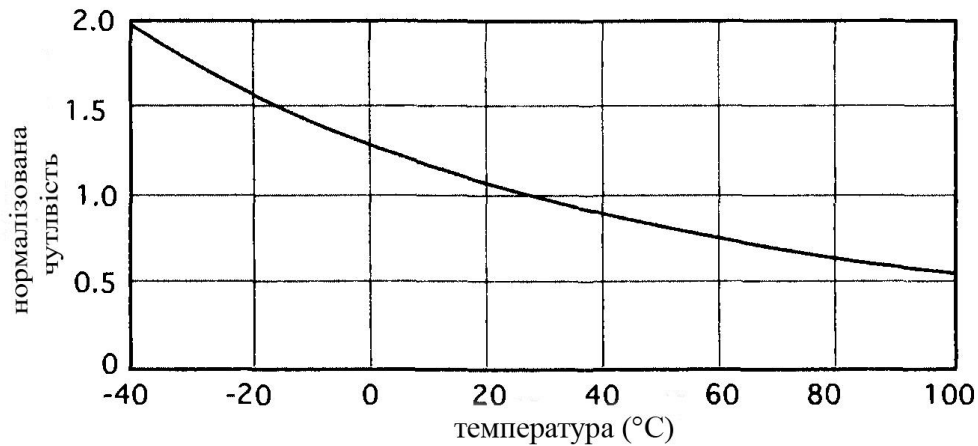


Рисунок 1.6 – Чутливість теплового акселерометра до навколишньої температури [8]

1.2 Підходи щодо організації та планування випробувань датчиків

1.2.1 Випробуванням в тій чи іншій формі або обсязі піддаються будь-які промислові вироби. У найпростішому випадку це просто зовнішній огляд контролером; в інших випадках – це складний експеримент великих масштабів (запуск космічного об'єкта, дослідження турбіни електростанції і т. п.) [11].

Специфіка роботи датчиків визначає досить жорсткі вимоги до їх випробувань, які є основним фактором відпрацювання конструкції датчика і перевірки відповідності його технічних характеристик заданим тактико-технічним вимогам.

Випробування ділять на дослідні та контрольні.

Дослідницькі випробування проводять в процесі розробки датчика з метою визначення його технічних можливостей, підтвердження розрахункових значень параметрів, визначення меж працездатності. При відпрацюванні макетних зразків датчиків вивчають вплив на нього кліматичних і механічних впливів, оцінюють запаси працездатності по цих впливах, визначають

метрологічні характеристики, закони розподілу ресурсів, аналізують динамічні характеристики [11].

Обсяг дослідницьких випробувань залежить від ступеня наступності розробленої конструкції датчика, її новизни, ступеня вивченості питань, пов'язаних з технічними рішеннями, закладеними в конструкцію датчика.

Одним з основних видів дослідницьких випробувань є лабораторно-відробіткові випробування датчика [11].

Лабораторно-відробіткові випробування завершують етап ескізного проектування. В процесі цих випробувань перевіряється правильність закладених методів перетворення, підтверджується принципова можливість досягнення заданих метрологічних характеристик, оцінюється стійкість макетних зразків датчиків до теплових і механічних впливів.

Наступним видом дослідних випробувань є конструкторсько-доводочні випробування (КДВ) [11].

Конструкторсько-доводочні випробування завершують етап технічного проектування. КДВ проводять по більш широкій програмі. В процесі КДВ перевіряються і досліджуються всі основні технічні характеристики датчиків. На підставі результатів КДВ складають технічні умови на датчик.

Контрольні випробування датчиків ділять на попередні, приймально-здавальні, періодичні, типові, державні та міжвідомчі.

Попередні випробування проводять на дослідних зразках або досвідчених партіях з метою вирішення питання про можливість їх пред'явлення на державні або міжвідомчі випробування. Попередні випробування завершують етап розробки робочої документації. Їх проводить комісія, що складається з представників всіх пов'язаних з розробкою датчиків служб підприємства. Комісія перевіряє готовність і комплектність технічної документації, готовність апаратури, технологічної оснастки і контрольно-вимірювальних засобів до випробувань. Комісія також контролює ведення документів з випробувань, встановлює причини незадовільних результатів випробувань, видає рекомендації, спрямовані на усунення виявлених в процесі випробувань

недоліків, веде звітність за результатами випробувань (складання протоколів, актів, звітів, технічних рішень тощо).

У процесі проведення випробувань ведуть справу випробувань і журнал випробувань. У журналі випробувань відображають хід і результати випробувань. Після кожного виду випробувань члени комісії дають однозначний висновок про те, витримав чи не витримав його датчик.

У справі випробувань знаходиться контрольний примірник програми попередніх випробувань, акти і технічні рішення за результатами випробувань, протоколи випробувань.

Після проведення попередніх випробувань розробка датчика фактично закінчується.

При серійному виробництві випущені датчики піддають приймально-здавальним випробуванням. Їх обсяг і послідовність встановлюють при розробці технічних умов (ТУ). В процесі приймально-здавальних випробувань визначають основні технічні характеристики датчика, оцінюють його похибка.

Якщо в процесі приймально-здавальних випробувань буде виявлено невідповідність датчика хоча б одній вимозі ТУ, то датчик підлягає поверненню для виявлення причин браку та його усунення.

Повторні випробування забракованих датчиків проводять в повному обсязі приймально-здавальних випробувань. Якщо при цих випробуваннях також буде виявлено невідповідність датчиків вимогам ТУ, то датчики бракують.

На підставі приймально-здавальних випробувань заповнюють формуляр, дублікат якого зберігають на підприємстві-виробника протягом гарантійного терміну.

Іншим видом випробувань, яким піддають датчики в процесі серійного виробництва, є періодичні випробування. Періодичність цих випробувань регламентується певними документами. Це можуть бути технічні умови, галузеві або міжгалузеві нормалі, та державні стандарти. Як правило, в них пропонується проводити ці випробування раз на рік, або в разі зміни технології

виробництва або документації. Ці випробування проводять по більш широкій програмі, ніж приймально-здавальні. У програму періодичних випробувань включають такі що вимагають значних витрат часу види випробувань, як випробування на теплостійкість, холодостійкість, вологостійкість, на транспортну тряску, ресурсні випробування і випробування по визначенню кількісних показників надійності. Періодичним випробуванням піддають датчики, які пройшли приймально-здавальні випробування.

Обсяг і методику періодичних випробувань конкретизують при розробці ТУ.

Якщо під час періодичних випробувань виявляють невідповідність датчика хоча б одній з вимог ТУ, то приймання чергових датчиків, а також поставку прийнятих припиняють до усунення виявлених дефектів. Результати періодичних випробувань і перелік дефектів, виявлених при випробуваннях, оформляють актом.

У ряді випадків для поліпшення технічних характеристик датчика, підвищення його надійності або технологічності виготовлення підприємство-розробник може змінити конструкцію, технологію виготовлення або замінити вживані матеріали. Для перевірки ефективності проведених змін та відповідності модернізованих датчиків вимогам ТУ проводять типові випробування [11]. Типові випробування проводить завод-виготовлювач за погодженою з підприємством-розробником програмою. Програма повинна забезпечувати порівнянність результатів випробувань до і після внесення змін.

Державні та міжвідомчі випробування дослідних зразків датчиків проводять з метою вирішення питання про доцільність виробництва або передачі їх в експлуатацію (у разі індивідуального виробництва).

Державні випробування проводить державна комісія, а міжвідомчі – комісія, що призначається декількома зацікавленими міністерствами.

Істотне значення при проведенні різного роду контрольних випробувань має своєчасне дослідження причин виявлених дефектів і відмов. На

підприємствах, які розробляють та виготовляють датчики, як правило, діє система обліку і аналізу відмов.

Аналіз відмов проводить комісія, що складається з представників усіх зацікавлених служб підприємства. Комісія має у своєму розпорядженні необхідне дослідницьке устаткування і може при необхідності залучати до роботи будь-яких фахівців підприємства. Її завдання полягає в чіткому і однозначному визначенні характеру відмови, причини і винуватців її появи. Результатом роботи комісії є акт дослідження, в якому надані конкретні рекомендації щодо усунення причин появи відмов і намічені терміни виконання цих рекомендацій.

Зі сказаного вище випливає, що випробування – це трудомісткий і відповідальний процес, який охоплює всі етапи створення датчика. Правильне і раціональне їх планування може привести до істотної економії як матеріально-технічних витрат, так і витрат часу.

З точки зору теорії експерименту, випробування датчика – це активний і, взагалі кажучи, багатофакторний експеримент. Мета його полягає в отриманні інформації з певним ступенем вірогідності, яка цікавить експериментатора [11].

При плануванні дослідницьких випробувань експериментатор (розробник датчика) не пов'язаний будь-якими жорсткими рамками, оскільки матеріали і результати цих випробувань потрібні, перш за все, йому самому. Порядок контрольних випробувань жорстко регламентований відповідною технічною документацією, що представляє по суті справи план експерименту. Цей план розробляє конструктор-розробник, його узгоджують з усіма зацікавленими службами і організаціями і він є обов'язковим для виробника і споживача.

1.2.2 Основне призначення датчика – перетворення вимірювальної інформації, як правило, в умовах впливу великого числа впливаючих факторів різної інтенсивності. Основним показником якості цього перетворення є достовірність перетвореної інформації, а основними критеріями достовірності – похибка датчика і його надійність. Тому випробування, метою яких є оцінка

похибки і надійності датчика, складають основну частину всіх випробувальних робіт [11].

При плануванні випробувань за оцінкою похибки експериментатору відомий перелік факторів, що впливають і їх граничні значення. З точки зору теорії експерименту оптимальним варіантом було б проведення багатофакторного експерименту при варіюванні впливаючих факторів і вхідної вимірюваної величини у всьому діапазоні їх зміни з подальшою оцінкою дисперсії вихідного сигналу. Однак застосувати оптимальний варіант, як правило, не вдається.

Першим обмеженням є неможливість застосування рандомізації [11]. Це пояснюється тим, що принципи дії більшості датчиків механічних величин засновані на використанні явищ, що володіють гістерезисними ефектами (механічний гістерезис пружних елементів, магнітний гістерезис електромагнітних перетворювачів і т. п.).

Друге, основне, обмеження полягає в відсутності випробувального устаткування, що дозволяє варіювати декількома впливаючими факторами на різних рівнях. Наприклад, при випробуванні датчика тиску неможливо одночасно задати підвищену температуру і вібрацію.

Перше обмеження призводить до послідовного плану експерименту, друге – до розкладання багатофакторного експерименту на деяку послідовність однофакторних і двохфакторних експериментів.

Основна канва планування випробувань по визначенню похибки (метрологічних випробувань) визначається статистичною моделлю похибки. Відповідно до цієї моделі послідовно визначають чутливості датчика до вимірюваного параметру та впливаючих факторів. При цьому всі впливаючі фактори приймають незалежними між собою, а вклади кожного фактора в загальну дисперсію поділяють на дві складові: залежну і незалежну від вимірюваної величини (мультиплікативна і адитивна складові). Внаслідок такого поділу, чутливості до впливаючих факторів визначають в результаті

двухфакторного експерименту з одночасним варіюванням фактора і вимірюваної величини.

Визначивши всі чутливості (коефіцієнт перетворення і коефіцієнти впливу) і оцінивши дисперсії факторів, що впливають, розраховують загальну дисперсію результату перетворення.

Інші види випробувань, такі, як випробування на вібростійкість, перевірка герметичності, опору ізоляції та т. п., планують однофакторними.

Істотне значення при плануванні випробувань датчиків має послідовність їх проведення. В першу чергу планують перевірки, які не впливають на працездатність датчика. До таких перевірок відносяться перевірки комплектності документації, маси датчика, опору ізоляції, полярності, початкового рівня і «фону» вихідного сигналу.

Потім планують перевірки, при яких датчик функціонує в нормальних умовах. До таких перевірок відносяться перевірки нелінійності амплітудної характеристики, гістерезису і чутливості датчика. Далі слід зняття амплітудних і фазових частотних характеристик.

Найбільш важливими і значними за обсягом є випробування по визначенню метрологічних характеристик, при яких оцінюють чутливості датчика до впливаючих факторів. Після цього перевіряють стійкість датчика до теплових впливів, впливу вологості, вібростійкість, проводять інші види випробувань з імітацією експлуатаційних умов.

При плануванні випробувань на теплові впливи слід строго витримувати час встановлення режимів кліматичних камер. Крім того, необхідно враховувати термічні постійні часу самих випробовуваних датчиків, оскільки час прогріву (охолодження) датчика може бути значним. Тому, крім часу встановлення режиму в кліматичній камері, необхідно враховувати і певний час на витримку датчика в даному режимі, після чого знімати показання.

Датчики з обмеженим часом теплового впливу поміщають в кліматичну камеру лише після встановлення в ній необхідного теплового режиму.

При плануванні вібраційних випробувань в програму насамперед закладають оглядове проходження всього заданого частотного діапазону. В результаті такого проходження виявляють приватні резонанси на різних ділянках частотного діапазону, визначають ширину і амплітуду цих резонансів, перевіряють працездатність датчика в найбільш небезпечних ділянках частотного діапазону вібрацій.

При плануванні двохфакторних експериментів по визначенню чутливості датчиків до впливаючих факторів, взагалі кажучи, байдуже, що прикладати раніше – вимірювану величину або впливаючий фактор, дія якого оцінюється. Однак в ряді випадків послідовність визначається швидкістю відтворення. Наприклад, при визначенні чутливості датчика тиску до температури спочатку створюється тепловий режим, а потім подається значення вимірюваного тиску.

У процесі планування випробувань слід завжди пам'ятати, що датчик має, як правило, обмежений ресурс роботи. Тому загальну тривалість перевірок потрібно планувати в межах ресурсу.

Вказана обставина набуває особливого значення при плануванні контрольних приймально-здавальних випробувань, після проведення яких датчики постачають споживачеві. Технічні умови встановлюють мінімальний обсяг перевірок при приймально-здавальних випробуваннях, необхідний для підтвердження відповідності основних технічних характеристик. Наприклад, для тензорезисторного датчика лінійних прискорень можлива наступна послідовність перевірок:

- зовнішній вигляд, маркування, габаритно-монтажні розміри;
- опір між екраном кабельної перемички і корпусом датчика;
- опір ізоляції; опір діагоналей бруківці ланцюга;
- початковий розбаланс бруківці ланцюга;
- полярність сигналу з датчика;
- діапазон вимірів;
- нелінійність калібрувальної характеристики;
- температурна похибка чутливості;

- амплітудно-частотна характеристика;
- похибка від вібрації;
- основна похибка.

Наведений обсяг перевірок дозволяє оцінити загальну працездатність датчика і відповідність його метрологічних характеристик заданим технічними умовами.

Найважливішим видом випробувань датчиків є випробування по визначенню кількісних показників надійності. Особливість їх полягає в тому, що одним з основних елементів планування виступає час.

1.3 Існуючий лабораторний макет та шляхи його удосконалення

Існуючий лабораторний макет має наступні компоненти: контролер Arduino Uno (рисунок 1.7), акселерометр ADXL345 (рисунок 1.8), LCD-дисплей (рисунок 1.9), перетворювач I2C інтерфейсу (рисунок 1.10), USB-кабель, пристрій розрахунку кута, основа та набір дротів.



Рисунок 1.7 – Контролер Arduino Uno R3 на основі мікроконтролера ATmega328P

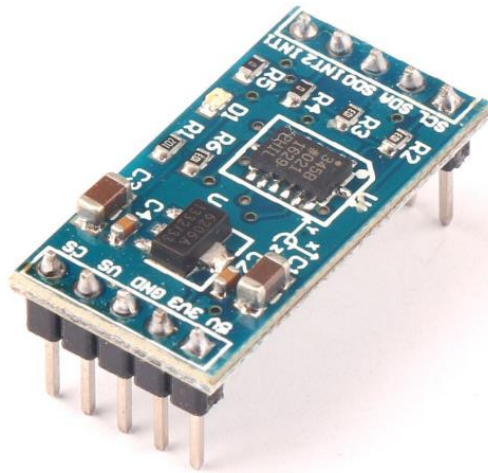


Рисунок 1.8 – Трьохосьовий акселерометр ADXL345

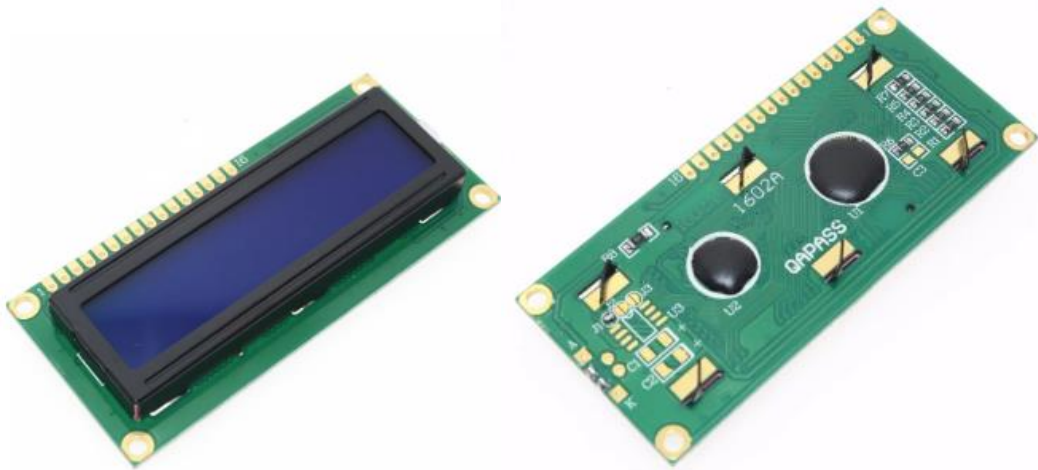


Рисунок 1.9 – LCD-дисплей 1602A



Рисунок 1.10 – I²C інтерфейсний модуль

В макеті була використана готова плата з LCD-дисплеєм 16x2, який підключений к інтерфейсному модулю I²C для зниження кількості контактів

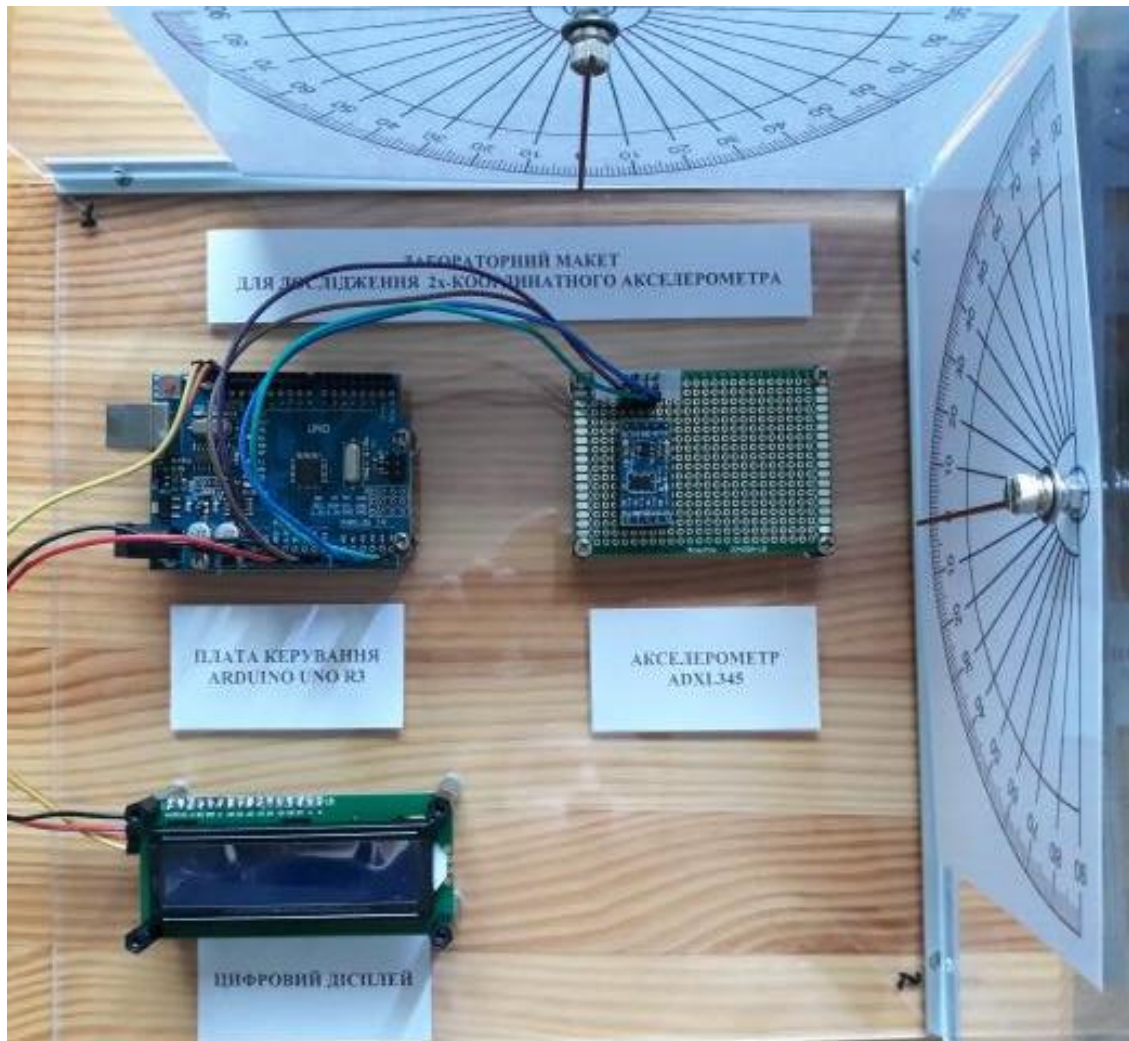


Рисунок 1.12 – Існуючий лабораторний макет

Серед недоліків та обмежень існуючого лабораторного макету це необхідність руками нахилити та підтримувати макет, що може вплинути на результати експериментальних досліджень через вібрації, та стрілки на бокових стінках, які не можуть працювати коректно при нахилу макету по осі x та y одночасно.

