Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Моделювання мікроелектромеханічних актюаторів з використанням Matlab/Simulink

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СКСм-17-1
Колосов Є.А.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність
123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник: проф. Литвинова Є.І.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри АПОТ _____ Чумаченко С.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2021 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

"____" _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Колосову Євгену Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання мікроелектромеханічних актюаторів з використанням Matlab/Simulink

затверджена наказом по університету від "_12_"__11__2018 р. № ____1626 Ст_____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15.12.2021

3. Вихідні дані до роботи

Математичний процесор MATLAB

Програмний пакет Simulink

Бібліотека Matlab/Simulink/Simscape

МЕМС-астюатор Joint Striction Actuator

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1 Аналіз предметної області та постановка завдання дослідження

2 Призначення та класифікація актюаторів

3 Технологія Multi Actuator жорсткого диску

4 Фізична модель сервоприводу головки жорсткого диску

5 Математична модель сервоприводу в системі Matlab/Simulink

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних

ілюстрацій (слайдів) 22 слайди

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2021 - 02.09.2021	
2	Аналіз предметної області	03.09.2021 - 15.09.2021	
3	Аналіз джерел з проблемної галузі	16.09.2021 - 01.10.2021	
4	Технологія Multi Actuator жорсткого диску	02.10.2021 - 15.10.2021	
5	Розробка фізичної моделі сервоприводу головки жорсткого диску	16.10.2021 - 30.10.2021	
6	Розробка математичної моделі сервоприводу в системі Matlab/Simulink	01.11.2021 - 14.11.2021	
7	Моделювання в системі Matlab/Simulink	15.11.2021 - 18.11.2021	
8	Оформлення пояснювальної записки	19.11.2021 - 29.11.2021	
9	Оформлення графічного матеріалу	30.11.2021 - 07.12.2021	
10	Перевірка виконаного проекту керівником	08.12.2021 - 15.12.2021	

Дата видачі завдання 01 вересня 2021 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Литвинова Є.І.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 81 сторінки, 35 рисунків, 1 таблиця, 9 джерел за переліком посилань.

МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ, АКТЮАТОРИ, СЕРВОПРИВОД, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, MATLAB SIMULINK

В кваліфікаційній роботі розглянуто процедури моделювання мікроелектромеханічних актюаторів в системах управління рухомими об’єктами з використанням математичного пакету Matlab Simulink.

Об'єктом дослідження є актюатори в системах управління рухомими об’єктами в сервоприводах жорсткого диску. Предметом дослідження є моделі мікромеханічних актюаторів в середовищі Matlab Simulink.

Розроблено та проаналізовано математичну модель регулювання положення актюатора сервоприводу жорсткого диску. Здійснено моделювання математичної моделі МЕМС-актюатора в середовищі Matlab Simulink.

ABSTRACT

The explanatory note contains 81 pages, 35 figures, 9 sources by the list of references.

MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, ACTUATOR, SERVODRIVE, MATHEMATICAL MODELING, MATLAB SIMULINK

In the qualification work, the procedures for modeling microelectromechanical actuators in control systems of moving objects using the mathematical package Matlab Simulink are considered.

The object of research is actuators in control systems for moving objects in hard disk servo drives. The subject of the research is the models of micromechanical actuators in the Matlab Simulink environment.

Developed and analyzed a mathematical model for control the position of the actuator of the hard disk servo drive. The mathematical model of the MEMS actuator is simulated in the Matlab Simulink environment

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ……7
ВСТУП……8
1 ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ……...10
1.1 Загальна характеристика вбудованих систем……...10
1.2 Класифікація мікромеханічних пристроїв……16
1.3 Технології проектування та виготовлення МЕМС……..20
1.4 Постановка завдання дослідження……29
2 АКТЮАТОРИ В СИСТЕМАХ МЕХАТРОНІКИ……...……31
2.1 Призначення та класифікація актюаторів……..……..31
2.2 Особливості актюаторів та використання актюаторних компонентів в МЕМС……..……..41
2.3 Технологія Multi Actuator жорсткого диску……..43
3 ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ ЖОРСТКИХ ДИСКІВ ПК……47
3.1 Вузли жорсткого диску……...…47
3.2 Голівки зчитування-запису……49
3.3 Механізми приводу голівок……....53
4 МОДЕЛЮВАННЯ МЕМС-АКТЮАТОРА в Matlab Simulink……...59
4.1 Автоматизація проектування МЕМС з використанням Matlab Simulink……..59
4.2 Фізична модель сервоприводу головки жорсткого диску……...67
4.3 Система регулювання положення актюатора сервоприводу……..70
4.4 Моделювання одномірного гармонічного осцилятора в середовищі Matlab Simulink ……72
ВИСНОВКИ…….…..79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ……81
ДОДАТОК А Графічна частина кваліфікаційної роботи……..82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ВС (Embedded System) – вбудована система

ЕАП – електроактивні полімери

ІС – інтегральна схема

IoT (Internet of Things) – Інтернет речей

КД – кроковий двигун

МЕМС (Microelectromechanical systems) – мікроелектромеханічні системи

МСТ – мікросистемна техніка

САПР – система автоматизації проектування

ТЗ – технічне завдання

ЧЕ – чутливий елемент

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

HDA (Head Disk Assembly) – блок голівок і дисків

Matlab Simulink – інтерактивний інструмент (Програмне забезпечення) для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем

MST (Micro System Technology) – мікросистемні технології

SoC (System-on-a-Chip) – система на кристалі

Solid Works – програмний комплекс САПР для автоматизації робіт промислового підприємства

ВСТУП

Мікромеханічні пристрої, вбудовані в електронну систему, та виготовлені з використанням змішаної технології виготовлення інтегральних мікросхем та мікрообробки називають мікроелектромеханічними системами (МЕМС). Найбільш популярним матеріалом, що використовується для МЕМС, є кремній [1]. МЕМС складаються з механічних елементів, сенсорів, актюаторів (виконавчих механізмів), а також електричних і електронних пристроїв на кристалі кремнію. Сенсори та актюатори МЕМС є важливими компонентами, які збирають інформацію з навколишнього середовища шляхом вимірювання механічних, теплових, біологічних, хімічних, оптичних і магнітних явищ. Електроніка обробляє інформацію, отриману від сенсорів, і направляє її на вхід актюаторів (виконавчі механізми) шляхом переміщення, позиціонування, регулювання, накачування і фільтрації з метою досягнення поставлених цілей.