Тому для написання магістерської атестаційної роботи було прийнято рішення удосконалити існуючий лабораторний макет використовуючи системи автоматизованого проектування (САПР), тобто AutoCAD.

1.4 Використання САПР для удосконалення лабораторного макету

Система AutoCAD, яка була створена фірмою Autodesk, є на сьогоднішній день найбільш поширеною програмною з графічною системою автоматизованого проектування в промисловості. Сама фірма Autodesk посідає сьоме місце в світовому рейтингу серед розробників програмного забезпечення для ПК. Загальноприйнятим у світі ПК скороченням CAD називають як систему конструювання (computer aided design), так і систему технічного креслення (computer aided drafting and drawing) за допомогою комп'ютера.

Перша версія AutoCAD побачила світ в 1982 році і працювала в середовищі DOS. Це була перша по-справжньому працездатна програма автоматизованого проектування, здатна працювати на ПК. У той період подібного роду системи використовували в якості технічної бази досить потужні робочі станції, а більшість систем взагалі експлуатувалося на великих обчислювальних машинах.

Успіх AutoCAD пояснюється його знаменитою відкритою архітектурою – гнучкістю, яку кінцевий користувач повинен налаштовувати програму, використовуючи файли вихідного коду у форматі звичайного тексту (ASCII), та мовами програмування (такими як AutoLISP, VBA, VB. NET, C #, C ++ та JavaScript) [12].

Як результат, AutoCAD – надзвичайно гнучка програма проектування, застосовна до всіх галузей. Підтримка AutoCAD інших мов, крім англійської, у тому числі з використанням інших алфавітів, не має собі рівних, що робить AutoCAD надзвичайно популярним за кордоном. Як результат, AutoCAD використовується у всіх дисциплінах та у більш ніж 150 країнах.

Завдяки високому рівню технічних інновацій та досвіду, Autodesk створив програму з розширеними функціями та можливостями, включаючи моделювання та візуалізацію поверхневих та твердих поверхонь, доступ до зовнішніх баз даних, імпорт та експорт інших форматів файлів, підтримку Інтернету та інше.

AutoCAD є базовою системою для цілого ряду більш спеціалізованих САПР, що використовуються в різних областях техніки [13]:

- архітектурних САПР; по відношенню до них часто використовується аббревіатура АЕС – architectural, engineering, construction (архітектура, планування, будівництво);
- машинобудівних САПР;
- географічних інформаційних систем (Geographic Information Systems – GIS);
- автоматизованих систем управління ресурсами;
- САПР в електротехніці і електроніці;
- систем мультимедіа.

Є, однак, і багато інших, менш відомих областей застосування AutoCAD, серед яких можна відзначити моделювання одягу, промисловий дизайн. Список цей можна продовжувати досить довго.

1.5 Висновки до 1 розділу

У першому розділі наведені загальні відомості про акселерометри, їхні класифікації та характеристики. Розглянуто існуючі підходи щодо організації та планування випробувань датчиків.

Також розглянутий існуючий лабораторний макет, його недоліки та обмеження, запропоновані шляхи удосконалення його конструкції за допомогою використання САПР, де для цього обрана, відома багатьом, система AutoCAD для проектування конструкції макету, та середовище Simulink системи MatLab для комп'ютерного моделювання процесів.

2 ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ УДОСКОНАЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТУ

2.1 Задачі проекту удосконалення лабораторного макету

Удосконалення існуючого лабораторного макету для дослідження характеристик двохкоординатних акселерометрів здійснюється з метою усунення певних його недоліків та обмежень (див. підрозд. 1.3). Для реалізації цієї мети пропонується розв'язати наступні задачі:

– запропонувати проект удосконалення механічної частини лабораторного макету, щоб забезпечити можливість створення та незалежного визначення тестових прискорень для перевірки результатів вимірювань акселерометру уздовж кожному напрямку окремо та в двох напрямках одночасно. Проект такого удосконалення має бути представлений у вигляді ескізів та креслень деталей механічної частини лабораторного макету та має бути обґрунтованим результатами моделювання процесів, що відбуватимуться при виконанні досліджень характеристик двох-координатного акселерометру. Ескізи та креслення проекту удосконалення механічної частини лабораторного стенду мають бути виконані за допомогою системи AutoCAD [14], а моделювання процесів – за допомогою середовища Simulink системи MatLab [15, 16];

– розробити ескізний (концептуальний) проект апаратної частини та методику її використання для виконання швидких випробувань щодо визначення працездатності та наближених оцінок похибок вимірювань двохкоординатних акселерометрів за допомогою лабораторного макету з удосконаленою механічною частиною. Ескізний (концептуальний) проект апаратної частини системи для швидких випробувань двохкоординатних акселерометрів представити у вигляді системи динамічних ланок, та властивостей, які вони мають мати. Обґрунтування проекту апаратної частини

для лабораторного макету щодо виконання швидких випробувань характеристик двохкоординатних акселерометрів здійснити шляхом комп'ютерного моделювання процесів, що відбуватимуться при виконанні випробувань за допомогою середовища Simulink системи MatLab [15, 16];

– розробити ескізний (концептуальний) проект апаратної частини та методику її використання для виконання випробувань щодо детальних досліджень характеристик двохкоординатних акселерометрів за допомогою лабораторного макету з удосконаленою механічною частиною. Ескізний (концептуальний) проект апаратної частини системи для випробувань щодо детальних досліджень характеристик двохкоординатних акселерометрів представити у вигляді системи динамічних ланок, та властивостей, які вони мають мати. Обґрунтування проекту апаратної частини для лабораторного макету щодо виконання детальних досліджень характеристик двохкоординатних акселерометрів здійснити шляхом комп'ютерного моделювання процесів, що відбуватимуться при виконанні необхідних випробувань за допомогою середовища Simulink системи MatLab [15, 16].

Розв'язування перелічених задач за рахунок розробки проекту удосконалення існуючого лабораторного макету дозволить створити у подальшому досить досконалий макет для демонстрації властивостей та характеристик двохкоординатних акселерометрів, який буде значно простішим у порівнянні із існуючими аналогами [17]. Такий лабораторний макет може бути використаним для додаткових нестандартних випробувань при сертифікації акселерометрів, але основною галуззю його використання має бути навчальний процес, що обумовлено невисокою вартістю виготовлення та експлуатації, а також можливостями спостерігати наочно за процесами, що відбуваються при вимірюваннях, на відміну від експериментальних установок промислового призначення [17].

2.2 Можливості утворення тестових прискорень у двох напрямках

Визначення характеристик акселерометру ґрунтується на вимірюваннях прискорення при спеціально створеному тестовому русі та порівняння результатів вимірювань із відомими характеристиками.

Двох-координатні акселерометри дозволяють вимірювати прискорення у двох, зазвичай ортогональних, напрямках, що зв'язані із орієнтацією корпусу акселерометру та позначені як x_A та y_A на рис. 2.1. Зрозуміло, що для випробування таких двокоординатних акселерометрів слід забезпечувати тестові (лабораторні) рухи у двох напрямках, які позначені відповідно x_L та y_L на рис. 2.1, як окремо у кожному із цих напрямків вимірювання, так і одночасно у двох цих напрямках, щоб мати можливість досліджувати вимірювальні прискорення у напрямках x_A та y_A (рис. 2.1). Забезпечення таких можливостей щодо створення тестових рухів не містить принципових труднощів (рис. 2.2) і може бути реалізовано за використанням відомих доробок, які використовуються, наприклад, у металорізальних верстатах [18–21] для забезпечення рухів у площині різців та деталей.

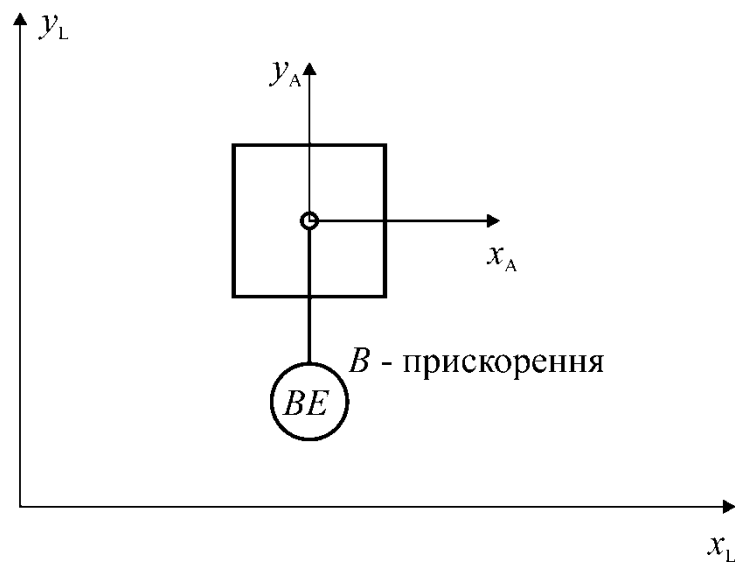
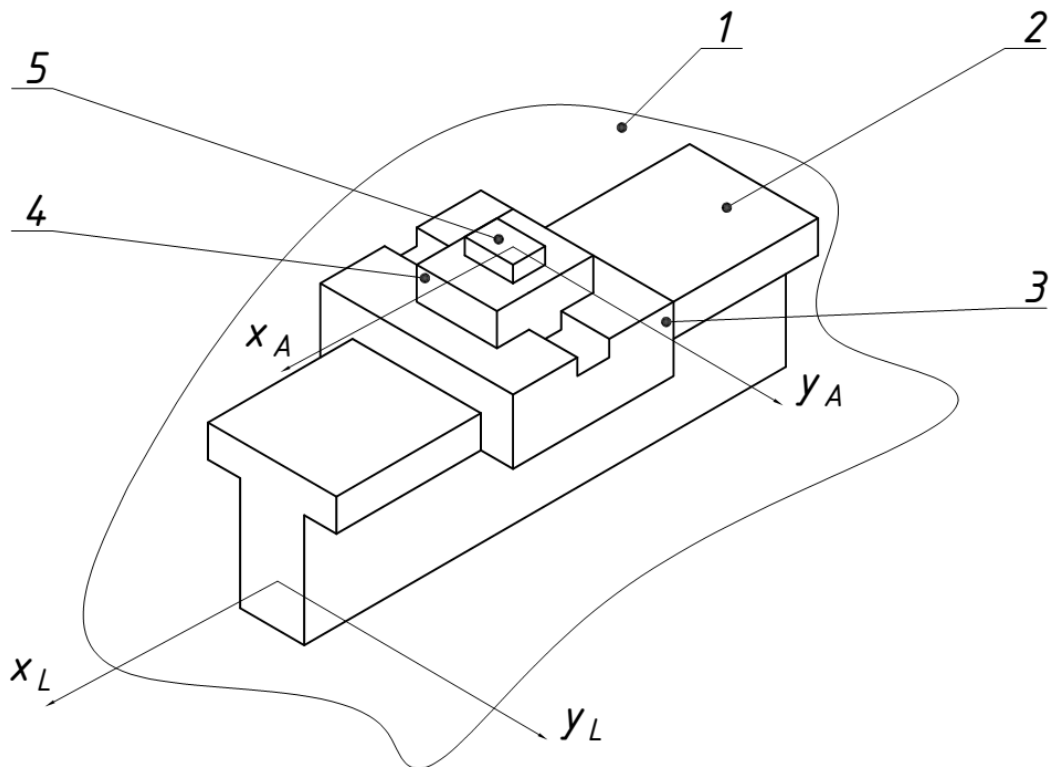


Рисунок 2.1 – Напрями вимірювань та тестових (лабораторних) рухів для двокоординатного акселерометру



- 1 – нерухомий лабораторний стіл; 2 – напрямна руху уздовж осі x_L ;
 3 – проміжний рухомий лабораторний стіл; 4 – рухомий лабораторний стіл;
 5 – досліджуваний акселерометр

Рисунок 2.2 – Напрямні для забезпечення руху у двох напрямках

Забезпечення руху у площині за допомогою ортогональних напрямних (див. рис. 2.2) окрім переваг щодо можливостей утворення різноманітних рухів, має певні недоліки. По-перше, для забезпечення досить великої площі рухомого лабораторного столу -4 (див. рис. 2.2) конструкція має мати відповідні досить великі розміри. По-друге, виготовлення такої конструкції має здійснюватися з виростанням відповідних індустріальних технологій, що підвищить вартість конструкції до рівня, що є неприпустимим для забезпечення можливостей подальшого виготовлення для потреб навчальних лабораторій та використання у навчальних цілях. По-третє, експлуатація такої конструкції (див. рис. 2.2) буде ускладнюватися через наявність двох комплектів приводів, які мають забезпечувати рухи уздовж кожного із напрямків x_L та y_L . Таким чином, удосконалення механічної частини лабораторного макету для визначення

характеристик двохкоординатних акселерометрів із використанням традиційних конструкцій, що є сьогодні широко використовуваними у сучасному машинобудуванні, дозволить забезпечити функціональне призначення лабораторного макету відповідно сформульованим вище у підрозд. 2.1 завданням, але вимагатиме використання досить масивних конструкцій та значних витрат на їхнє виготовлення та на подальшу експлуатацію удосконаленого таким чином лабораторного макету.

Ускладнення та недоліки запропонованої вище (див. рис. 2.2) схеми удосконаленої механічної частини лабораторного стенду для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів обумовлені необхідністю забезпечувати рухи у двох напрямках для визначення відповідних складових прискорення. В той же час, насправді для визначення характеристик двохкоординатного акселерометру слід забезпечувати прискорення уздовж його осей x_A та y_A незалежно від того як рухається сам акселерометр відносно нерухомих осей x_L та y_L (див. рис. 2.1 та рис. 2.2). З теоретичної механіки [22-24] є цілком зрозумілим, що при прямолінійному русі акселерометру уздовж осі s_L (рис. 2.3) за рахунок вибору відповідної орієнтації вимірювальних напрямків x_A та y_A акселерометру відносно напрямку руху (рис. 2.3) можна забезпечувати різні прискорення у цих вимірювальних напрямках x_A та y_A у залежності від куту між напрямком x_A та s_L :

$$\ddot{x}_A = \ddot{s}_L \cos \alpha_L, \quad \ddot{y}_A = \ddot{s}_L \sin \alpha_L, \quad (2.1)$$

де \ddot{x}_A та \ddot{y}_A – прискорення акселерометру у напрямках x_A та y_A ;

\ddot{s}_L – прискорення руху акселерометру уздовж напрямку s_L ;

α_L – кут між напрямком x_A та s_L (рис. 2.3).

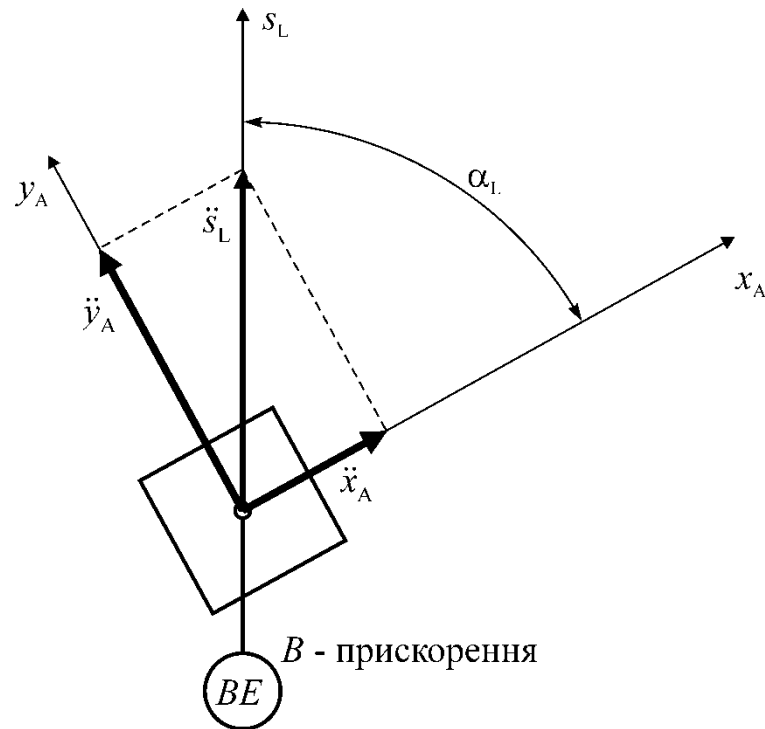
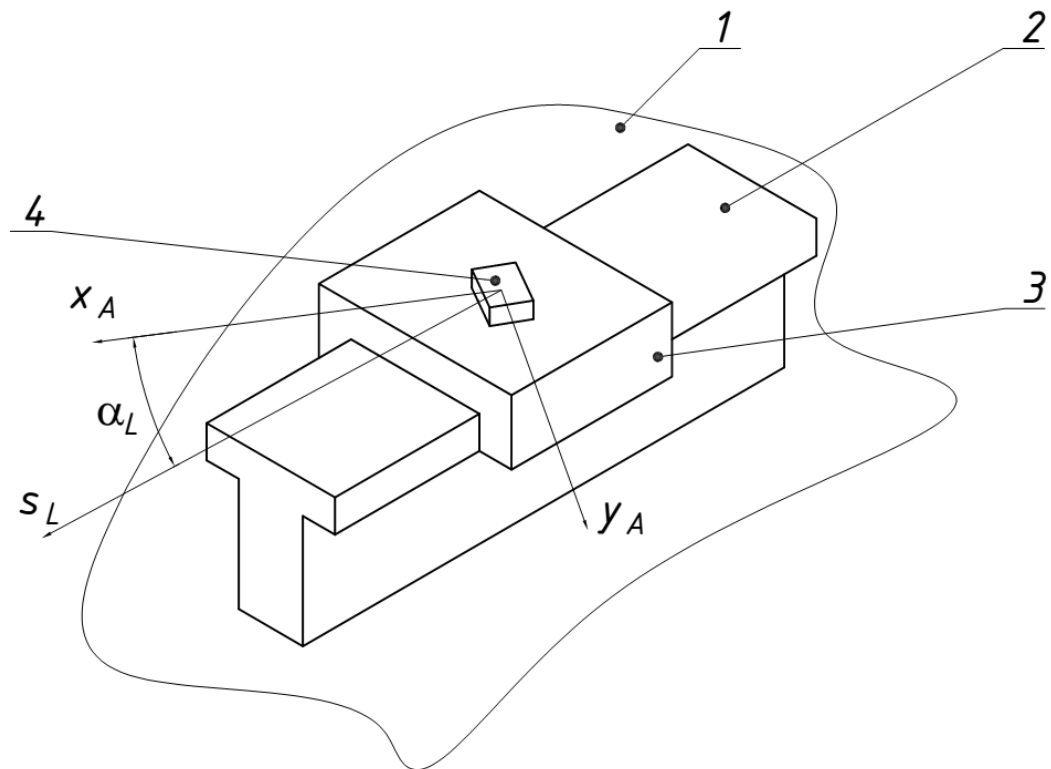


Рисунок 2.3 – Прискорення при прямолінійному русі акселерометра

Таким чином, співвідношення (2.1) дозволяють значно спростити конструкцію механічної частини лабораторного макету для дослідження характеристик двохкоординатних акселерометрів за рахунок зменшення кількості напрямних руху (рис. 2.4). Схема механічної частини удосконаленого лабораторного макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів (рис. 2.4) дозволяє створювати різні прискорення уздовж напрямків вимірювання x_A та y_A акселерометру, але є суттєво простішою за конструкцією, ніж показана вище схема (див. рис. 2.2). В запропонованій схемі (рис. 2.4) забезпечення досить великої площі рухомого лабораторного столу-3 не вимагатиме значного збільшення розмірів всієї конструкції, як в схемі, що показана вище на рис. 2.2. Виготовлення конструкції, що показано на рис. 2.4 є досить простою та може бути здійснене, навіть, за допомогою 3D-друку завдяки невеликим розмірам, що забезпечують достатню площу рухомого лабораторного столу-3. Експлуатація такої конструкції (рис. 2.4) буде досить не складною через наявність одного комплекту приводу уздовж напрямку s_L , який може мати нескладну конструкцію.



1 – нерухомий лабораторний стіл; 2 – напрямна руху уздовж осі s_L ;
 3 – рухомий лабораторний стіл; 4 – досліджуваний акселерометр
 Рисунок 2.4 – Напрямна для забезпечення прискорень у двох напрямках

Для обґрунтування запропонованого концептуального проекту (див. рис. 2.3 та рис. 2.4) удосконалення механічної частини лабораторного макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів виконаємо моделювання процесів, що відбуватимуться в лабораторному макеті із такою удосконаленою механічною частиною протягом експлуатації. Для моделювання використовуватимемо середовище Simulink системи MatLab [15, 16]; модель процесів, що відбуватимуться в лабораторному макеті для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів показано на рис. 2.5. Результати моделювання (рис. 2.6 та рис. 2.7) свідчать, що при прямолінійному русі акселерометру за рахунок його належного орієнтування уздовж напрямку руху утворюються прискорення у двох напрямках вимірювання акселерометру. Вимірюваний аналоговий сигнал представлено у вигляді напруг (рис. 2.6), що

несуть в собі інформацію про величини прискорень. Обробка таких вимірюваних сигналів (рис. 2.7) дозволить визначати прискорення, які є відповідними тестовому рівнозмінному прямолінійному руху.

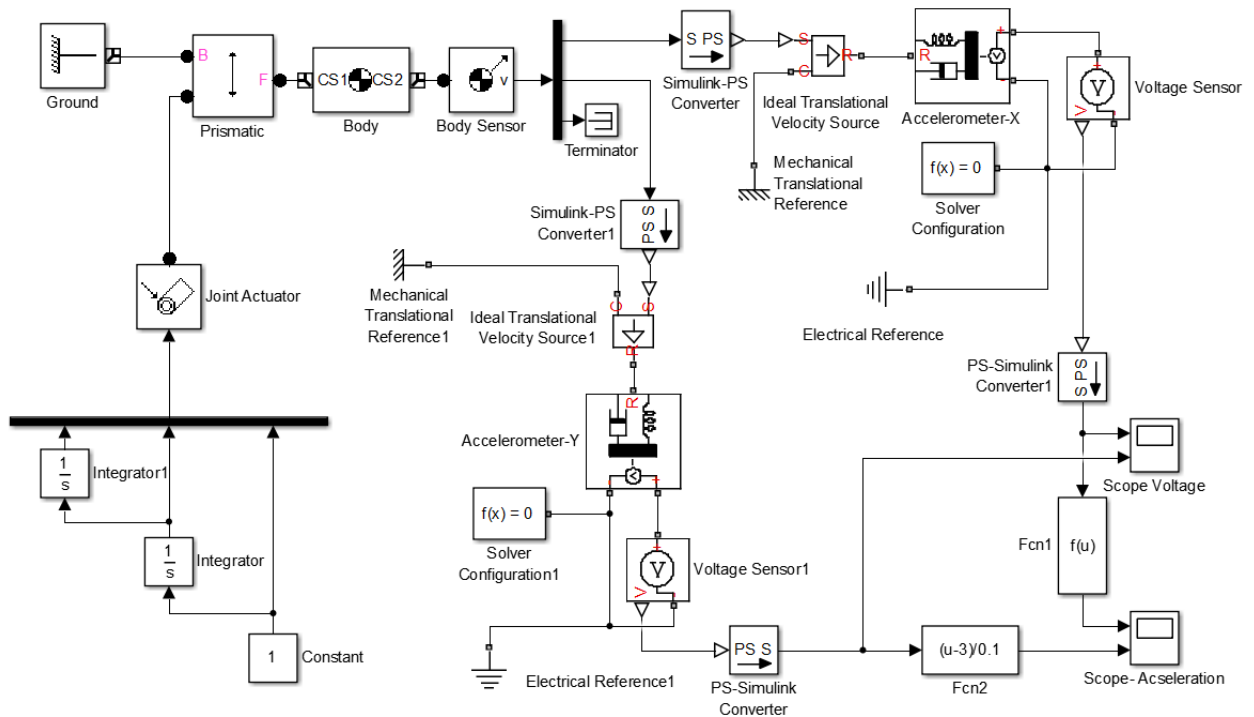


Рисунок 2.5 – Моделювання процесів в лабораторному макеті для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів

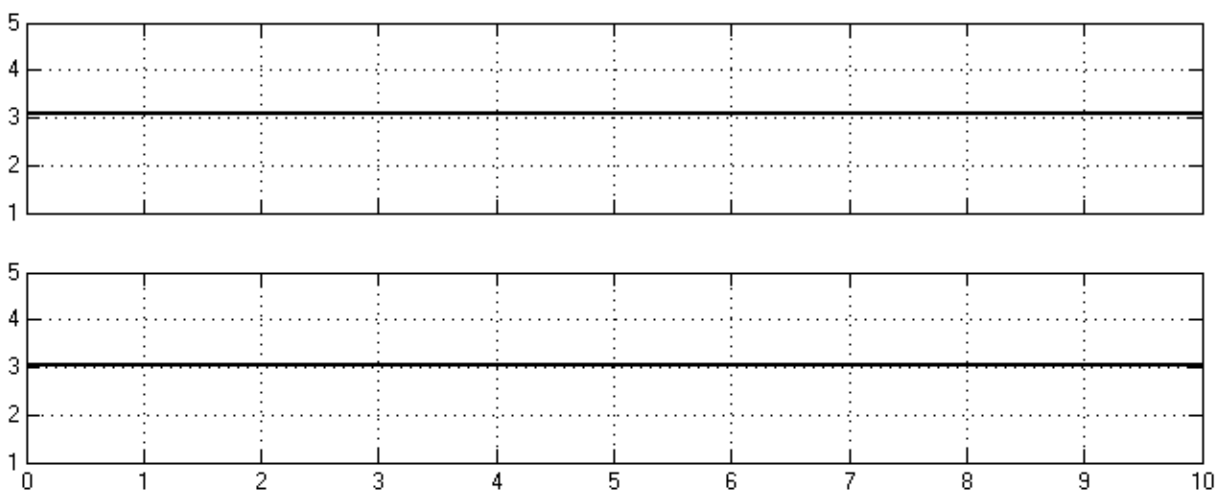


Рисунок 2.6 – Напряга (В), що представляють результат вимірювання у часі (сек) прискорень в напрямку x_A (угорі) та y_A (внизу) акселерометру, що рухається уздовж напрямку s_L зі сталим прискоренням 1 м/с^2 та орієнтований відносно цього напрямку під кутом $\alpha_L = 30^\circ$

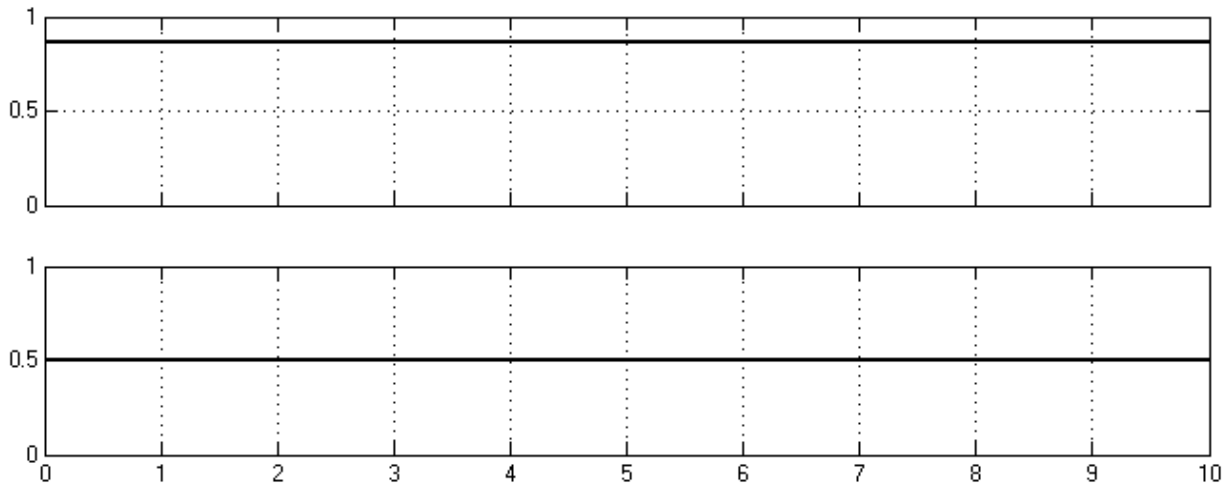


Рисунок 2.7 – Проекції прискорення (м/с^2), що одержані шляхом обробки вимірювань часі (сек) в напрямку x_A (угорі) та y_A (внизу) акселерометру, що рухається уздовж напрямку s_L зі сталим прискоренням 1 м/с^2 та орієнтований відносно цього напрямку під кутом $\alpha_L = 30^\circ$

Слід окремо підкреслити, що за рахунок вибору значень кута $\alpha_L = 0$ та $\alpha_L = \pi/2$ (див. рис. 2.3 та рис. 2.4) маємо можливість досліджувати характеристики двох-координатного акселерометру окремо в кожному із напрямків x_A та y_A вимірювання прискорення. Така можливість надає певної універсальності запропонованій схемі (див. рис. 2.3 та рис. 2.4) механічної частини із прямолінійним тестовим рухом лабораторного макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів.

2.3 Методика спрощених випробувань акселерометрів

Для вирішення деяких окремих питань, наприклад для визначення працездатності двох-координатного акселерометру, корисно використовувати методики спрощених випробувань (експрес-випробувань). Використання однієї напрямної для забезпечення тестових прискорень у двох напрямках (див. рис.

2.4) дозволяє запропонувати методику спрощених випробувань, що може бути корисним як для визначення працездатності конкретного виробу, так і для навчальних цілей з метою демонстрації слухачам характеристик двохкоординатних акселерометрів.

Відповідно до співвідношення (2.1) між складовими прискорення при прямолінійному русі, можемо записати, що:

$$\frac{\ddot{y}_A}{\ddot{x}_A} = \operatorname{tg} \alpha_L. \quad (2.2)$$

Внаслідок співвідношення (2.2) маємо:

$$\ddot{y}_A = \ddot{x}_A \operatorname{tg} \alpha_L. \quad (2.3)$$

Враховуємо, що інерційних акселерометр перетворює прискорення в електричне напруження наступним чином:

$$u_x = u_0 + k_u \ddot{x}_A, \quad u_y = u_0 + k_u \ddot{y}_A, \quad (2.4)$$

де u_x та u_y – електричні напруги сигналів акселерометру, що представляють прискорення \ddot{x}_A та \ddot{y}_A ;

u_0 – напруга, що відповідає нульовому прискоренню;

k_u – чутливість акселерометру.

За допомогою виразу (2.2) виключимо прискорення \ddot{y}_A із другого співвідношення (2.5):

$$u_y = u_0 + k_u \ddot{x}_A \operatorname{tg} \alpha_L. \quad (2.5)$$

За допомогою першого співвідношення (2.5) визначимо прискорення \ddot{x}_A :

$$\ddot{x}_A = \frac{u_x - u_0}{k_u}. \quad (2.6)$$

Далі із використанням виразу (2.6) виключимо прискорення \ddot{x}_A із співвідношення (2.5) та після нескладних перетворень представимо це співвідношення (2.5) у наступному вигляді:

$$u_y = u_0(1 - \operatorname{tg} \alpha_L) + k_u u_x. \quad (2.7)$$

Таким чином, як наслідок співвідношення (2.2) між вимірюваними прискореннями при прямолінійному русі двох-координатного акселерометру маємо лінійну залежність між напругами (2.4) сигналів вимірювання прискорень у вигляді (2.7) незалежно від закону руху акселерометру уздовж прямолінійної напрямної. Результат (2.7) може бути основою методики щодо спрощеного визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів. Для ілюстрації можливості використання результату (2.7) розглянемо далі моделювання (рис. 2.8) за допомогою середовища Simulink систем MatLab [15, 16] процесів, що відбуватимуться у лабораторному макеті при спрощених випробуваннях характеристик акселерометрів. В результаті моделювання отримуватимемо безпосередньо результати для напруг (2.4), які представлятимуть результати вимірювань прискорень \ddot{x}_A та \ddot{y}_A у віртуальному експерименті на математичній моделі, що показана на рис. 2.8, та експортуватимемо ці результати до середовища MatLab. Далі у середовищі MatLab використаємо одержані результати щодо напруг (2.4) для побудови графіку залежності між цими напругами (рис. 2.9), що є еквівалентом відповідних осцилографічних вимірювань. Результати моделювання процесів (рис. 2.9), що відбуваються у лабораторному макеті при спрощених випробуваннях характеристик акселерометрів, підтверджують встановлене теоретично співвідношення (2.7).

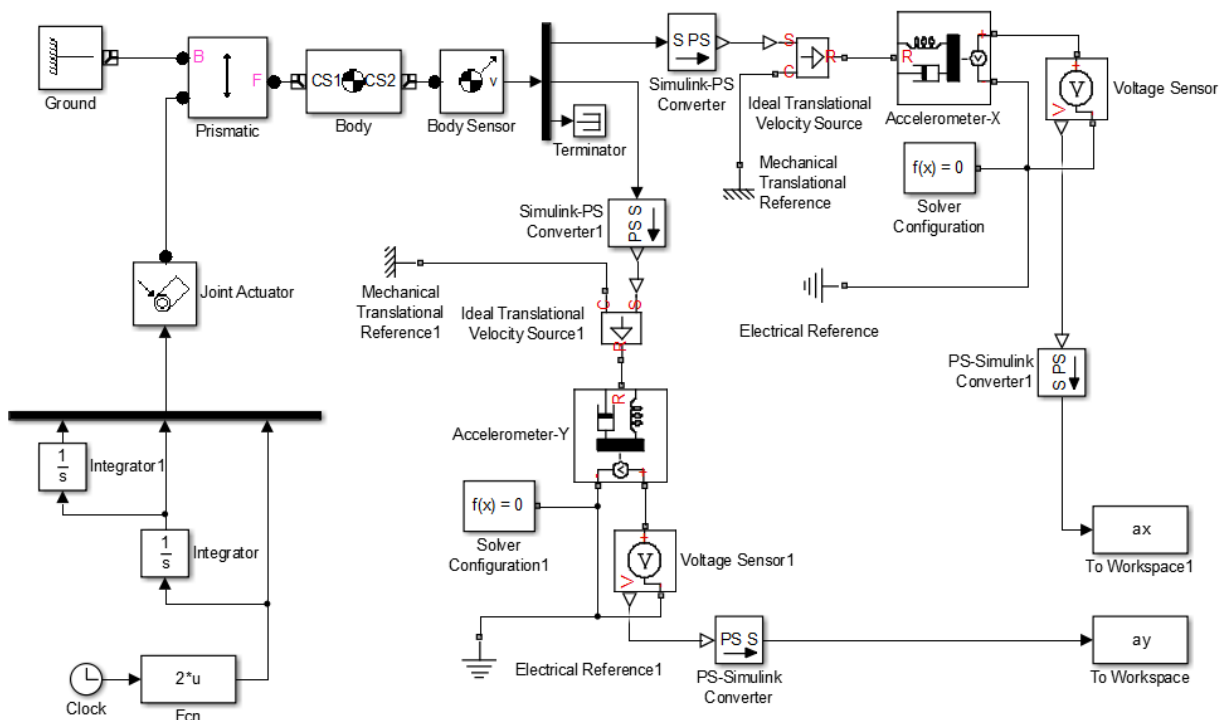


Рисунок 2.8 – Моделювання процесів в лабораторному макеті при спрощених випробуваннях двохкоординатних акселерометрів

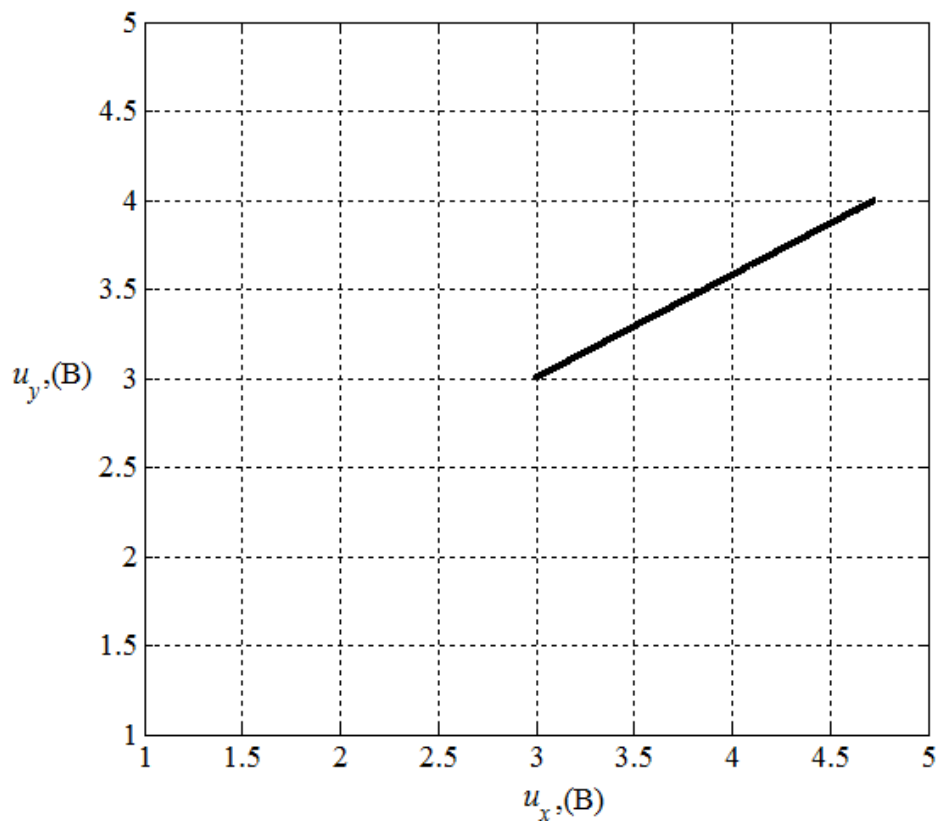


Рисунок 2.9 – Результати моделювання процесів в лабораторному макеті при спрощених випробуваннях двохкоординатних акселерометрів

Співвідношення (2.7) дозволяє за результатами одного нескладного вимірювання повністю визначити характеристики двох-координатного акселерометру, а саме напругу u_0 , що відповідає нульовому прискоренню та параметр k_u , що визначає чутливість акселерометру. В той же час, слід розуміти, що визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів по спрощеній схемі випробувань з використанням співвідношення (2.7) вимагає тестового руху із прискоренням, яке має змінюватися у часі, оскільки при рівнозмінному русі пряма, яка показана на рис. 2.9 виродиться в точку, що не дозволить скористатися співвідношенням (2.7). Таким чином, у подальшому слід досить ретельно розробити методику проведення спрощених вимірювань для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів із використанням співвідношення (2.7).