МЕМС характеризуються унікально малими масою та габаритами, низьким споживанням електроенергії, можливістю функціонування в жорстких умовах експлуатації. До основних переваг також можна віднести високу функціональність, надійність; широке область застосування, високу технологічність та повторюваність [2].

МЕМС-актюатори є перспективними пристроями сучасної мікросистемної техніки, що інтенсивно та динамічно розвиваються у науково-технічному напряму. Створення мікроелектромеханічних сенсорів та актюаторів визначило революційний процес в сучасній МЕМС-технології. Провідними виробниками МЕМС-актюаторів є фірми Analog Devices, STMicroelectronics, Freescale Semiconductor, Preciseley.

Галузь застосування МЕМС-актюаторів надзвичайно широка. Вони використовуються у системах навігації для літальних апаратів різного призначення, морських судів, в автомобілебудуванні, у свердловинних

приладах, в медицині, в промислових вимірювальних системах та системах управління, в смартфонах, ноутбуках, цифрових відеокамерах, робототехніці, медицині [3].

Мікроелектромеханічні актюатори відносять до інерційних сенсорів МЕМС та є складними об'єктами мікросистемної техніки, що представляють собою нероздільний комплекс механічної та електронної частин системи. Області застосування актюаторів визначаються їх основними параметрами, а також їх співвідношенням. Найважливішими характеристиками та параметрами актюатору є передавальна функція, поріг чутливості, коефіцієнт перетворення, гістерезис, амплітудно-частотні характеристики, калібрування, точність, надійність актюатору .

Для проектування і аналізу мікроелектромеханічних систем, а також систем автоматичного управління в даний час широко використовуються засоби Matlab. Програмний пакет Matlab Simulink дозволяє здійснювати моделювання компонентів і систем МЕМС, скорочувати терміни проектування, підвищувати якість розробки моделей і моделювання процесів, що протікають в даних системах. В даній кваліфікаційній роботі розглядаються процедури моделювання МЕМС-актюаторів з використанням Matlab Simulink.

1 ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Загальна характеристика вбудованих систем

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) характеризуються високим ступенем інтеграції. Такі системи призначені для взаємодії з зовнішнім середовищем в режимі моніторингу та управління з метою отримання інформації про стан об'єкта і формування керуючих впливів. Досить часто такий пристрій містить контролер управління для здійснення запрограмованих дій в системі і обміну інформацією з іншими пристроями і системами.

Сьогодні більшість обчислювальних пристроїв і систем є вбудованими. Вони охоплюють широкий спектр від ультра малих комп’ютерних пристроїв до великих систем моніторингу та керування складними процесами та критичними об’єктами. Вбудовані системи реального часу є одними з найбільш складних об’єктів проектування, що характеризуються значним набором функцій, постійним циклом взаємодії із зовнішнім середовищем, низьким енергоспоживанням, програмуванням в рамках моделі «з урахуванням обчислювальних ресурсів», проектуванням в стислі терміни і, як правило, повинні відповідати строгим вимогам безпеки та надійності.

МЕМС можна розділити на дві великі групи.

1. Мікровбудовані системи, які передбачають, що сенсор (датчик), процесор і актюатор розміщені на одному напівпровідниковому кристалі і виготовлені за єдиним технологічним маршрутом.

2. Макровбудовані системи - особливістю систем є те, що їх неможливо розмістити на одному напівпровідниковому кристалі. Окремі складові цієї системи, як правило, набагато більші за розмірами в порівнянні з розмірами напівпровідникового кристалу і дозволяють виконувати великі механічні

зусилля і переміщення. Разом з тим, частини макровбудованої системи, такі як сенсор і мікропроцесор і виконуючі пристрої можуть бути розміщені також на одному напівпровідниковому кристалі.

Макросистеми можуть включати в свою структуру мікросистеми або їх частини.

Вбудована система (ВС) (англ. Embedded System) визначається як спеціалізована обчислювальна система, яка в силу розв'язуваної задачі безпосередньо взаємодіє з фізичними об'єктами і процесами.

Вбудовані системи і мережі знаходять широке застосування в побутовій електроніці, промисловій автоматиці, в транспортній промисловості, в телекомунікаційних системах, медичному обладнанні, в військовій та аерокосмічній техніці, в інших областях. Сфера застосування вбудованих систем постійно розширюється і в тому чи іншому вигляді ці системи все більше проникають в усі сфери діяльності людини.

Світовий ринок вбудованих систем постійно зростає, про що свідчать дослідження, проведені різними консалтинговими компаніями в останні роки. Експерти прогнозують, що ринок ВС в найближчі 10 років зросте вдвічі. З кожним роком вбудовані системи стають все більш складними і вимагають більш високого рівня надійності і стійкості, при цьому ринкові умови вимагають постійного скорочення часу розробки проектів.