2.4 Методика випробувань щодо детальних досліджень акселерометрів

Розв'язування інженерних питань щодо можливостей використання двохкоординатних акселерометрів у відповідальному устаткуванні ґрунтується на результатах детальних досліджень їхніх характеристик. На відміну від спрощених випробувань, детальні дослідження характеристик двохкоординатних акселерометрів потребують значно більших обсягів вимірювань. Детальні дослідження характеристик двохкоординатних акселерометрів передбачають, насамперед, можливість точної оцінки похибки вимірювання прискорень, а також можливості щодо використання сигналів вимірювань акселерометру для подальшої обробки з метою визначення швидкості та поточного положення.

Найбільш повна та вичерпна оцінка похибки вимірювання прискорень двохкоординатним акселерометром можлива тільки шляхом порівняння вимірюваних значень із фактичними (еталонними) значеннями. Зрозуміло, що таке порівняння можливе за умов надійного вимірювання прискорень

незалежно від акселерометрів. Таке незалежне вимірювання прискорень вимагає значного допоміжного вимірювального устаткування, а також засобів автоматизації порівняння сигналів вимірних акселерометром та еталонних прискорень. Запропонована удосконалена механічна частина (див. рис. 2.4) із прямолінійним тестовим рухом дозволяє обмежитися незалежним вимірюванням тільки прискорення \ddot{s}_L (див. рис. 2.3), що значно спрощує будову відповідних вимірювальних пристроїв. Дійсно за виміряними прискореннями \ddot{x}_A , \ddot{y}_A та \ddot{s}_L при заданому куті α_L (рис. 2.3) можемо оцінити похибку вимірювання прискорень двохкоординатним акселерометром:

$$\varepsilon_x = \ddot{x}_A - \ddot{s}_L \cos \alpha_L, \quad \varepsilon_y = \ddot{y}_A - \ddot{s}_L \sin \alpha_L, \quad (2.8)$$

де ε_x та ε_y – абсолютні похибки вимірювання прискорень у напрямках x_A та y_A відповідно.

При детальних дослідженнях характеристик двохкоординатних акселерометрів слід забезпечити відображення та збереження даних про абсолютні похибки (2.8), що вимагатиме обладнання із відповідними метрологічними характеристиками. Розуміло, що визначення відносних похибок містить проблему невизначеності у випадку прискорення, що дорівнюватиме нулю. Слід зазначити, що окрім дослідження сигналів (2.8), які представлятимуть абсолютні похибки, для ілюстрації похибки можна використовувати техніку осцилографічних вимірювань [22, 23] сигналів, що представлятимуть прискорення \ddot{x}_A та $\ddot{s}_L \cos \alpha_L$, а також \ddot{y}_A та $\ddot{s}_L \sin \alpha_L$. Дійсно, оскільки у перелічених парах прискорення мають бути однакові, то результатом їхнього зображення на осцилографі буде пряма.

Для ілюстрації можливостей запропонованої удосконаленої механічної частини із тестовим переміщенням в одному напрямку (див. рис. 2.4) щодо детальних досліджень характеристик двохкоординатних акселерометрів виконаємо за допомогою середовища Simulink системи MatLab [15, 16]

моделювання процесів (рис. 2.10), що відбуватимуться в лабораторному макеті. В цій моделі показані результати моделювання процесу визначення абсолютних похибок (2.8). В цій моделі не конкретизовано спосіб визначення еталонного (фактичного) значення прискорення \ddot{x}_L , хоча, зрозуміло, можна запропонувати декілька таких способів. Зрозуміло, що формування сигналів, які представлятимуть абсолютні похибки (2.8), є типовою задачею та може бути реалізовано із використанням сучасних електронних перетворювачів інформації, які на схемі представлені у вигляді відповідних (динамічних) ланок. Результати моделювання (рис. 2.11) свідчать, що запропонована схема вимірювань дозволить здійснювати детальні дослідження характеристик двохкоординатних акселерометрів.

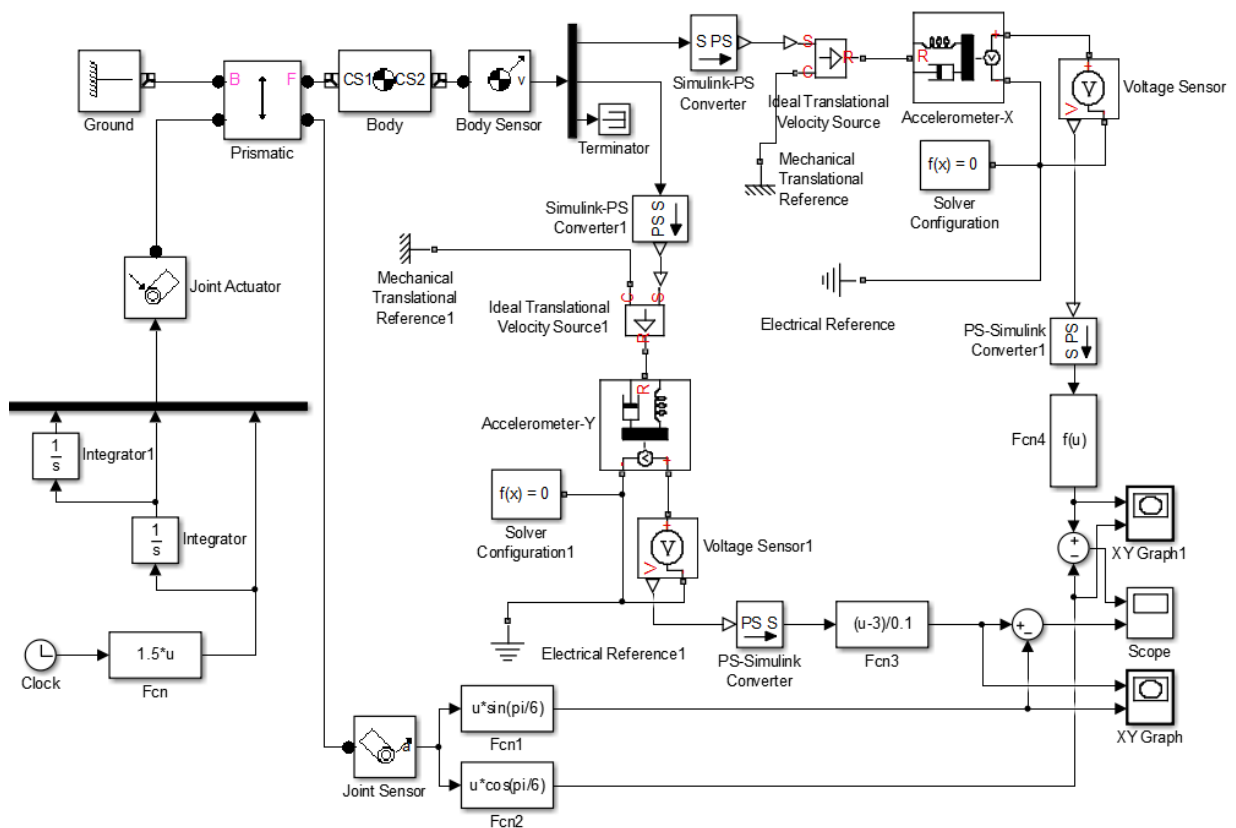


Рисунок 2.10 – Моделювання процесів, що відбуваються в лабораторному макеті при детальних дослідженнях двохкоординатних акселерометрів

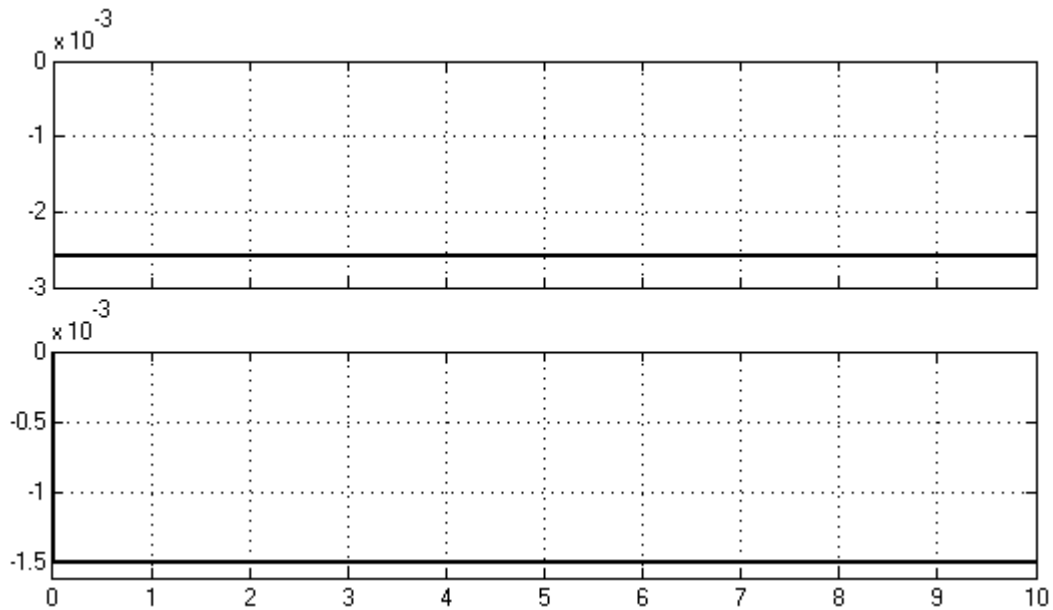


Рисунок 2.11 – Абсолютні похибки визначення прискорень у напрямку x_A (угорі) та y_A (унизу) при дослідженні двох-координатного акселерометру

Слід окремо підкреслити, що результати щодо похибок (2.8) визначення прискорень двохкоординатним акселерометром, які були показані вище на рис. 2.11, обумовлені обчислювальними неточностями при моделюванні процесів в лабораторному макеті. Дослідження впливу неточностей вимірювань прискорень на відображення результатів роботи лабораторного макету потребує спеціального дослідження в якому слід передбачити випадкові помилки, обмежені паспортними даними акселерометру.

В моделі, що показана вище (див. рис. 2.10) також передбачено можливість використання осцилографів для візуального відображення можливих похибок вимірювання прискорень \ddot{x}_A та \ddot{y}_A . Одержані результати свідчать, що використання осцилографів може бути неефективним у випадку високої точності вимірювань, оскільки невеликі похибки не будуть помітними в масштабі екрану осцилографу, який буде показувати прямолінійний відрізок. В той же час, при наявності несправності акселерометру, що вестиме до значних похибок вимірювань осцилографічний метод, можливо буде корисним, оскільки наочно покаже зміну. Для з'ясування корисності використання осцилографів щодо дослідження характеристик двохкоординатних

акселерометрів слід врахувати в моделі лабораторного макету випадкові похибки вимірювання прискорення, що обмежені характеристиками досліджуваного акселерометру. Моделювання несправності акселерометрів можна здійснювати шляхом підвищення допустимої випадкової помилки вимірювання прискорення.

2.5 Висновки до 2 розділу

У другому розділі запропонований проект оптимальної удосконаленої конструкції механічної частини лабораторного макету та представлений у вигляді ескізів та креслень за допомогою системи AutoCAD.

Також розроблені ескізні (концептуальні) проекти апаратної частини за допомогою середовища Simulink системи MatLab та методики їх використання для виконання швидких та детальних випробувань для дослідження характеристик акселерометра.

3 РОЗРОБКА ПРОЕКТУ УДОСКОНАЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТУ

3.1 Загальна будова удосконаленого лабораторного макету

Результати досліджень щодо обґрунтування напрямів удосконалення лабораторного макету, які розглянуті вище у розд. 2, дозволяють сформулювати загальні принципи будови удосконаленого лабораторного макету для визначення та дослідження характеристик двохкоординатних акселерометрів:

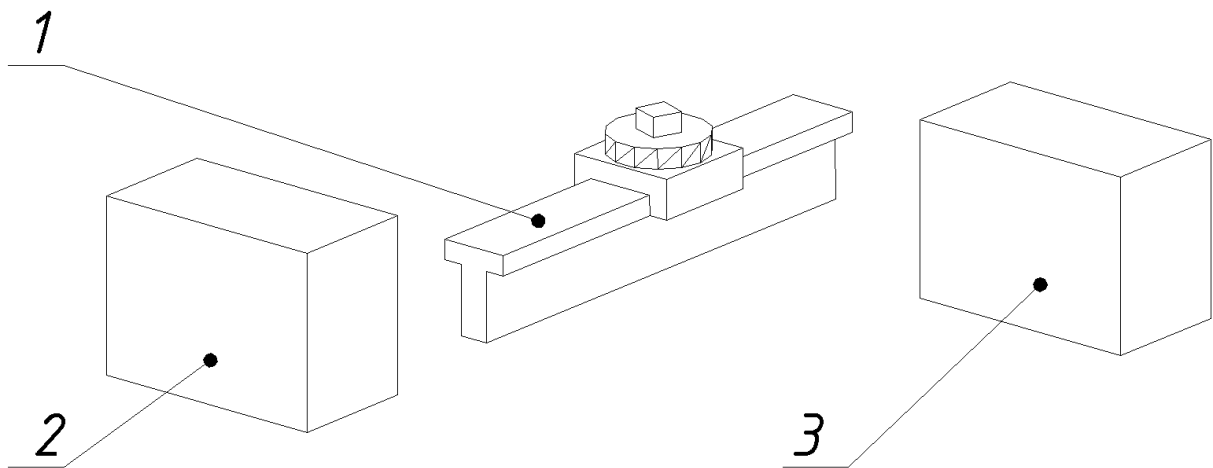
– механічна частина лабораторного макету має забезпечувати можливість створення тестового (випробувального) прямолінійного руху акселерометру у горизонтальній площині та орієнтацію у горизонтальній площині напрямків вимірювання акселерометру відносно напрямку тестового руху;

– вимірювально-інформаційна система лабораторного макету має складатися із двох незалежних підсистем: відносно нескладної підсистеми експрес-випробувань для визначення працездатності та демонстрації властивостей акселерометрів, а також більш складної підсистеми детальних досліджень та підтвердження паспортних характеристик акселерометрів;

– вимірювально-інформаційна підсистема експрес-випробувань лабораторного макету має будуватися із використанням відносно недорогих приладів, що мають забезпечувати наочне представлення результатів вимірювань із точністю не більше, ніж точність випробуваних акселерометрів;

– вимірювально-інформаційна підсистема лабораторного макету, що призначена для детальних досліджень акселерометрів, має будуватися із використанням приладів, які мають забезпечуватимуть точність, що помітно перевищує точність випробуваних акселерометрів, а також має забезпечити квантування та збереження результатів вимірювань у цифровій формі.

З урахуванням означених вище обставин, загальна будова удосконаленого макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів може мати вигляд, який умовно показаний на рис. 3.1. Передбачається, що обладнання для забезпечення детальних досліджень (поз. 3 на рис. 3.1) може бути відсутньою через високу вартість необхідних для його комплектування приладів.



1 – механічна частина; 2 – шафа керування експрес-випробуваннями;
3 – шафа керування детальними дослідженнями (опціональне обладнання)

Рисунок 3.1 – Загальна будова удосконаленого лабораторного макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів

Далі розглянемо проблемні питання щодо проектування окремих складових удосконаленого лабораторного макету (див. рис. 3.1) визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів.

3.2 Складові механічної частини

Механічна частина (поз. 1, див. рис. 3.1) є однією із найголовніших складових удосконаленого лабораторного макету, яка забезпечує розширення можливостей при спрощеній конструкції за рахунок забезпечення тільки прямолінійного руху та орієнтації досліджуваного акселерометру відносно

напрямку тестового руху (див. підрозд. 2.2). У відповідності із розглянутим вище у підрозд. 2.2 обґрунтуванням механічна частина має забезпечувати наступні функції: надійну фіксацію досліджуваного акселерометру, поворот досліджуваного акселерометру відносно вертикальної осі та фіксацію в обраному напрямку, а також поступальний рух закріпленого акселерометру уздовж напрямних. Розглянемо далі проблеми що пов'язані із реалізацією перелічених функцій.