До складу ВС входять

– мікропроцесорний модуль з пам'яттю;

– периферійна система (датчики, виконавчі елементи і контролери введення-виведення для зв'язку з об'єктом контролю / управління, пристрої людино-машинного інтерфейсу за потребою);

– система електроживлення;

– конструктив, яка об'єднує (шасі, корпус);

– управляє програмне забезпечення.

Основними особливостями ВС є:

– робота в реальному масштабі часу;

– багатозадачність та обмежені ресурси;

– мінімізація вартості та різноманітні, часто складні, умови експлуатації;

– програмно-апаратний дуалізм;

– автономність роботи (відсутність оператора, обмеження електроживлення);

– високі вимоги по надійності та безпеки функціонування, врахування всіх зовнішніх факторів, які можуть вплинути на надійність.

ВС реального часу реагують на стан зовнішнього середовища; мають постійний цикл взаємодії з середовищем; в ідеалі, виконують нескінченний цільовий алгоритм; повинні враховувати зовнішні тимчасові обмеження (реальний час).

Характеристики мобільних масових ВС:

– складний набір функцій;

– робота в режимі реального часу;

– низьке енергоспоживання;

– проектуються в стислі терміни часто малими робочими групами;

– програмування в рамках моделі «з урахуванням обчислювальних ресурсів», на відміну від підходу «необмежені ресурси».

Характеристика ВС, що виконуються за технологією «система на кристалі» (SoC): збір готових компонентів, проектування і верифікація виконуються більше на системному рівні, ніж на логічному; акцент на взаємодію компонент; велика важливість програмного забезпечення.

Важливо що, проектуючи ВС, розробник завжди створює спеціалізовану обчислювальну систему незалежно від ступеня співвідношення готових і заново створюваних рішень в умовах жорстких обмежень самого різного плану. ВС відносяться до категорії систем з переважно програмної реалізацією (Software-Intensive або Software-Dominated Systems). Термін «вбудоване програмне забезпечення» (Embedded

Software) підкреслює особливі властивості програмного забезпечення ВС і вимагає спеціальних технологій його створення.

Вбудована система об'єднує в собі три основні складові:

– сенсори (датчики) – пристрої отримання інформації, які перетворюють неелектричні сигнали в електричні;

– мікропроцесорні системи обробки отриманої інформації - пристрої передачі, опрацювання, прийняття рішення;

– виконуючі пристрої – (актюатори).

На рисунку 1.1 наведено типову схему вбудованої системи.

Пристрої перетворення неелектричної інформації в електричний сигнал дають можливість зчитувати дані про стан зовнішнього середовища. До цих засобів відносяться сенсори (датчики).

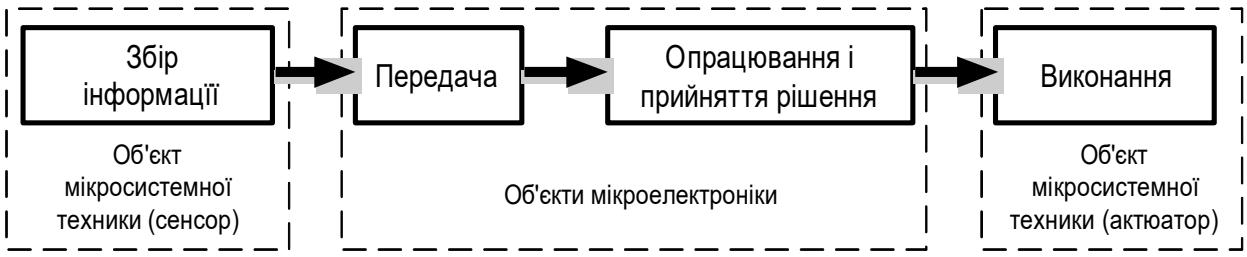


Рисунок 1.1 – Типова схема вбудованої системи

Мікропроцесорна система обробляє отриману інформацію і видає керуючий сигнал для виконуючого пристрою (актюатора), виконує ті чи інші дії. Як правило, актюатори, перетворюють енергію електричного сигналу в механічний рух. Елементну базу ВС складають електронні, оптичні, механічні та інші фізичні компоненти (елементи, модулі, блоки), з яких складається фізична реалізація ВС. В переліку таких компонентів - складні мікросхеми процесори, мікроконтролери, системні плати обчислювачів. У свою чергу, до складу таких елементів входять програмні засоби.

Розглянемо функціональні модулі MEMS:

– виконавчий механізм – пристрій для приведення в рух необхідних механізмів - іноді його називають мікроактюатором або просто актюатором (з англ. actuator - виконавчий механізм);

– сенсорний елемент, або сенсор (з англ. sensor-датчик, первинний вимірювальний перетворювач), що реагує на зміну певної фізичної величини і перетворює її до відповідного виду;

– керований механізм – завершальна ланка ланцюга управління (таких ланцюгів управління може бути кілька, і вони можуть бути різними) - такими механізмами можуть бути мікродзеркала, керовані мікроклапани, мембранні мікропомпи тощо;

– пристрої передачі енергії – для передачі енергії (руху, електричного струму, тиску рідин і т.п.) від однієї ланки до іншого ланці;

– пристрої управління (електричні або механічні) - для приведення в дію відповідних актюаторів, часто на основі інформації від датчиків і відповідно до закладених принципами побудови MEMS.

Розглянемо більш детально загальну структуру мікросистеми, наведену на рисунку 1.2. Така система включає сенсор (датчик), який виконує функцію чутливого елемента. Він перетворює вхідні фізичні, хімічні та інші величини в електричний сигнал. Отриманий сигнал, як правило, є аналоговим. Тому наступний модуль системи виконує функцію приведення аналогового сигналу до необхідного рівня з подальшим перетворенням його в цифрову форму. Сигнал посилюється, мультиплексується та перетворюється за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) у цифровий сигнал.

Структура містить блок мікропроцесорних засобів (МП). МП засоби обробляють отриману цифрову форму вхідного сигналу відповідно до заданого алгоритму. До складу цього модуля можуть входити процесори, контролери, процесори сигналів, запам'ятовувальні пристрої та цифрові схеми.

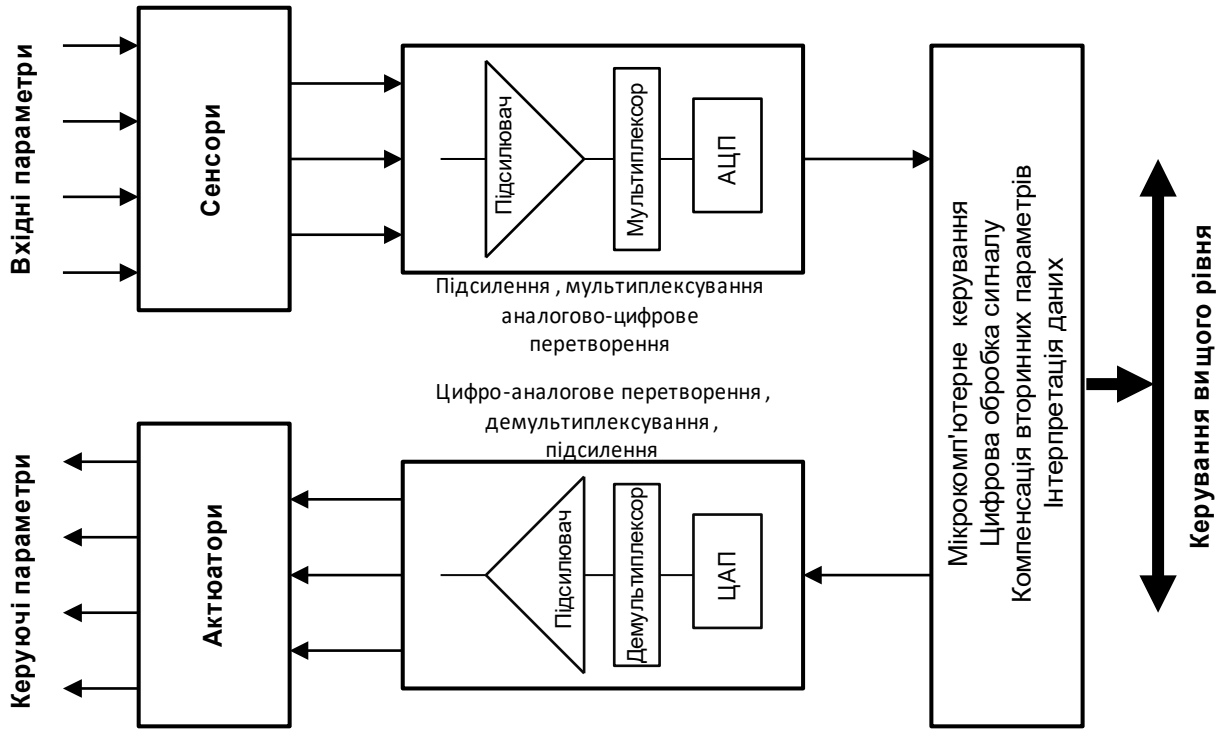


Рисунок 1.2 – Загальна структура мікросистеми

Вихідною інформацією блоку МП засобів є генерація керуючого цифрового сигналу (або групи керуючих сигналів), який за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) перетворюється в аналогову форму. Останній модуль в деяких мікровбудованих системах може бути відсутнім.

Далі сигнал передається на пристрій розподілу аналогових і цифрових сигналів (аналогові комутатори, демультиплексори, буферні регістри та ін.), з якого передається на виконуючий пристрій – актюатор.

Потрібно зауважити, що макросистеми можуть включати в свою структуру мікросистеми або їх частини.

1.2 Класифікація мікромеханічних пристроїв

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) представляють собою з'єднання механічних елементів, датчиків, а також приводів і електроніки на одній кремнієвій підкладці (підставі). МЕМС включає в себе ряд механічних мікроструктур, зокрема мікродатчиків, мікроактюаторов і мікроелектроніки, об'єднаних на кремнієвому чіпі. Тому МЕМС відносяться до інтегрованих систем (розмір яких складає від декількох мікрометрів до міліметрів), що об'єднує в собі механічні, а також електричні компоненти.

Для МЕМС поняття «система» відноситься не тільки до сукупності датчиків, об'єднаних інформаційними каналами, а й до сукупності різних за своєю фізичною природою окремих компонентів. Головне, щоб вони всі разом виконували єдину функціонально-вимірювальну завдання. Тому, з точки зору інтегрування різнорідних компонентів, будь-який датчик (вимірювальний прилад або перетворювач) є системою [2].

Вимірювальний датчик - пристрій, який виробляє інформацію про зміну вимірюваної фізичної величини, як правило у вигляді електричного сигналу. Пристрій, що виробляє силу (момент), називається датчиком сили (моменту) і може входити до складу вимірювального датчика. Пристрій, який перетворює електричний сигнал в рух, іменується актюатором. Актюатор може створити силу (момент), щоб виконати деяку корисну функцію. Таким чином, датчик сили (моменту) і актюатор - синоніми.

Процес вироблення інформації або сили (моменту) являє собою перетворення однієї форми сигналу або енергії в іншу, що здійснюється перетворювачами. Таким чином, датчик складається з перетворювачів, що утворюють вимірювальний або/і силовий ланцюг. У той же час і сам датчик можна розглядати і визначати як перетворювач. Вимірювальним приладом зазвичай називають пристрій, який крім функції вимірювання може виконувати (все або частково) функції реєстрації, відображення, зберігання, передачі інформації про виміряної фізичної величиною.