3.2.1 Надійна фіксація досліджуваного акселерометру не представляє істотних труднощів, оскільки сьогодні відомо різноманіття відповідних конструкцій, що використовуються, наприклад, в металорізальних верстатах [18–21] та в робото-технічних пристроях [24, 25]. Вибір конструкції вузла закріплення може бути різноманітним та істотно залежить лише від обмежень щодо можливих розмірів досліджуваних акселерометрів з урахуванням необхідності їхнього підключення до вимірювальних систем та систем живлення лабораторного макету. З урахуванням означених обставин для лабораторного макету слід використовувати максимально простішу конструкцію, як, наприклад, що показана на рис. 3.2. В цій конструкції фіксація досліджуваного акселерометру здійснюється за допомогою притискувальної планки, що фіксується гвинтами. Зрозуміло, що відстань b між отворами для гвинтів обмежує один із розмірів, а саме – розмір B досліджуваного акселерометру (рис. 3.2), тобто маємо обмеження

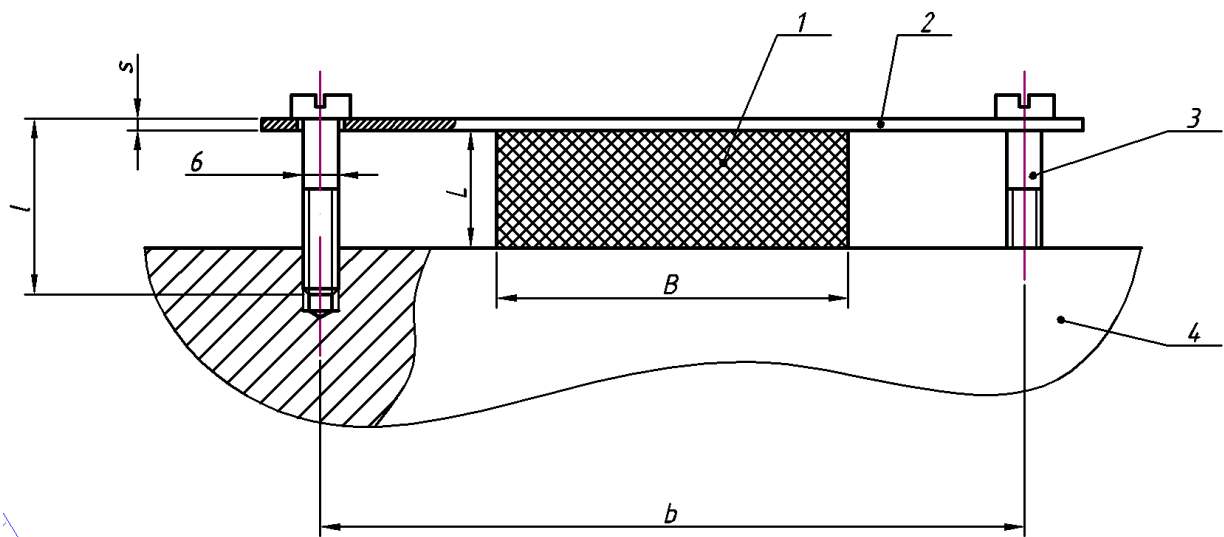
$$B < b + 10 \text{ мм.} \quad (3.1)$$

Довжина l гвинта має підбиратися у залежності від розміру L досліджуваного акселерометру (рис. 3.2) із умови

$$l \geq L + 5 \text{ мм.} \quad (3.2)$$

Розміри вузла фіксації досліджуваного акселерометру у напрямку перпендикулярно площині рис. 3.2 мають бути такого ж порядку, що і розміри у площині цього рисунку.

Оскільки при експлуатації вузла фіксації досліджуваного акселерометру значні механічні навантаження відсутні, то розміри цього вузла (рис. 3.2) мають визначатися виключно із міркувань функціональності.



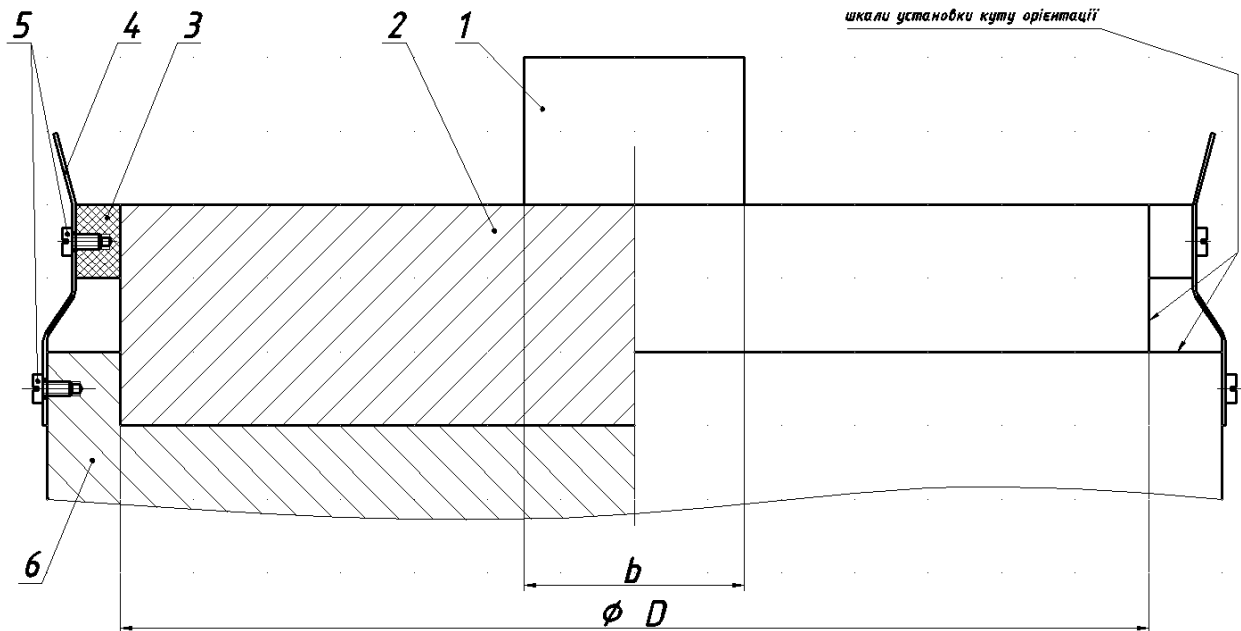
1 – акселерометр; 2 – притискувальна пластинка; 3 – гвинт; 4 – рухома основа

Рисунок 3.2 – Конструкція вузла фіксації досліджуваного акселерометру

3.2.2 Можливість повороту досліджуваного акселерометру навколо вертикальної осі для його орієнтації відносно напрямку прямолінійного тестового (випробувального) прямолінійного руху у (див. рис. 2.3 та рис. 2.4) є принциповою для забезпечення розширеного функціоналу удосконаленого лабораторного макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів. Для забезпечення такої можливості пропонується закріплювати досліджуваний акселерометр (див. рис. 3.2) на обертальній платформі у вигляді круглого диску діаметр D такого має задовольняти умові (рис. 3.3)

$$D \geq b + 20 \text{ мм.} \quad (3.3)$$

Фіксацію такої обертальної платформи пропонується здійснювати за рахунок її установки у заглибленні та обтискування (рис. 3.3).



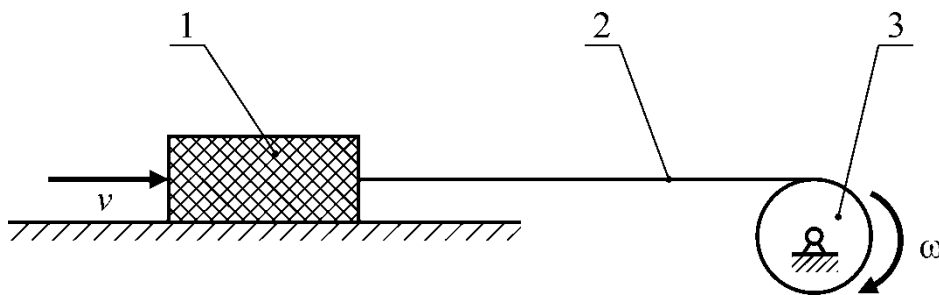
- 1 – область для фіксації акселерометру; 2 – обертальна платформа;
 3 – фіксуючий елемент; 4 – пружний елемент; 5 – гвинти;
 6 – рухомий лабораторний стіл

Рисунок 3.3 – Конструкція вузлу забезпечує повороту досліджуваного акселерометра навколо вертикальної осі

3.2.3 Забезпечення поступального прямолінійного руху досліджуваного акселерометру необхідно для утворення тестового прискорення і є основною функцією механічної частини в проекті удосконалення лабораторного макету (див. рис. 2.3). Відомо багато способів [26], що дозволяють забезпечити поступальний прямолінійний рух, які широко використовуються в техніці, наприклад в металорізальних верстатах [18–21] та в робото-технічних системах [24, 25]. Зрозуміло, що привідним елементом у більшості технічних систем виступає елемент, що обертається навколо нерухомої осі, як, наприклад, ротор електродвигуна, турбіни, або колінчастий вал двигуна внутрішнього згорання, тому забезпечення поступального руху в техніці зазвичай зводиться до

перетворення обертання навколо нерухомої осі приводного елемента до поступального прямолінійного руху елемента [18–21, 24–26].

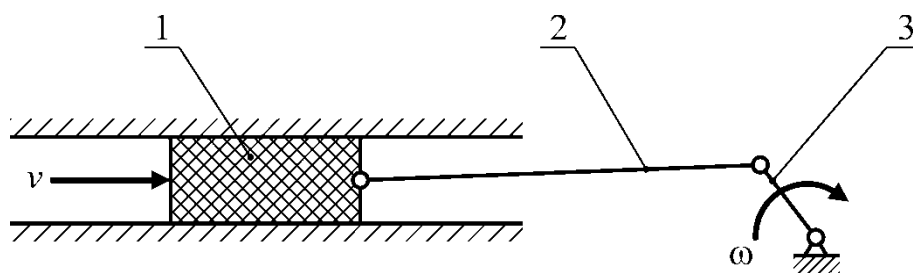
Недоліком канатного приводу (рис. 3.4) є необхідність додаткового комплексу устаткування для забезпечення реверсу руху через гнучкість канату, але перевагою такого приводу є максимально можлива простота його конструкції.



1 – рухомий лабораторний стіл; 2 – проміжний канат, 3 – приводний барабан

Рисунок 3.4 – Схема канатного приводу для забезпечення прямолінійного руху в лабораторному макеті для визначення характеристик акселерометрів

Недоліком шарнірного приводу (рис. 3.5) є необхідність фіксації поступально рухомого елемента у декількох напрямках, а також складна конструкція; перевага полягає у можливості реверсу руху.

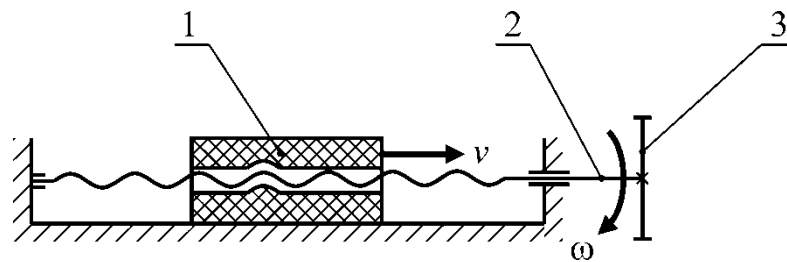


1 – рухомий лабораторний стіл; 2 – шатун, 3 – приводний кривошип

Рисунок 3.5 – Схема шарнірного приводу для забезпечення прямолінійного руху в лабораторному макеті для визначення характеристик акселерометрів

Гвинтовий привід (рис. 3.6) є досить розповсюдженим у металорізальних верстатах [18–21] та в маніпуляторах роботів [24, 25]. Такий привід забезпечує

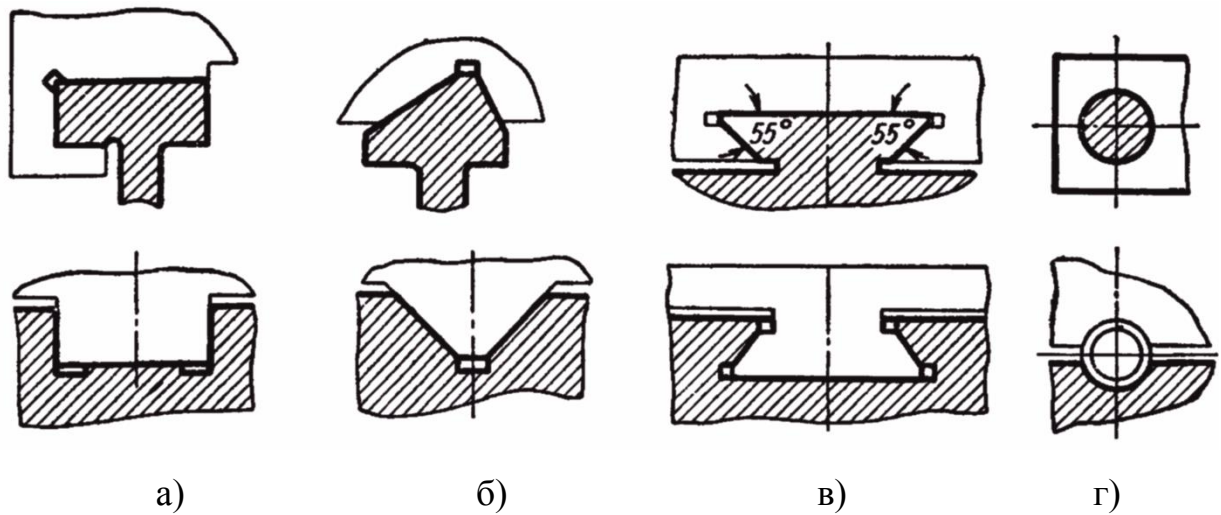
можливість реверсу руху та конструктивно є відносно нескладним для умов машинного виробництва.



1 – рухомий лабораторний стіл; 2 – гвинт, 3 – приводне колесо

Рисунок 3.6 – Схема гвинтового приводу для забезпечення прямолінійного руху в лабораторному макеті для визначення характеристик акселерометрів

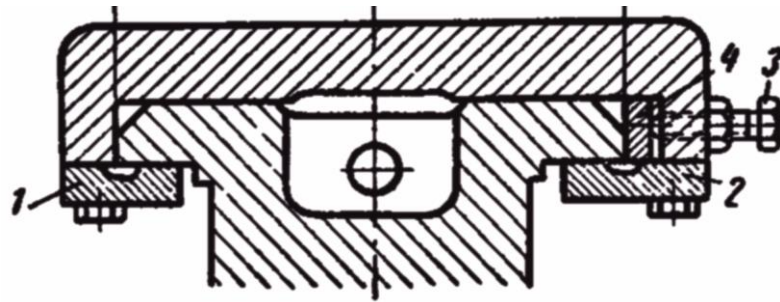
3.2.4 Прямолінійність руху традиційно забезпечується за допомогою спеціальних напрямних [18–21, 24–26], які не дозволяють рухомому елементу переміщатися у напрямках, перпендикулярних напрямку прямолінійного руху. Найбільш простими за конструкцією і тому бажаними для удосконаленої механічної частини лабораторного макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів є напрямні ковзання, в яких прямолінійний рух здійснюється при безпосередньому контакті рухомого тіла та напрямних. Направні ковзання відрізняються формою (рис. 3.7). Вибір форми напрямних здійснюється з урахуванням умов експлуатації, що визначаються зовнішніми навантаженнями, необхідністю використовувати мастила, можливістю забруднення та іншими факторами [18–21].



а) плоскі; б) призматичні; в) хвіст ластівки; г) циліндричні

Рисунок 3.7 – Форми напрямних ковзання, що традиційно використовуються в металорізальних верстатах [19]

В лабораторному макеті, що призначений для демонстрації та визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів відсутні помітні механічні навантаження, швидкості руху є відносно невисокими, використання мастила не передбачається, тому основними факторами, які слід враховувати при конструюванні напрямних прямолінійного руху є максимальна простота конструкції та зручність експлуатації. З урахуванням означених обставин, для механічної частини лабораторного макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів рекомендується використовувати плоскі напрямні (рис. 3.7, а), які мають найпростішу конструкцію. При цьому слід враховувати досвід експлуатації плоских напрямних, наприклад в металорізальних верстатах [18, 19] та передбачити можливість їхнього регулювання, як показано на рис. 3.8.



1, 2 – притискувальні-регулюючі планки; 3 – гвинт; 4 – регулююча планка
Рисунок 3.8 – Приклад конструкцій регулювання плоских напрямних [19]

3.2.5 Закріплення напрямних традиційно здійснюється за допомогою корпусних деталей: напрямні закріплюються на корпусних деталях, а корпусні деталі закріплюються на фундаменті, або на спеціальному столі; для конструювання корпусних деталей механічної частини лабораторного стенду для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів доцільно використовувати досвід конструювання корпусних деталей металорізальних верстатів [18, 19]. Слід розуміти, що напрямні можуть закріплюватися на корпусних деталях за допомогою розбірних та нерозбірних з'єднань (рис. 3.9), або виготовлятися суцільно із корпусними деталями (рис. 3.10). Накладні напрямні, що закріплені за допомогою розбірних з'єднань (рис. 3.9, а та б), підвищують ремонтпридатність виробу.

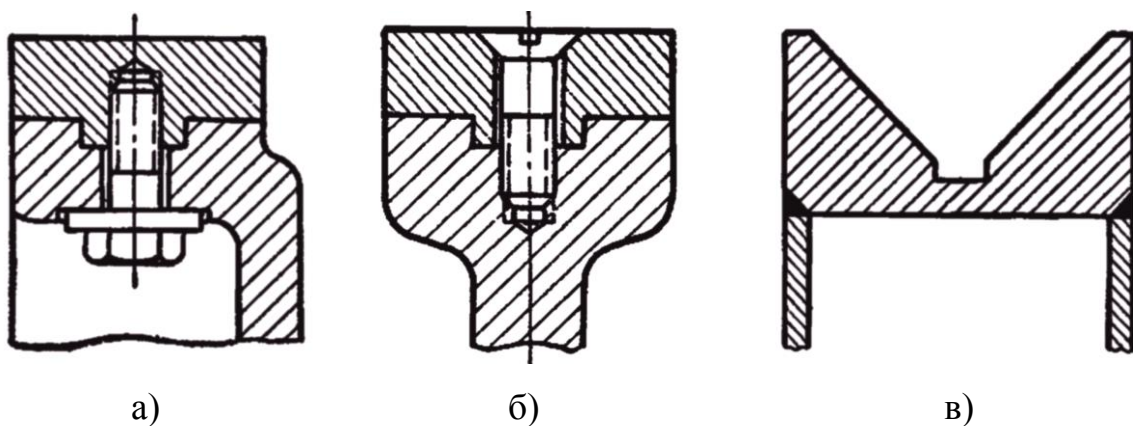
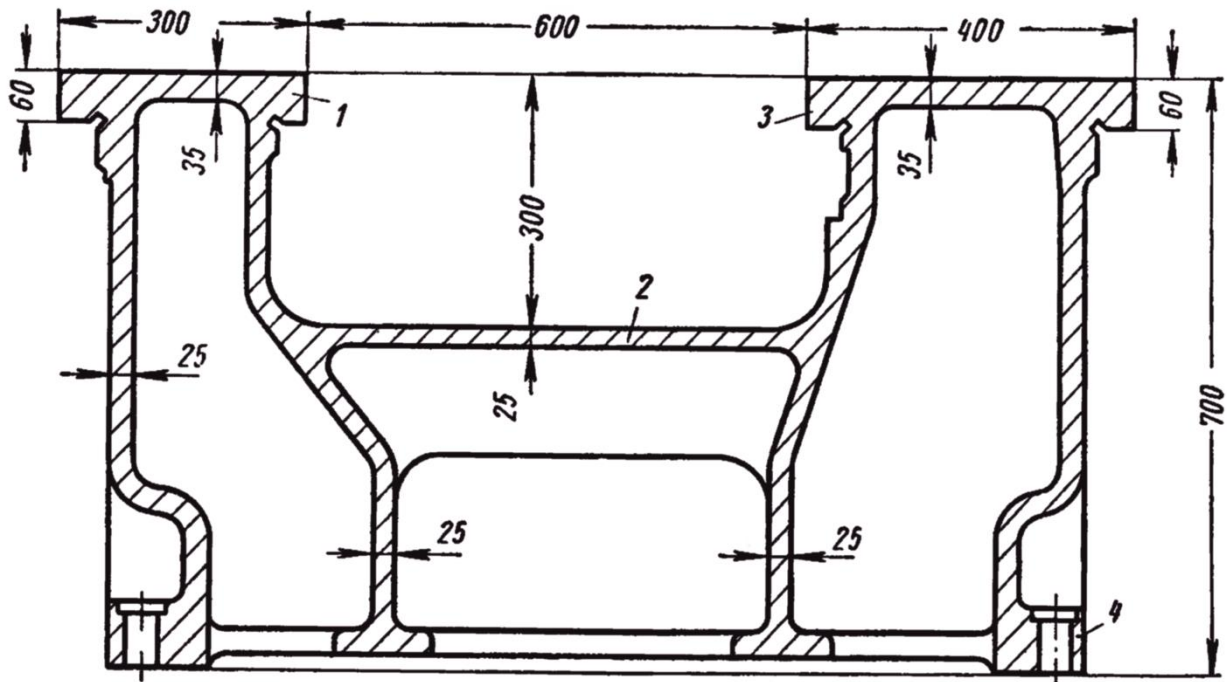


Рисунок 3.9 – Виконання накладних (а, б) та приварених (в) напрямних для металорізальних верстатів [19]

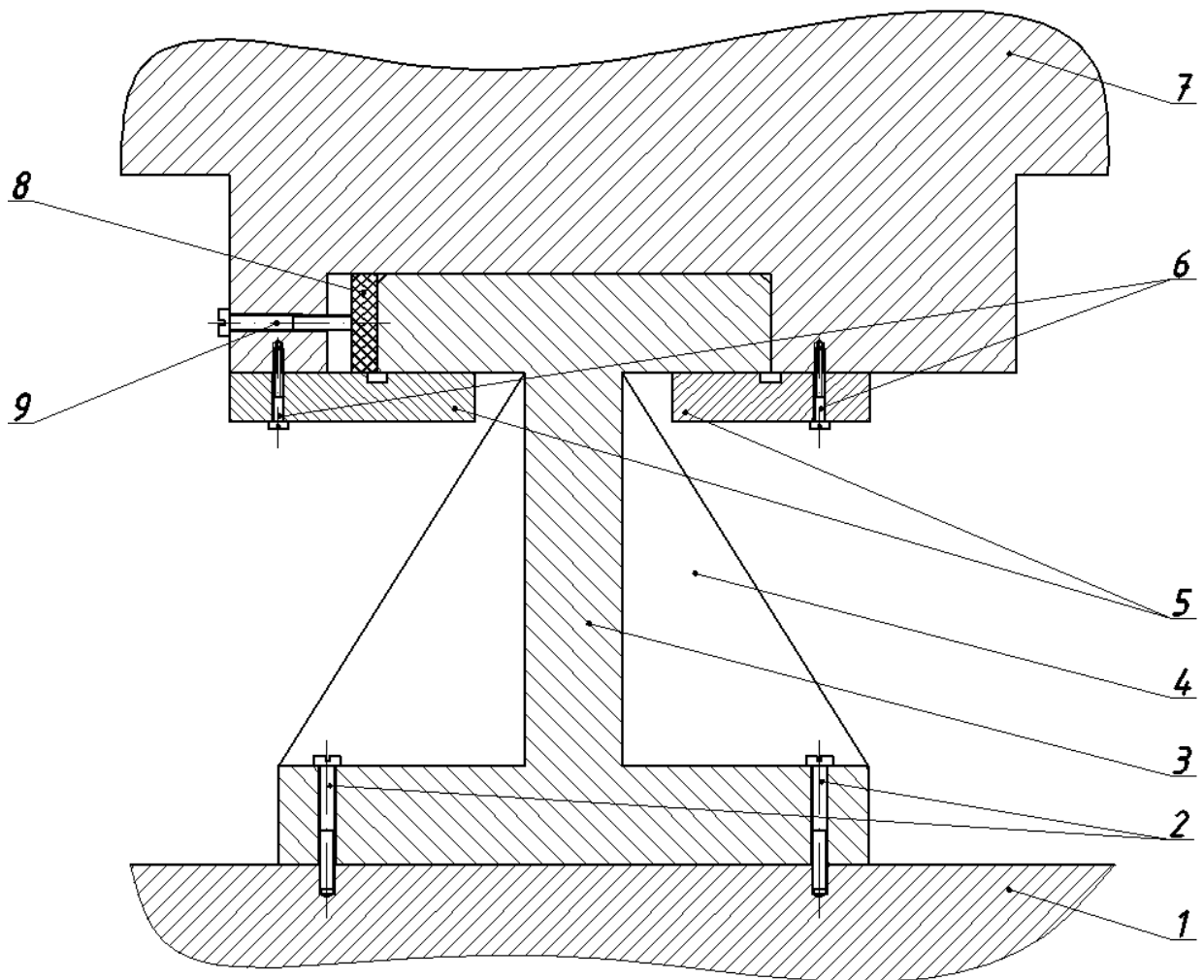


1, 3 – напрямні; 2 – діафрагма; 4 – опорний бурт для установки на фундаменті

Рисунок 3.10 – Переріз корпусної деталі (станіни) токарного верстату [19]

При проектуванні корпусних деталей слід враховувати, що усі розглянуті схеми приводів прямолінійного руху (див. рис. 3.4–3.6) мають забезпечувати наявність певного простору уздовж напрямних для розташування проміжного приводного елемента (канату, шатуна або гвинта). З урахуванням невисоких експлуатаційних навантажень для спрощення виготовлення та зменшення вартості лабораторного макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів пропонується передбачити лише одну напрямну. Питання щодо використання накладних напрямних неможливо обґрунтовано вирішити через відсутність даних щодо можливого зношування напрямних при експлуатації лабораторного макету для визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів; зрозуміло, що зношення залежить від інтенсивності експлуатації, яка априорі невідома. З урахуванням означених обставин пропонується використовувати напрямну, що виготовляються заодно із корпусною деталлю, але передбачити також варіант конструкції із накладною напрямною.

З урахуванням перелічених обставин, запропоновано конструкцію корпусної деталі із плоскою напрямною та вузла з'єднання напрямної із рухомими лабораторним столом, в якому передбачено можливість регулювання зазорів (рис. 3.11). Через невисокі експлуатаційні навантаження усі елементи конструкції окрім гвинтів (рис. 3.11) можна виготовляти з використанням технологій 3D-друку.



- 1 – фундамент; 2 – фундаментні гвинти; 3 – корпусна деталь з напрямною;
 4 – ребро жорсткості корпусної деталі; 5 – притискувальні планки
 6 – гвинти; 7 – рухомий лабораторний стіл; 8 – регулююча планка;
 9 – регулюючий гвинт

Рисунок 3.11 – Конструкція корпусної деталі із напрямною та вузла з'єднання із рухомими лабораторним столом

3.3 Інформаційно-вимірвальна система спрощених випробувань

Забезпечення можливості щодо виконання спрощених випробувань, що розглянуті вище у підрозд. 2.3, є дуже важливим для забезпечення функціональності удосконаленого лабораторного макету для демонстрації та визначення характеристик двохкоординатних акселерометрів. Спрощені випробування мають дозволити визначати характеристики акселерометрів без використання вимірвальних пристроїв високої точності та вартості та мають бути обов'язково передбачені як основний режим роботи удосконаленого лабораторного макету при його експлуатації.

В основі спрощених випробувань з використанням удосконаленого лабораторного макету використовується співвідношення (2.1) між складовими прискорення (див. рис. 2.3), яке дозволяє наочно представляти результат випробування за допомогою осцилографічних приладів (див. рис. 2.9). В той же час, така методика (див. рис. 2.8) не буде працювати у випадку рівноприскореного руху, оскільки в цьому випадку результати вимірювань на екрані осцилографа буде відображатися однією точкою. Для виправлення цього недоліку в інформаційно-вимірвальній системі спрощених випробувань пропонується використовувати амплітудну модуляцію результатів вимірювань пилкоподібним сигналом (рис. 3.12). Це дозволить наочно спостерігати результати вимірювань прискорень у вигляді прямої, яка нахилена під кутом α_L до горизонтальної осі осцилографа (рис. 3.13). В моделі на рис. 3.12 такий результат спостерігається шляхом визначення та обробки результатів щодо вимірюваних прискорень, тобто потребує аналого-цифрових перетворювачів та передбачає використання комп'ютеру. прискорень, але не безпосередньо на напруженнях вимірюваних прискорень, що створює акселерометр. Аналогічний результат можна також одержати шляхом відповідних перетворень напружень з використанням спеціально побудованих електричних кіл.

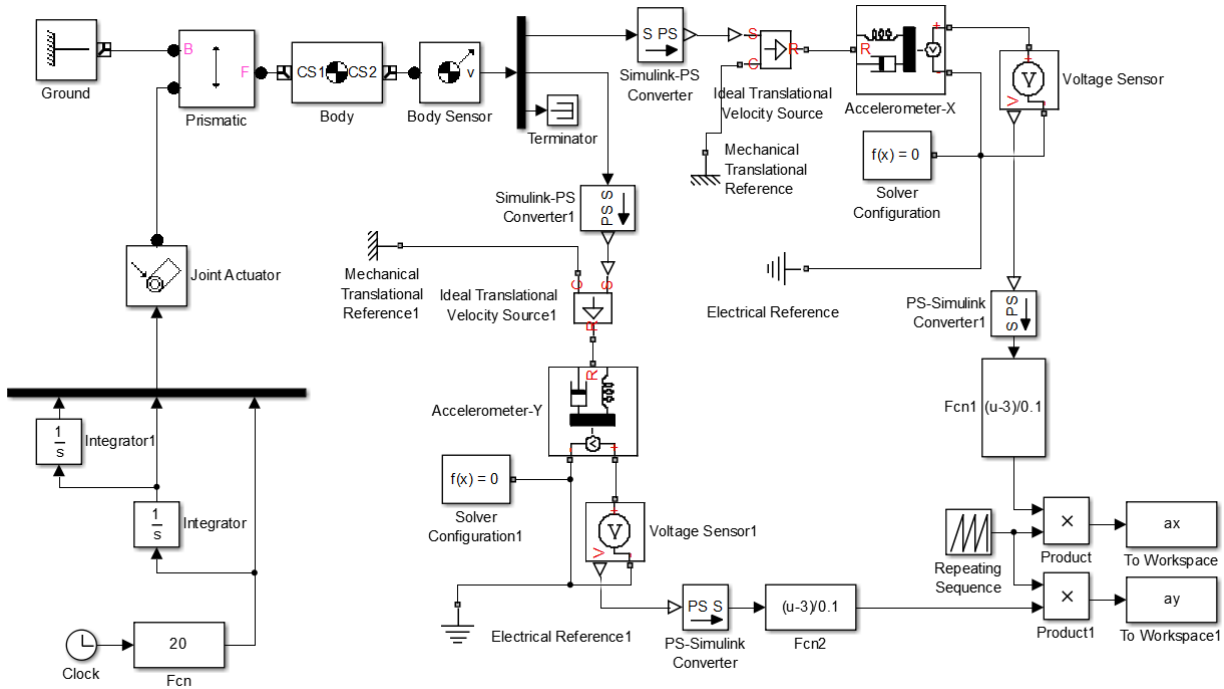


Рисунок 3.12 – Схема використання амплітудної модуляції пілкоподібним сигналом для спрощених випробувань акселерометрів

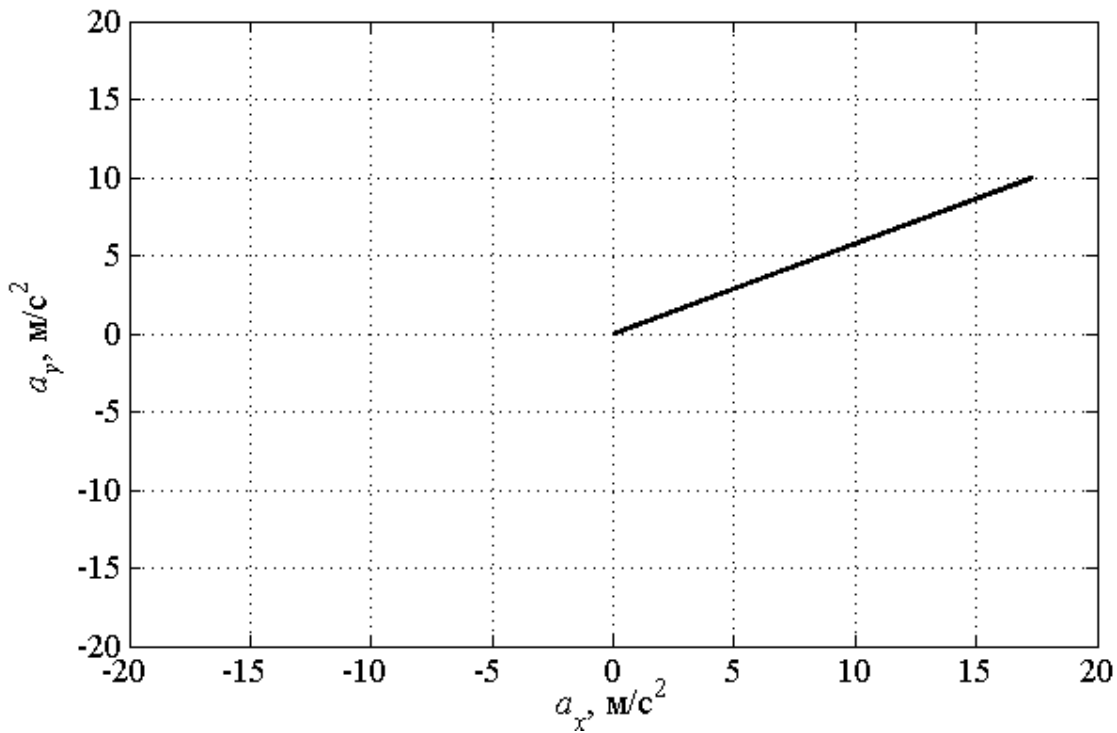


Рисунок 3.13 – Результати використання амплітудної модуляції пілкоподібним сигналом для спрощених випробувань акселерометрів

Зрозуміло, що при натурних вимірюваннях внаслідок похибок вимірювальних приладів та досліджуваного акселерометру результат не буде виглядати точно як пряма (див. рис. 3.13). Для дослідження впливу відносної похибки приладів на результат вимірювання в якості джерела похибок використовуємо генератор випадкової нормальної величини (рис. 3.14). Результати моделювання (рис. 3.15) випробувань із похибками приладів свідчать, що результати розташовані навколо прямої (див. рис. 3.13), яка відповідає результату без похибок вимірювань; розкид результатів навколо цієї прямої збільшується при збільшенні відносної похибки вимірювань. Одержані результати (рис. 3.15) свідчать про можливість непрямо оцінювати похибку вимірювань прискорень за розкидом даних відносно теоретичної прямої (див. рис. 3.13), яка відповідає вимірюванням без похибок.

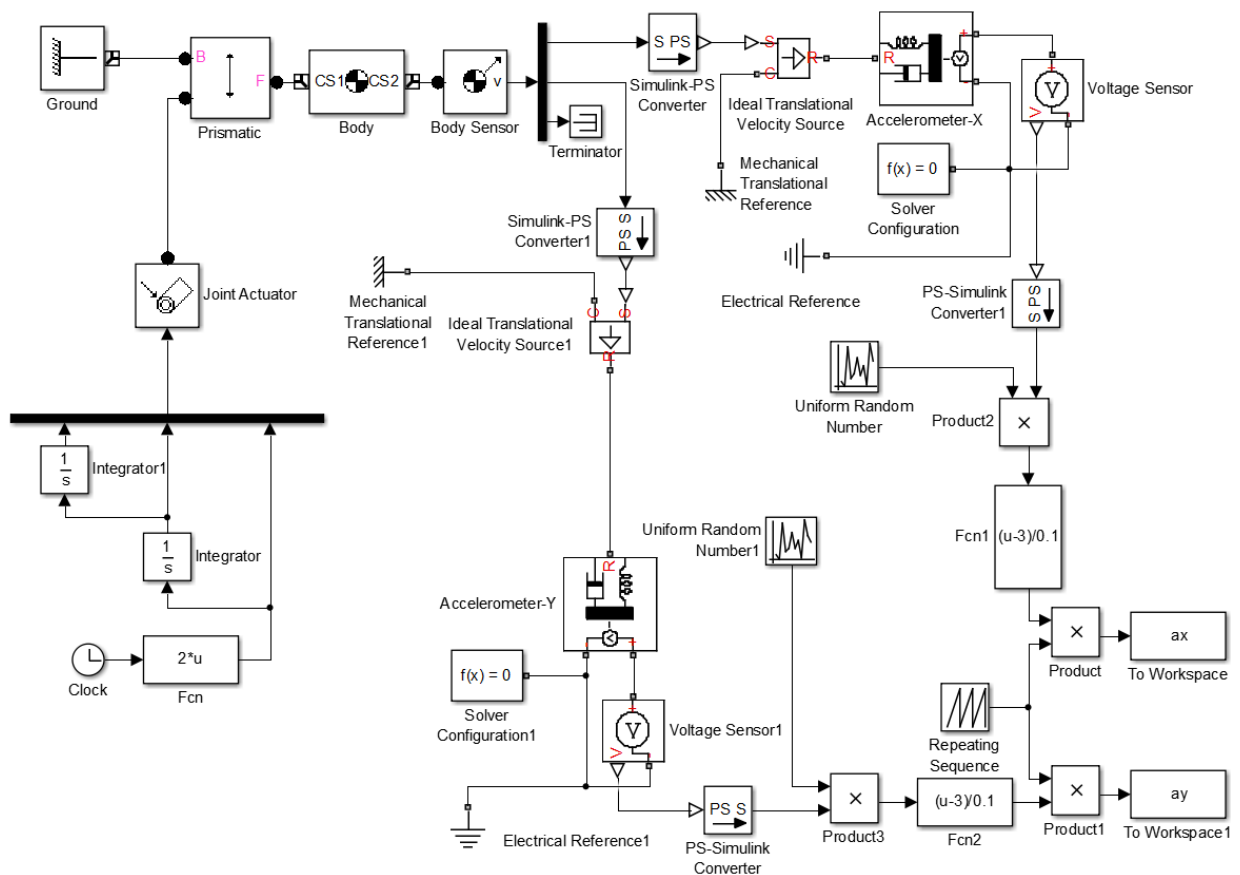


Рисунок 3.14 – Схема врахування відносної похибки вимірювання приладів на результат випробувань акселерометрів