Сучасна схемотехніка і елементна база наділяють датчики можливостями, що переводять їх в поняття "прилади". По суті, вимірювальний датчик і вимірювальний прилад, що виробляють інформацію про вимірювання однієї і тієї ж фізичної величини і мають однакові функціональні можливості, є поняттями-синонімами. Тому цілком допустимо називати прилади для вимірювання: тиску - датчиками тиску, вологості (гігрометри) - датчиками вологості, температури (термометри) - датчиками температури, прискорень (акселерометри) - датчиками прискорення, кутових переміщень в інерціальному просторі (гіроскопи) - гіроскопічними датчиками кутів і т.д. В єдину конструкцію можуть бути об'єднані кілька вимірювальних датчиків, наприклад температури, вологості, тиску. Очевидно, що назва такої конструкції має починатися зі слова "прилад".

Поняття "система" може відноситися не тільки до сукупності приладів (датчиків), не пов'язаних або об'єднаних між собою інформаційними каналами, а й до сукупності окремих компонентів, що мають різну фізичну природу (механічну, електронну та ін.), Проте разом виконують єдину функціональну (вимірювальну) завдання. Таким чином, з позицій об'єднання (інтегрування) різнорідних компонентів будь-вимірювальний прилад (датчик) є системою. Розглянемо визначення, що відносяться до Мікроприлад (мікродатчик), перші дослідження по яким були розпочаті в США; там же виникла абревіатура МЕМС - мікроелектромеханічні системи. МЕМС - це інтегровані системи з розмірами від декількох мікрометрів до міліметрів, які об'єднують в собі механічні і електричні електронні компоненти.

МЕМС складається з механічних мікроструктур, мікродатчиків, мікроактюаторов і мікроелектроніки, що об'єднуються на одному кремнієвому чіпі (рис. 1.3). Виготовлення мікроструктур можливо також з інших матеріалів. Мікродатчик виявляють зміни в навколишньому систему середовищі, вимірюючи механічні, теплові, магнітні, хімічні або електромагнітні величини. Мікроелектроніка обробляє цю інформацію і

сигналізує мікроактюаторам, щоб вони створили деяку форму змін по відношенню до навколишнього середовища або в самій системі.

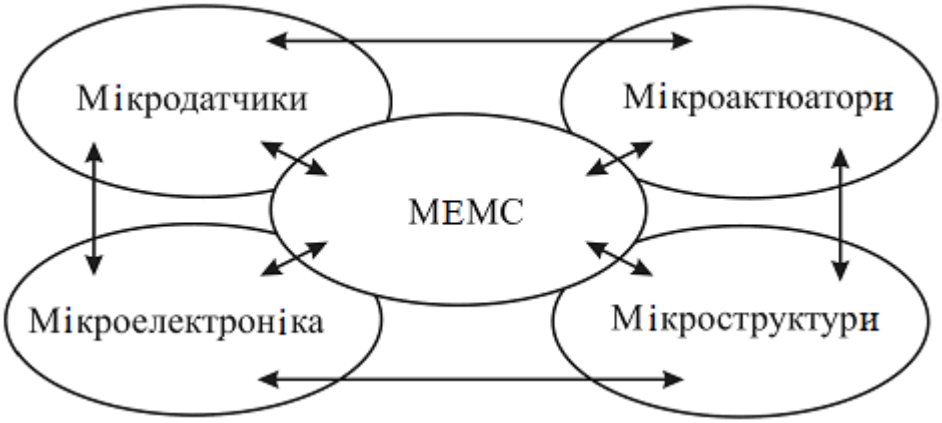


Рисунок 1.3 – Взаємозв’язок МЕМС-компонентів

У той час як електронні (електричні) пристрої виготовляються за технологією інтегральних схем (ІС), механічні компоненти для виготовлення вимагають складних маніпуляцій з кремнієм і іншими підкладками, в тому числі мікромеханічними обробки. Якщо ІС призначені для експлуатації електричних властивостей кремнію, то в МЕМС використовуються або механічні властивості кремнію, або його електричні і механічні властивості.

Крім абревіатури МЕМС в Європі існує абревіатура МСТ – мікросистемна технологія, а в Японії застосовується термін "мікромашини". Слід підкреслити, що відповідно до іноземними джерелами, МЕМС - це не стільки мініатюрні мікросистеми, скільки промислова технологія, так же, як і МСТ, яка є підмножиною МЕМС. Ця обставина ілюструється на рисунку 1.4, з якого видно, що комбінації компонентів електроніки, механіки та оптики дозволяють створювати МЕМС, Оптомеханические і оптикоелектричного мікросхеми, а також мікрооптоелектромеханіческіе системи (МОЕМС), які є підмножиною МСТ і разом з МЕМС формують нові галузі технології.

Існують значні збіги, але є і відмінності в термінах, що відносяться до областям технології і застосування. У вітчизняній літературі, наприклад,

абревіатура МСТ розшифровується як "мікросистемна техніка". Для микросистем різного застосування широко використовується термін "інтегральні датчики". Загальним терміном для мікросистем різного застосування є "перетворювач", сукупність яких, об'єднаних в вимірювальні ланцюги, утворює вимірювальні мікроприлади, що відносяться до підмножини МЕМС.