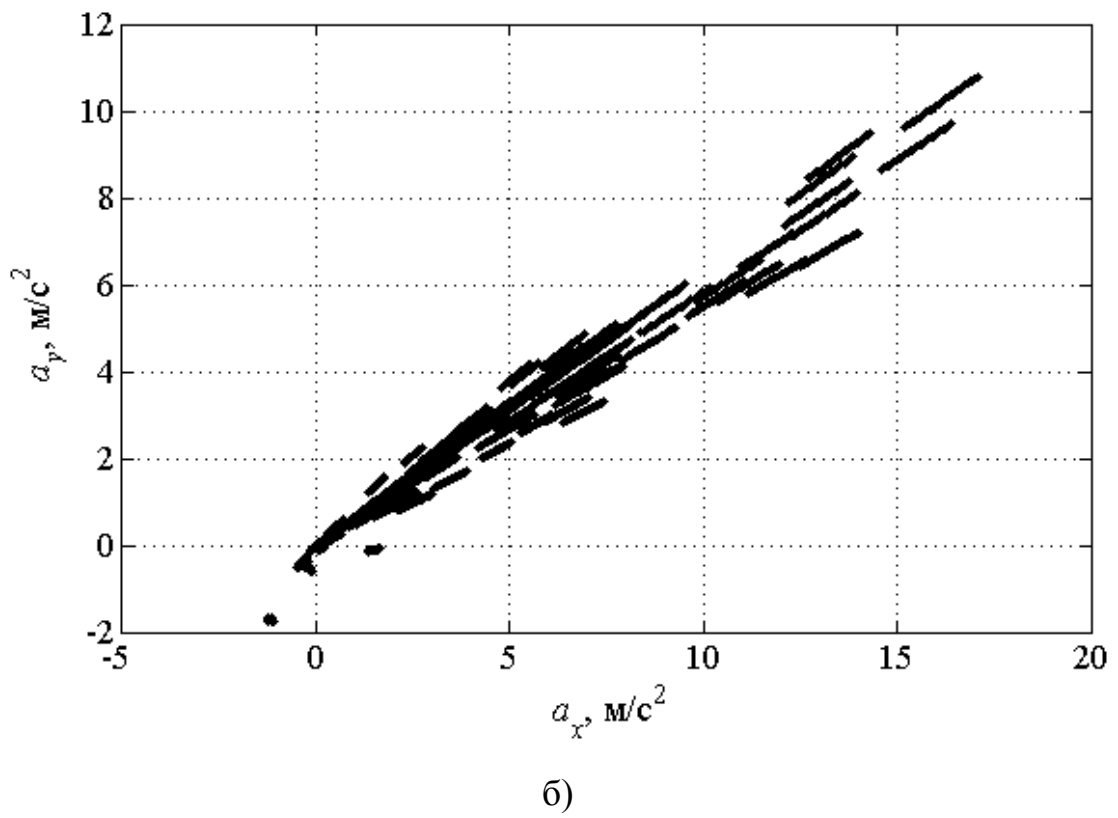
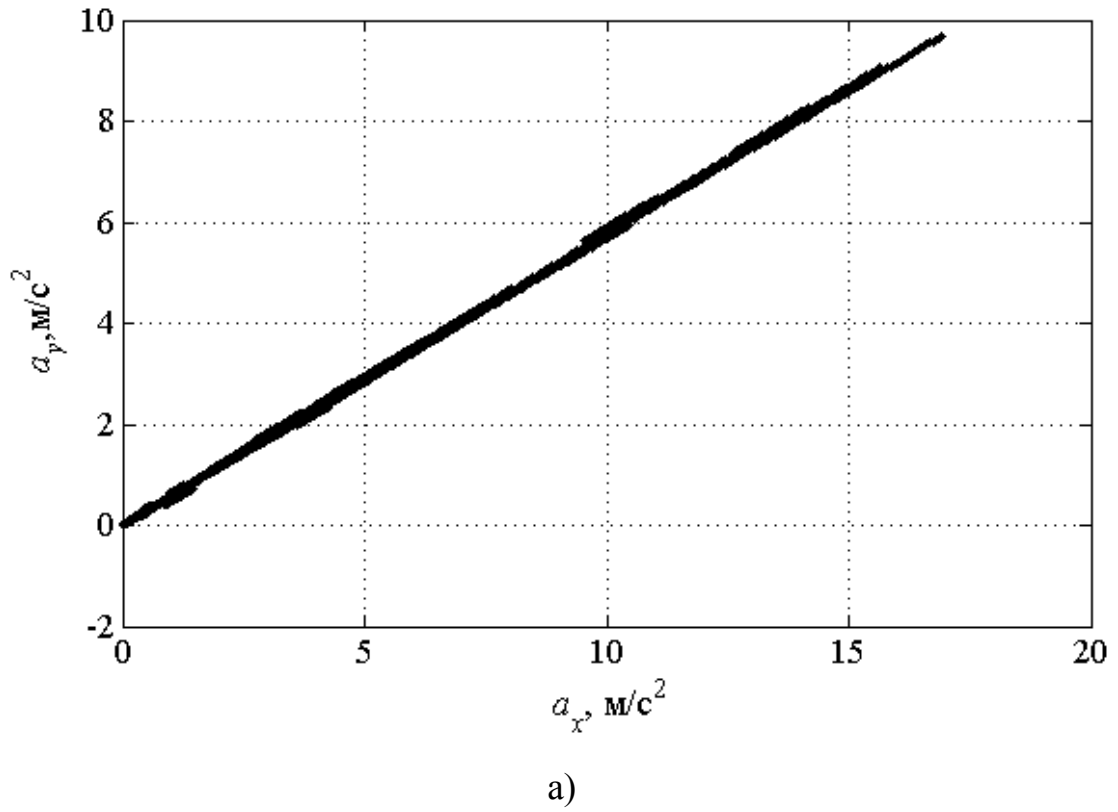


Рисунок 3.15 – Моделювання вимірювань прискорень шляхом спрощених випробувань при відносній похибці $\pm 1\%$ (а) та $\pm 10\%$ (б)

Розглянемо питання щодо оцінки похибки вимірювань прискорень за результатами спрощених випробувань. Для цього введемо зручні позначення:

$$x = \ddot{x}_A : x = x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_{n-1}, x_n, \quad (3.4)$$

$$y = \ddot{y}_A : y = y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_{n-1}, y_n, \quad (3.5)$$

де x та y вимірювані значення прискорень \ddot{x}_A та \ddot{y}_A ;

n – кількість вимірювань прискорень протягом випробування;

x_k та y_k , де $k = 1, 2, \dots, n$ – виміряні значення прискорення \ddot{x}_A та \ddot{y}_A .

З урахуванням співвідношення (2.3) та позначень (3.4), (3.5) маємо, що результати вимірювань мусять задовольняти умові

$$y_k = a \cdot x_k, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (3.6)$$

де $a = \operatorname{tg} \alpha_L$ (див. рис. 2.3 та рис. 2.4).

Завдяки умовам (3.6), для оцінки похибки вимірювань можемо запропонувати величину

$$S = \sum_{k=1}^n (y_k - a \cdot x_k)^2. \quad (3.7)$$

Для оцінки похибки вимірювань прискорень при спрощених випробуваннях акселерометрів засобами системи MatLab [15, 16] розроблена спеціальна функція (рис. 3.16), що дозволяє за результатами моделювання (див. рис. 3.14) спрощених випробувань із похибкою вимірювань визначати відповідну їм величину (3.7), що визначає експериментальних даних (див. рис. 3.15) відносно теоретичної прямої (див. рис. 3.13). Вхідними параметрами цієї функції є результати моделювання виміряних прискорень та фактичне значення куту α_L (див. рис. 2.3 та рис. 2.4) в градусах. При моделюванні вважалося, що

похибка ε вимірювання є випадковою величиною, яка має рівне нулю математичне очікування (див. рис. 3.14). Дослідження щодо впливу відносної похибки вимірювання на результати спрощених випробувань двохкоординатних акселерометрів (рис. 3.17) свідчать, про квадратичну залежність величини (3.7) від відносної похибки, що дозволить за результатами спрощених випробувань мати надійну оцінку похибки вимірювань прискорень.

```
function def_S(ax, ay, a)
    s=0;
    n=length(ax);
    tana=tan(a*pi/180);
    for k=1:1:n
        s=s+(ay(k)-tana*ax(k))^2;
    end
    def_S=s
end
```

Рисунок 3.16 – Програма для визначення похибки вимірювань

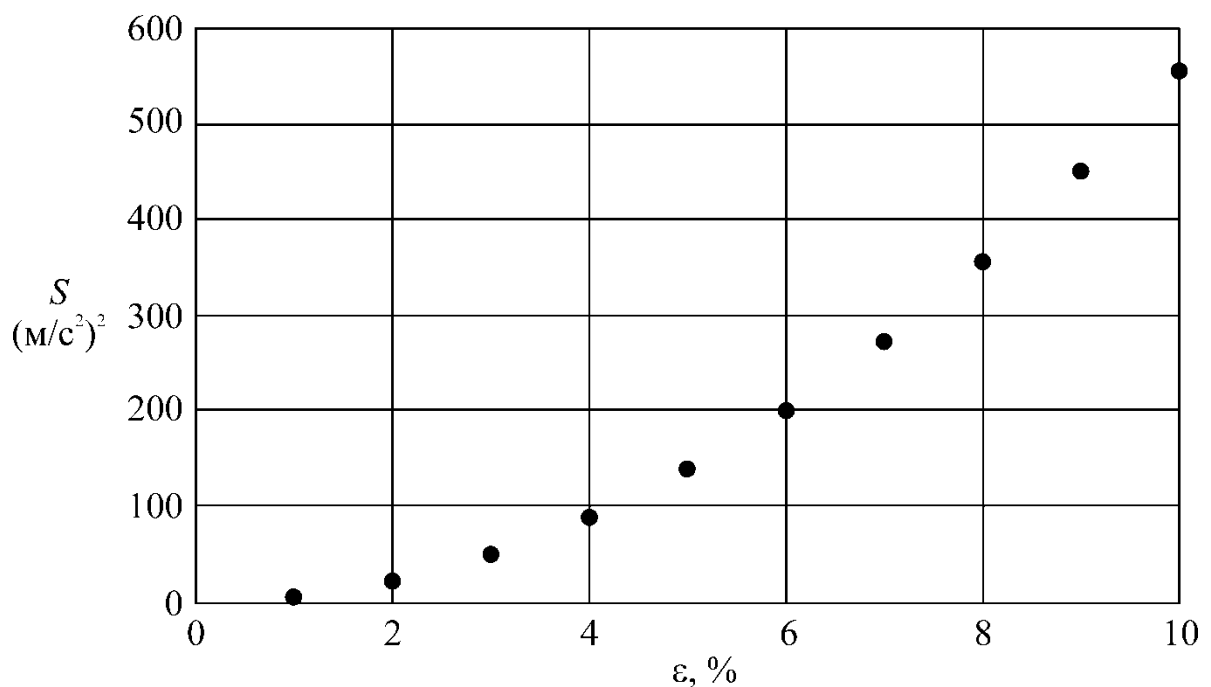


Рисунок 3.17 – Залежність розкиду результатів від похибки вимірювань

3.4 Інформаційно-вимірвальна система для детальних досліджень

Спрощені випробування двохкоординатних акселерометрів з використанням запропонованого лабораторного макету (див. рис. 2.4) засновані на співвідношенні (2.3) між складовими прискорення та дозволяють вимірювати прискорення та оцінювати похибку вимірювань виключно за результатами вимірювань без додаткової інформації щодо фактичного значення прискорень. Зрозуміло, що такий підхід є корисним для демонстрації властивостей та для перевірки працездатності двохкоординатних акселерометрів, але він не дозволяє визначати абсолютну похибку вимірювання прискорення.

Детальне вивчення характеристик двохкоординатних акселерометрів передбачає можливість оцінки абсолютної похибки вимірювання та можливості використання акселерометрів. Така оцінка можлива виключно за наявності даних щодо фактичного прискорення, з яким рухається досліджуваний акселерометр. Зрозуміло, що розрахункове та фактичне значення прискорення на лабораторному стенді матимуть певні відмінності через наявність факторів, що неможливо врахувати при моделюванні, наприклад тертя між рухомими частинами лабораторного макету, похибку вимірювань при налагодженні лабораторного макету та інші. Таким чином, для детальних досліджень характеристик двохкоординатних акселерометрів необхідно мати незалежну систему вимірювання прискорення, яка забезпечує значно меншу похибку вимірювання та має більш високу надійність, ніж у досліджуваного акселерометру. Зрозуміло, що така незалежна система вимірювання прискорень має бути заснована на принципах, що істотно відрізняються від принципів, на яких будуються інерційні акселерометри, та має комплектуватися обладнанням високої вартості. Навидь за наявності такої системи, вона все рівно буде мати певну похибку вимірювань і така похибка буде мати певний вплив на результати порівняння прискорень.

Зрозуміло, що вартість устаткування, необхідного для незалежного вимірювання прискорення, яке необхідно для подальшого порівняння із результатами досліджуваного акселерометру, істотно залежить від допустимої похибки незалежного оцінювання прискорення. З урахуванням цієї обставини, розглянемо далі питання щодо визначення допустимої похибки незалежного вимірювання прискорення, яка забезпечить надійну оцінку похибки досліджуваного акселерометру. Модель процесів в лабораторному макеті для детального дослідження характеристик двохкоординатних акселерометрів представлена на рис. 3.18; в цій моделі розглянуто контур вимірювання та дослідження тільки однієї складової прискорення, оскільки для іншої складової контур вимірювання є аналогічним. В даній моделі похибки вимірювань моделюються за допомогою випадкової величини відносної похибки.

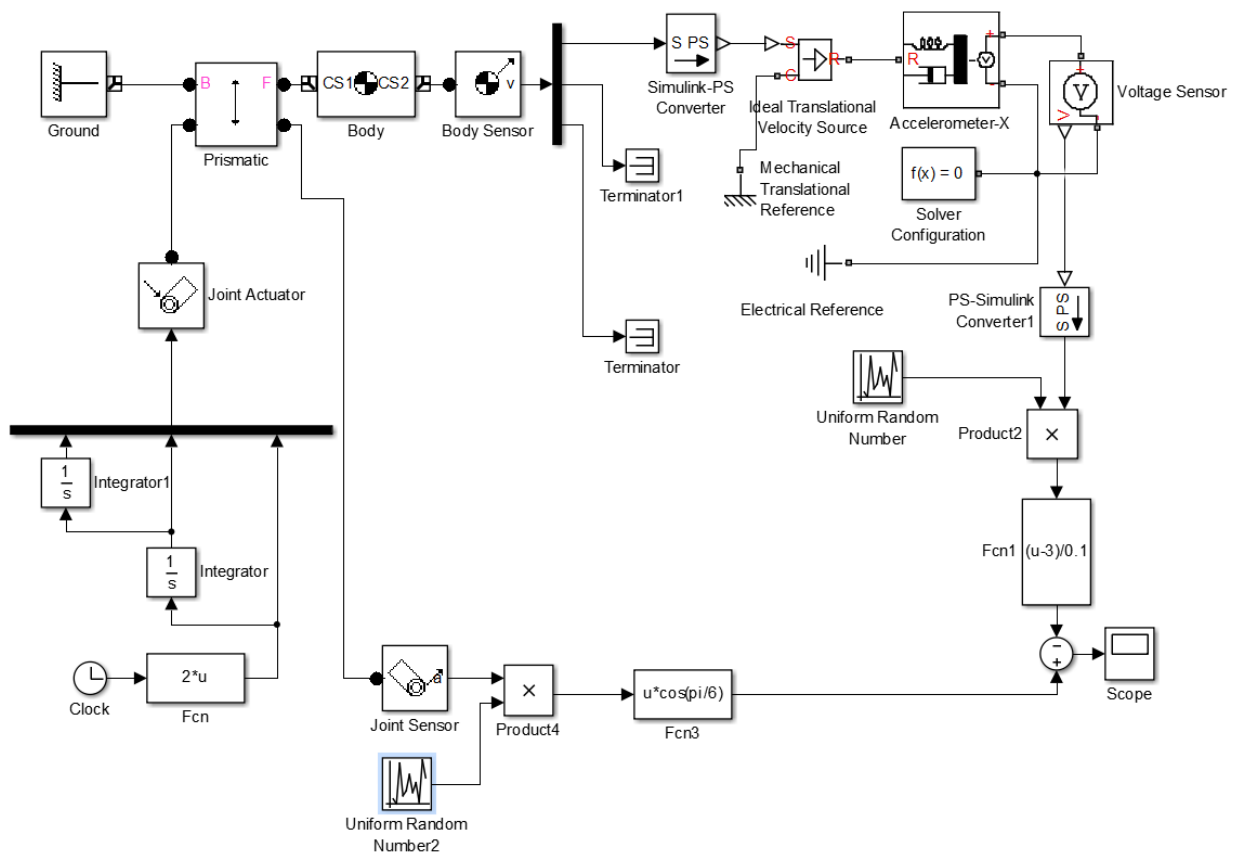


Рисунок 3.18 – Модель інформаційно-вимірювальної системи для детальних досліджень характеристик двохкоординатних акселерометрів

Для визначення похибки, що має забезпечуватися незалежним вимірюванням прискорення розглянутий випадок дослідження характеристик двох-координатного акселерометру, який має відносну похибку $\pm 1\%$.

Результати оцінки абсолютної похибки вимірювання прискорення у випадку, коли тестове (випробувальне) прискорення визначається із більшою відотною похибкою ніж забезпечує досліджуваний акселерометр, представлені на рис. 3.19. Відповідно до цих результатів абсолютна похибка вимірювання прискорення становить $\pm 1 \text{ м/с}^2$. Така велика похибка пояснюється тим, що результати вимірювань порівнюються із даними, що мають значну похибку.

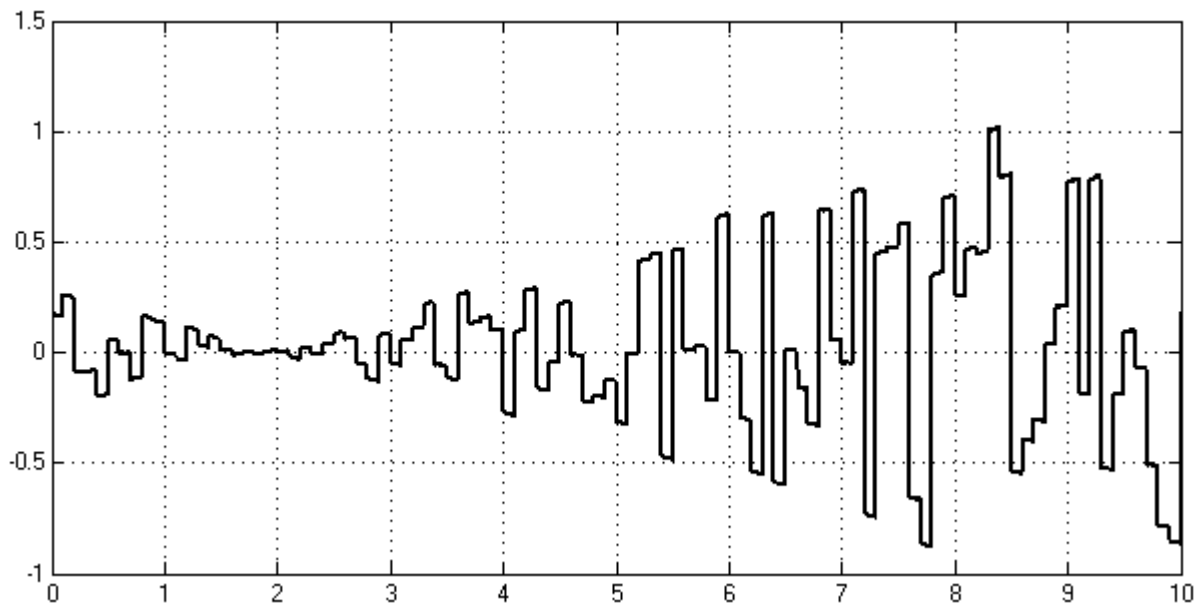


Рисунок 3.19 – Оцінка абсолютної похибки визначення прискорення, яке вимірюється акселерометром із відотною похибкою $\pm 1\%$ при порівнянні із результатами незалежного вимірювання із відотною похибкою $\pm 10\%$

Результати оцінки абсолютної похибки вимірювання прискорення у випадку, коли тестове прискорення визначається із однаковою відотною похибкою із тією, що забезпечує досліджуваний акселерометр, представлені на рис. 3.20. Відповідно до цих результатів абсолютна похибка вимірювання

прискорення становить $\pm 0,3 \text{ м/с}^2$. Якщо похибка незалежного вимірювання прискорення удвічі менше, ніж забезпечує досліджуваний акселерометр, то абсолютна похибка вимірювання прискорення (рис. 3.21) становитиме приблизно $\pm 0,4 \text{ м/с}^2$. Результати моделювання (рис. 3.22) свідчать, що подальше зменшення похибки незалежного вимірювання прискорення учетверо менше, ніж забезпечує досліджуваний акселерометр, не приводить до зниження абсолютної похибки вимірювання прискорення, яка, як і в попередньому випадку (див. рис. 3.21) становитиме приблизно $\pm 0,4 \text{ м/с}^2$. Таким чином, показано, що для оцінки абсолютної похибки вимірювання прискорення двохкоординатним акселерометром, необхідно мати результати незалежного вимірювання прискорення із відносною похибкою удвічі меншою, ніж відносна похибка досліджуваного акселерометру. Цей результат є дуже важливим, оскільки дозволяє обґрунтовано обмежити клас точності потрібного вимірювального устаткування та за рахунок цього зменшити його вартість.