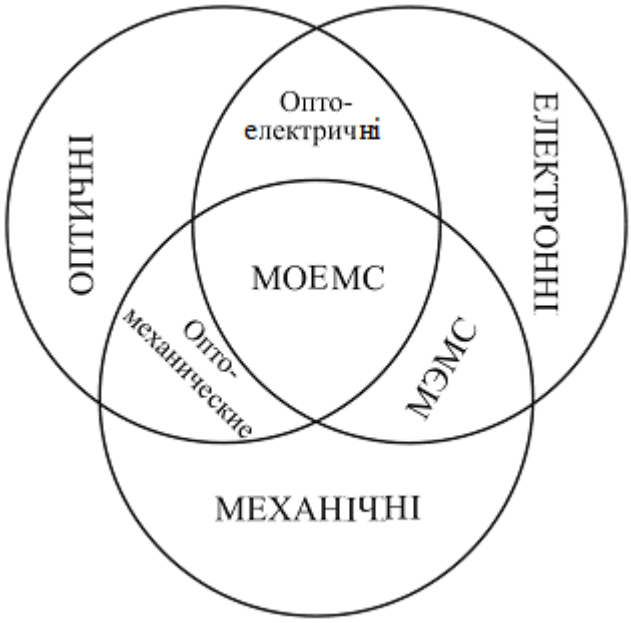


Рисунок 1.4 – Комбінація МЕМС компонентів

Мікроприлад (мікродатчик) може використовуватися в різних енергетичних областях, які характеризуються певними фізичними величинами. Деякі з них наведені в табл. 1 1. Відповідно до табл. 1.1 можна виділити групи мікроприладів (мікродатчиків) для вимірювання механічних, теплових і т.д. величин. Елемент (компонент мікроструктури), що реагує на зміну вимірюваної фізичної величини, можна визначити як первинний перетворювач, або чутливий елемент (ЧЕ).

Як випливає з таблиці 1.1, можна виділити три групи ЧЕ: механічні, електронні та оптичні - і визначити Мікроприлад (мікродатчик, інтегральні датчики), виконані за технологіями МЕМС, як мікромеханічні,

мікроелектронні або мікрооптичні прилади. Істотним в цих визначеннях є приналежність ЧЕ до однієї з енергетичних областей.

Таким чином, мікромеханічні прилади - це мікроструктури з сервісної електронікою, виконані за технологією МЕМС з механічно рухомим ЧЕ. До мікромеханічним приладів відносяться: мікроакселерометри, включаючи датчики кутового положення (ЧЕ - пробна маса); мікродатчик тиску (ЧЕ -мембрана); мікрогіроскопи (ЧЕ - вібрує маса).

Таблиця 1.1 – Енергетичні області застосування мікроприладів

Енергетична область	Фізичні величини
Механічна	Сила, тиск, швидкість, прискорення, положення
Теплова	Температура, ентропія
Хімічна	Концентрація, склад, швидкість реакції
Оптична	Електромагнітна інтенсивність хвилі, фаза, довжина хвилі, поляризація, коефіцієнт відображення, індекс заломлення, коефіцієнт пропускання
Магнітна	Інтенсивність поля, щільність потоку, магнітний момент, провідність
Електрична	Напруга, струм, навантаження, опір, ємність, поляризація

1.3 Технології проектування та виготовлення МЕМС

Сьогодні щорічні обсяги продажів виробів мікроелектроніки перевищують 200 млрд. дол., компонентів на основі МЕМС – приблизно 10 млрд. дол. За даними авторитетної організації Yole Development (Франція), яка спеціалізується в області аналізу стану і перспектив розвитку світового ринку інноваційних пристроїв, включаючи МЕМС, обладнання та матеріали, необхідні для їх виробництва, світовий ринок МЕМС-компонентів в 2021 році характеризується стійким "плоским" станом і складає 6,9 млрд. дол. Цей рівень практично не відрізняється від рівня 2020 року (6,8 млрд. дол.) і не

нижче за рівень 2019-го (7,1 млрд. дол.), що пояснюється світовою економічною кризою, вплив якого буде помітним і в 2021 році .

В наступні чотири роки середньорічні темпи приросту обсягу продажів МЕМС складуть 12% (при цьому в 2021 році вони будуть рівні 15%). Обсяг продажів на світовому ринку в 2022 році досягне 10 млрд. дол. Уже сьогодні поставляються на ринок компоненти характеризуються високим рівнем технології. Виробництво МЕМС розширюється, виникають нові галузі застосування, особливо в медицині і промисловості.

Швидкий розвиток МЕМС-технологій багато в чому пояснюється їх ключовими перевагами - мініатюрністю, функціональністю, надійністю, малим енергоспоживанням, простотою інтегрування, використовується практично всіма ринками електроніки. МЕМС знаходять найширше застосування як в засобах масового попиту, таких як електронні системи автомобілів і споживча техніка (стільникові телефони, ноутбуки, які нетбуки тощо), Так і в складних приладах спеціального призначення, вироблених невеликими партіями : медичному обладнанні, військової і аерокосмічної техніки, промислових АСУ, апаратурі моніторингу метеоумов. Найважливіша вимога до МЕМС масового застосування, - виконання співвідношення "низька ціна / високий обсяг виробництва", а до приладів спеціального призначення – високі робочі характеристики.

МЕМС-технології є унікальним, простим рішенням для багатьох, перш складних, системних задач моніторингу та управління не тільки завдяки їх перевагам, включаючи простоту інтегрування мініатюрного компонента в клієнтську систему. Сьогодні розвиток технологій виробництва і тестування, а також доступність обладнання для локального виготовлення МЕМС дозволяє замовнику створювати власні, унікальні комплексні рішення в рамках своєї технологічної лінії.

У загальному випадку під МЕМС розуміються різні механікроелектричні (сенсорні) або електромеханічні перетворювачі (актюатори) розміром близько декількох мікрон (не більше 1 мм).

Переміщення рухомих елементів МЕМС-структури при цьому також не перевищує декількох мікрон. Концепція МЕМС побудована на інтеграції на кремнієвій підкладці за допомогою технологій мікровиробництва мікромеханічних структур датчиків (сенсорів), вимірювальних компонентів, актюаторів (виконавчих керуючих елементів) і електронних пристроїв, що виконують функції збору, аналізу, контролю, формування керуючих сигналів. Ці технології багато в чому схожі з тими, що використовуються для виробництва мікросхем. Тому інтегральні МЕМС-пристрої забезпечують високий рівень функціональності, надійності, низьку ціну. Це і зумовило їх настільки ж широке застосування, що і виробів мікроелектроніки. МЕМС-технології дозволяють досягти низької ціни, що значно розширює можливості розгортання сенсорних мереж там, де колись системним інтеграторам це могло здатися надмірною.

МЕМС-датчики тиску і руху (акселерометри, гіроскопи) моделюють процеси, параметри яких реєструє мікромеханічна структура. Рухома структура цих приладів не пов'язана з об'єктом, тому вони класифікуються як безконтактні пристрої. Якщо рухома структура ретельно спроектована і повністю захищена корпусом, то мініатюрний датчик або актюатор високонадійний і може функціонувати в різних середовищах і фазових станах, при різних перепадах температур, різних умовах вібрації, при впливі ударних хвиль, вологості, забруднень, електромагнітних перешкод, радіації . При цьому забезпечується надійна і точна робота в динамічному режимі, тобто при швидкому, стрибкоподібному, періодичному або аперіодичній зміні параметрів.

Оскільки концепція МЕМС передбачає об'єднання механічного елемента і спеціалізованої мікросхеми перетворювача (Application Specific IC, ASIC) для обробки і формування сигналу в закінчену мікросистему, в Європі МЕМС прийнято називати мікросистемами (MST), в Японії – мікромашинами.

Розвинена технологічна база, обладнання, розроблені для всіх етапів виробництва МЕМС, дозволяють швидко створювати нові вироби, в яких мікропристрої і мікросхеми об'єднані в так званих гетеросістемних корпусах.

Сьогодні розрізняють два типи мікросистем на основі МЕМС :

– гібридні, що складаються з МЕМС-пристрої і окремої мікросхеми, які розміщені на загальній кремнієвої, скляної або кварцовою підкладці;

– монолітні, що представляють собою стандартну КМОП-мікросхему з МЕМС-елементами, виконаними на одному з нею кристалі. Монолітні структури дозволяють поліпшити характеристики МЕМС, знизити витрати виробництва, корпусування і тестування, оскільки етапи формування МЕМС і мікросхеми об'єднані.

Сьогодні МЕМС виготовляються за технологією або об'ємної, або поверхневої обробки. Об'ємна мікрообробка – це розширена мікроелектронна технологія, що дозволяє виготовляти тривимірні МЕМС на кремнієвій підкладці за допомогою анізотропного травлення кремнію з використанням в якості масок плівок SiO_2, Si_3N_4, хрому, золота. Недолік цього методу – залежність геометрії мікроструктури від кристалічної структури підкладки. Тому для формування МЕМС-системи проводять або глибоке анізотропне сухе травлення (наприклад, реактивне травлення газовою плазмою), або з'єднують дві підкладки (кремнієву з кремнієвої або кремнієву зі скляною), на кожній з яких виготовлена МЕМС-структура і мікросхема. Це дозволяє створювати більш складні тривимірні МЕМС-елементи. На рисунку 1.5 показано кремнієвий мікрозахват, ряд мікробалок, що створені за технологією об’ємної мікрообробки.

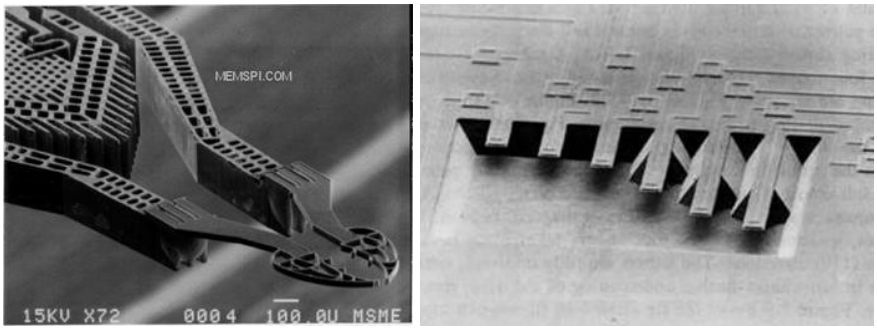


Рисунок 1.5 – Кремнієвий захват і ряд мікробалок, які створені за технологією об’ємної мікрообробки

Об'ємна технологія в багатьох випадках використується для виготовлення МЕМС-пристроїв, що входять дво- або навіть трьохкристальні конструкції. Двохкристальна конструкція містить кристал з МЕМС-датчиком, сигнал якого обробляє КМОП-схема, що виконує функції захисту і зворотного зв'язку. Таке виконання дозволяє спростити виробництво МЕМС-пристрої і швидше реагувати на вимоги замовника. Такий шлях свого часу обрали такі компанії, як Bosch, Kionix, VTI Technologies. До речі, і піонер в області однокристальних датчиків, що виготовляються за технологією поверхневої обробки вже 20 років – компанія Analog Devices недавно випустила трехосьовий акселерометр ADXL345, виконаний на основі двох роздільних елементів – МЕМС і мікросхеми ASIC-типу. Це пов'язано з високою вартістю складної системи обробки сигналу.