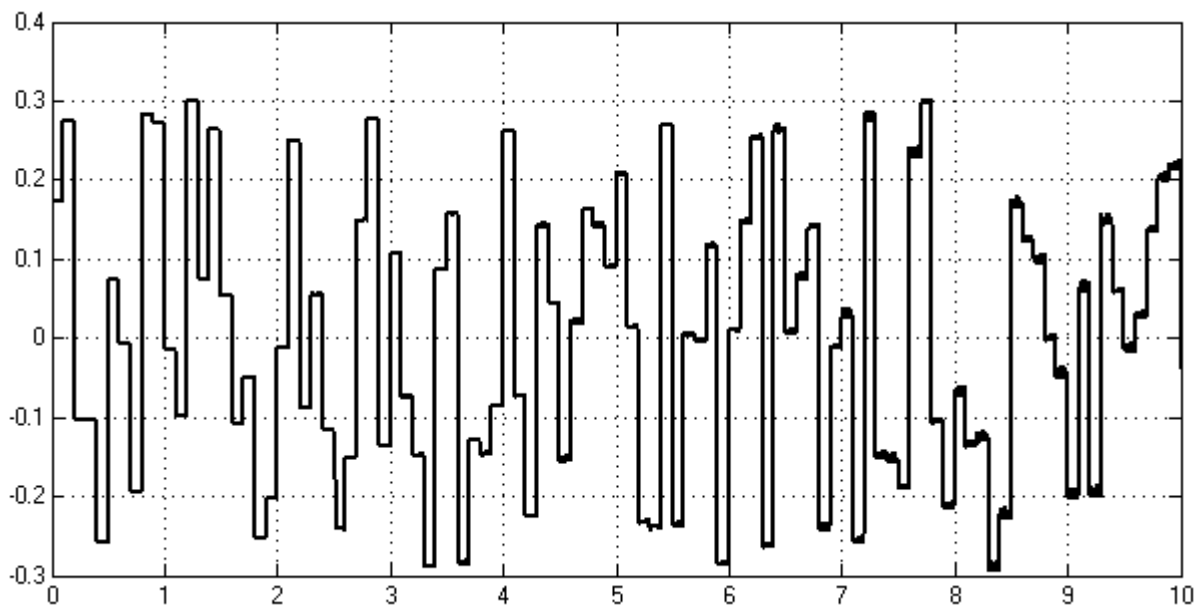


Рисунок 3.20 – Оцінка абсолютної похибки визначення прискорення, яке вимірюється акселерометром із відносною похибкою $\pm 1 \%$ при порівнянні із результатами незалежного вимірювання із відносною похибкою $\pm 1 \%$

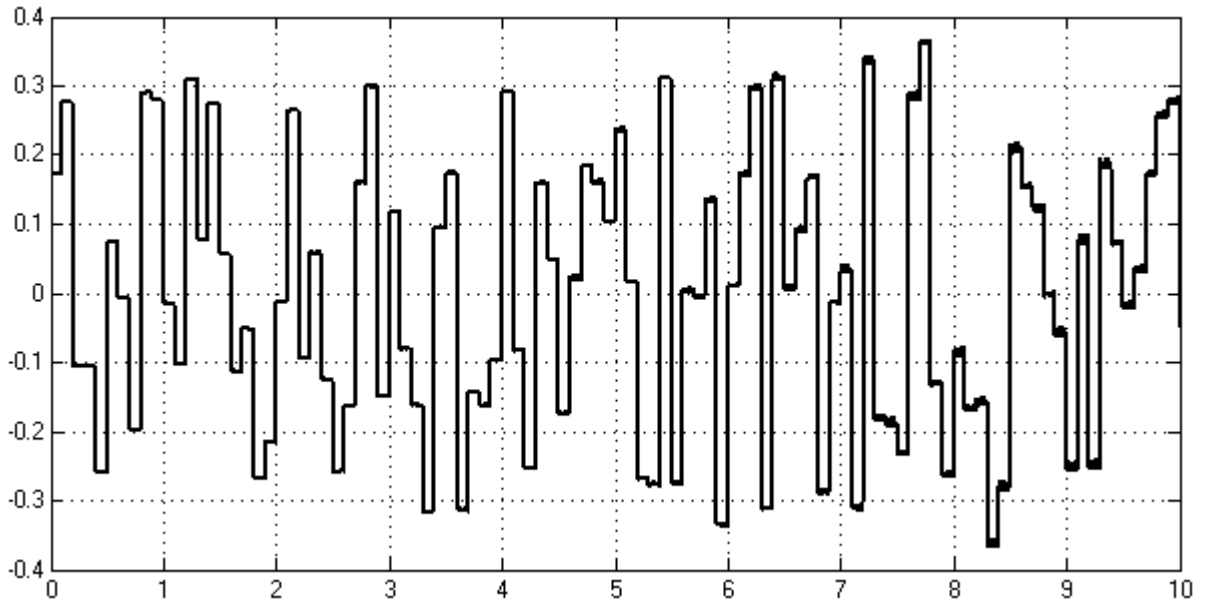


Рисунок 3.21 – Оцінка абсолютної похибки визначення прискорення, яке вимірюється акселерометром із відносної похибкою $\pm 1\%$ при порівнянні із результатами незалежного вимірювання із відотною похибкою $\pm 0,5\%$

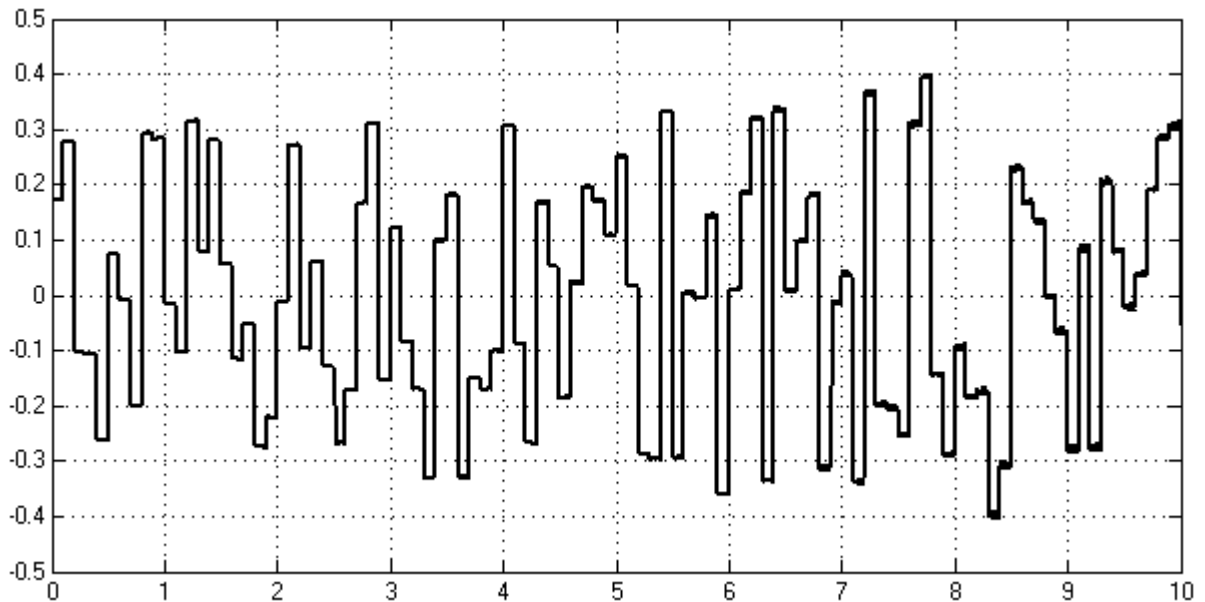


Рисунок 3.22 – Оцінка абсолютної похибки визначення прискорення, яке вимірюється акселерометром із відносної похибкою $\pm 1\%$ при порівнянні із результатами незалежного вимірювання із відотною похибкою $\pm 0,25\%$

3.5 Висновки до 3 розділу

В третьому розділі визначена загальна будова удосконаленого лабораторного макету, його механічна та апаратна частина, розглянуті проблеми щодо проектування окремих складових макета такі як надійність фіксації та можливість повороту досліджуваного акселерометру навколо вертикальної осі, його забезпечення поступальним прямолінійним рухом, де серед трьох запропонованих варіантів, гвинтовий привід має можливість реверсу руху та конструктивно є відносно нескладним для умов машинного виробництва. Також розглянуті форми для напрямного ковзання, серед яких рекомендується використовувати плоскі напрямні, які мають найпростішу конструкцію та передбачити можливість їхнього регулювання. Через невисокі експлуатаційні навантаження усі елементи конструкції окрім гвинтів можна виготовляти з використанням технологій 3D-друку.

Також для модуляції процесів дослідження характеристик за допомогою MatLab розроблені інформаційно-вимірювальна система спрощених випробувань, в якій при моделюванні вимірювань прискорень враховуються відносні похибки, та система для детальних досліджень, в якій розраховується оцінка абсолютної похибки, яка вимірюється акселерометром із однією відносною похибкою при порівнянні із результатами незалежного вимірювання із іншою відносною похибкою. Результати дозволяють обґрунтовано обмежити клас точності потрібного вимірювального устаткування та за рахунок цього зменшити його вартість.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Приміщення, в якому виконується дослідження розташовано на першому поверсі та має такі характеристики:

- площа приміщення 12 м^2 ($3 \text{ м} \times 4 \text{ м}$);
- висота $2,5 \text{ м}$;
- кількість робочих місць – 1 шт.;
- обладнання – стіл з ПК – 1 шт.

Відповідно до НПАОП 0.00-1.28-10, площа приміщення має бути не менше 6 м^2 , об'єм – не менше 20 м^3 для одного окремого робочого місця з ЕОМ [27]. Загальна площа приміщення 12 м^2 і об'єм 30 м^3 , на робоче місце припадає 12 м^2 площі та об'єм 30 м^3 , тобто вимога виконана.

Для освітлення робочих місць та приміщення в цілому застосовується як природне бічне, так і штучне освітлення.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче $1,5 \%$, $E_{min} = 150 \text{ лк}$.

Рівень загального штучного освітлення в приміщенні можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, використавши наступну формулу:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (5.1)$$

де W – питома потужність, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

S – площа приміщення, $S = 12 \text{ м}^2$;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{cв} \cdot n_{cв}, \quad (5.2)$$

де $W_{cв}$ – потужність одного світильника (для світлодіодного світильника РВ-38 595×595, $W_{cв} = 38$ Вт);

$n_{cв}$ – кількість світильників в приміщенні, шт.

$$W_{\Sigma} = 38 \cdot 4 = 152 \text{ Вт},$$

$$W = \frac{152}{12} = 12,67 \text{ Вт/м}^2.$$

Згідно з забезпеченням освітленості приміщення площею 10-17 м² в 200 лк можливо при питомій потужності 17 Вт/м².

Тому, для створення сприятливих зорових умов в приміщенні необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні. Наприклад, при використанні люмінесцентних світильників 4 × 18 ($W_{cв} = 72$ Вт).

$$W_{\Sigma} = W \cdot S, \quad (5.3)$$

$$n_{cв} = \frac{W_{\Sigma}}{W_{cв}}, \quad (5.4)$$

$$W_{\Sigma} = 17 \cdot 12 = 204 \text{ Вт},$$

$$n_{\text{св}} = \frac{204}{72} = 2,83 \approx 3 \text{ шт.}$$

Тобто на задану площу приміщення необхідно розташувати 3 стельових люмінесцентних світильники, що задовольняє вимогам [28].

ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської атестаційної роботи в першому розділі розглянутий існуючий лабораторний макет, його недоліки та шляхи удосконалення конструкції. Також загальні відомості системи AutoCAD.

У другому розділі запропоновані задачі проекту удосконалення лабораторного макету. Оскільки визначення характеристик акселерометру ґрунтується на вимірюваннях прискорення, то при розв'язанні механічної частини був наведений перший ескіз макета за допомогою системи AutoCAD, в якому акселерометр має можливість рухатися у двох напрямках. Але через ускладнення та недоліки такого ескізу, як більш масивна конструкція та значні витрати на її виготовлення, та на підставі знань з теоретичної механіки, що для вимірювання прискорень осі x та y при прямолінійному русі достатньо положення акселерометра відносно напрямку руху, значно спрощено конструкцію механічної частини макету за рахунок зменшення кількості напрямних рухів і був наведений другий ескіз.

Також у другому розділі розроблені ескізні проекти апаратної частини та їх методики щодо спрощених випробувань для визначення працездатності двох координатного акселерометру та щодо детальних досліджень його характеристик за допомогою середовища Simulink системи MatLab.

При виконанні третього розділу сформульовані загальні принципи будови удосконаленого макету, розглянуті проблеми механічної частини, в підсумку яких для забезпечення прямолінійного руху рекомендується використовувати гвинтовий привід, оскільки він може забезпечити можливість реверсу руху та за конструкцією відносно нескладний для виробництва. Серед форм напрямних ковзання пропонується використовувати плоскі напрямні через їх просту конструкцію та передбачити можливість їхнього регулювання. Оскільки неможливо вирішити питання щодо використання накладних напрямних через відсутність даних щодо можливого зношування напрямних при експлуатації, то

з урахуванням цих обставин пропонується використовувати напрямні, що виготовляються із корпусною деталлю, але передбачити варіант конструкції із накладною напрямною.

Також можливо виготовляти усі елементи конструкції окрім гвинтів з використанням технологій 3D-друку, оскільки експлуатаційні навантаження невисокі.

За допомогою системи MatLab розроблені інформаційно-вимірювальні системи для спрощених випробувань, в основі якого буде використовуватися співвідношення між складовими прискорення, яке дозволяє наочно представляти результат випробування за допомогою осцилографічних приладів, використовуючи амплітудну модуляцію, та для детальних досліджень. За допомогою модуляції процесів визначено, що для оцінки абсолютної похибки вимірювання прискорення при детальних дослідженнях, необхідно мати результати незалежного вимірювання прискорення із відносною похибкою удвічі меншою, ніж відносна похибка досліджуваного акселерометру, що дає змогу обмежити клас точності потрібного вимірювального устаткування та за рахунок цього зменшити його вартість.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Безвесільна О. М. Статична похибка п'єзоелектричного акселерометра [Текст] / О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук // Вісник інженерної академії України. – 2011. – №2. – С. 150-154.

2. Безвесільна О. М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем : підруч. для студентів вищ. навч. закл. / О. М. Безвесільна, Г. С. Тимчик. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – 812 с.

3. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / упоряд. : І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків : ХНУРЕ, 2019. – 55 с.

4. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст] : ДСТУ 3008: 2015. – [На заміну ДСТУ 3008-95 ; чинний від 2017-07-01] – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.

5. Webster J. G. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement / J. G. Webster, H. Eren. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 2nd ed. – 1603 p.

6. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

7. Sensor Signal Conditioning – An IC Designer's Perspective // Sensors Magazine. – New York : IEEE, 1991. – P. 23-30.

8. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. Ю.А. Заболотной ; под ред. Е. Л. Свинцова. – Москва : Техносфера, 2005. – 592 с.
9. Suminto J. T. A simple, high performance piezoresistive accelerometer / J. T. Suminto // TRANSDUCERS '91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers. – New York : IEEE, 1991. – P. 104-107.
10. A novel accelerometer based on a silicon thermopile / [R.Hiratsuka, D. C. van Duyn, T. Otaredian, P. de Vries]. – New York: IEEE, 1991. – (TRANSDUCERS '91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers). – P. 420-423.
11. Проектирование датчиков для измерения механических величин / [Е. П. Осадчего и др.] ; под ред. Е. П. Осадчего. – Москва: Машиностроение, 1979. – 480 с.
12. Finkelstein E. AutoCAD 2015 and AutoCAD LT 2015 Bible / E. Finkelstein, L. Ambrosius., 2014. – 1296 с.
13. Финкельштейн Эллен. AutoCAD 2002. Библия пользователя / Эллен Финкельштейн ; пер. с англ. К. Ю. Рулик ; под ред. В. В. Александрова. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1072 с.
14. Зуев С. А. САПР на базе AutoCAD – как это делается / Сергей Зуев, Николай Полещук. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2004. – 1168 с.
15. Дьяконов В. П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК-Пресс, 2008. – 768 с.
16. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.
17. Аврутов В. В. Испытания инерциальных приборов: Учебное пособие / В. В. Аврутов. – Киев : НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», 2016. – 205 с.
18. Металлорежущие станки: учеб. пособие для втузов / [Н. С. Колев и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1980. – 500 с.

19. Ачеркан Н. С. Металлорежущие станки : в 2 т. / Н. С. Ачеркан, А. А. Гаврюшин, В. В. Ермаков и др. ; под ред. Н. С. Ачеркана. – Москва : Машиностроение, 1965. – Т. 1. – 764 с.
20. Ачеркан Н. С. Металлорежущие станки : в 2 т. / Н. С. Ачеркан, А. А. Гаврюшин, В. В. Ермаков и др. ; под ред. Н. С. Ачеркана. – Москва : Машиностроение, 1965. – Т. 2. – 628 с.
21. Кучер А. М. Металлорежущие станки. Альбом общих видов, кинематических схем и узлов / А. М. Кучер, М. М. Киватицкий, А. А. Покровский. – Москва : Машиностроение, 1972. – 308 с.
22. Винокуров В. И. Электрорадиоизмерения : учеб. пособие для радиотехнич. спец. вузов / В. И. Винокуров, С. И. Каплин, И. Г. Петелин ; под ред. В. И. Винокурова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1986. – 351 с.
23. Кушнир Ф. В. Радиотехнические измерения : учеб. для техн. связи / Ф. В. Кушнир. – Москва : Связь, 1980. – 176 с.
24. Механика промышленных роботов. Кн. 3: Основы конструирования : учеб. пособие для вузов : в 3 т. / [Е. И. Воробьев и др.] ; под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. – Москва : Высш. шк., 1989. – Т.3. – 383 с.
25. Детали и механизмы роботов: Основы расчета, конструирования и технологии производства : учеб. пособие / [Р. С. Веселков и др.] ; под ред. док. техн. наук., проф. Б. Б. Самопкина. – Киев : Висш. шк., 1990. – 343 с.
26. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам / А.Ф. Крайнев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1987. – 560 с.
27. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин : ДСанПІН 3.3.2.007-98 / Міністерство охорони здоров'я України. Головне санітарно-епідеміологічне управління. – Київ : МОЗ України, 1998. – 14 с.

28. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» в атестаційних роботах окр «Магістр» / упоряд. : Б. В. Дзюндзюк, В. А. Айвазов, Т. Є. Стиценко ; МОН України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2013. – 52 с.