Поверхнева мікрообробка дозволила з меншими зусиллями створювати більш складні, багатокомпонентні інтегровані МЕМС-структури, що формуються в шарах жертовного матеріалу, і стала значним технологічним досягненням. Підкладка в основному служить механічної основою, на яку осідають шари структурного і жертовного матеріалу. Жертовний матеріал після створення необхідної структури видаляється з допомогою хімічного розчинника, звільняючи рухливий елемент. Найбільш широко в якості структурного матеріалу використовується полікремній, як жертовного матеріалу – SiO_2. Це обумовлено тим, що регулюючи температуру високотемпературного відпалу полікремнію, є можливість отримувати вільні від механічної напруги, або навпаки, механічно напружені шари. Механічні напруги двоокису кремнію складно контролювати. Ось чому SiO_2 використовується як жертовний. На рисунку 1.6 показано полікремнієві

мікромотор та резонатор, виготовлений за методом поверхневої мікрообробки.

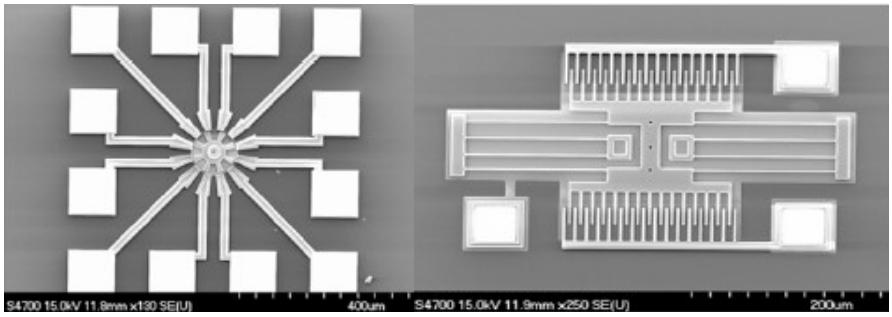


Рисунок 1.6 – Мікромотор та резонатор, виготовлені за методом поверхневої мікрообробки

Після створення МЕМС-структури до неї за допомогою стандартної напівпровідникової технології можуть бути додані електронні пристрої. Це дозволяє формувати МЕМС-структуру в центрі кристала, електронні компоненти мікросхем - по його периферії і захистити МЕМС кристалом-колпачком. Саме такий підхід використаний при виробництві МЕМС і інтегрованих МЕМС-датчиків (iMEMS) компанії Analog Devices, багатоосьових акселерометрів, висувних (pop-up) мікродзеркал, тобто так званих систем на кристалі (System-on-Chip, SoC).

Але такий підхід досить складний. Якщо спочатку виготовляти МЕМС-структуру, порушується необхідна для формування КМОП-елементів площинність підкладки. Спочатку виготовлена КМОП-схема не може витримувати високотемпературні операції, необхідні для створення МЕМС-структури. Ці проблеми були вирішені зокрема фахівцями Сандійської національної лабораторії, які запропонували виготовляти МЕМС-елементи в канавці, витравленої на поверхні підкладки, з подальшим нанесенням на неї шару SiO2 і хіміко-механічної поліровки. Після цього на підкладці з вбудованими МЕМС-елементами з допомогою звичайної КМОП-технології

виготовляється мікросхема і проводяться додаткові етапи виготовлення МЕМС-структури.

Відомий також модульний підхід, розроблений дослідниками Каліфорнійського університету в Берклі, згідно якому алюмінієва металізація КМОП-схеми замінена вольфрамової, завдяки чому схема здатна витримувати високотемпературні процеси виготовлення МЕМС-структури.

Альтернативою мікрообробки з витравлювання канавок, яка запропонована Сандійською лабораторією, є технологія мікролиття, в процесі якого мікроструктури формуються за допомогою ливарних форм тільки там, де потрібні, без подальшого травлення. Для отримання рухомого елемента МЕМС-структури досить лише видалити форму.

Одна з популярних технологій формування МЕМС-структур передбачає послідовне проведення процесів літографії, гальванопокриття і мікролітів. Ця технологія, відома під назвою LIGA (Lithographie, Galvanoformung und Abformung), дозволяє створювати тривимірні структури з високим аспектним співвідношенням, використовуючи різноманітні матеріали метал, полімери, кераміку, скло (рисунок 1.7).

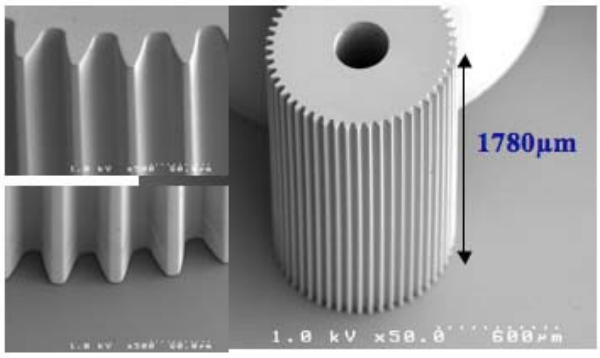


Рисунок 1.7 – Висока шестерня з великим коефіцієнтом співвідношення сторін, створена за технологією LIGA

Технології МЕМС безперервно розвиваються, удосконалюються методи виробництва і вимірювань. Так, компанія Tronic's Microsystems виготовляє високоякісні МЕМС-датчики по технології кремній-на-ізоляторі

(КНІ), що дозволяє отримувати рухливі елементи заданої товщини і з високим співвідношенням робочі характеристики / вартість.

Досить довго не вдавалося поліпшити характеристики багатоосьових датчиків руху, необхідних в першу чергу для інерційних вимірювальних пристроїв. Проблеми включали низький поріг чутливості, необхідність вирівнювати і збирати датчики в трьохосьовій системі, а також допуски і похибки АЦП. МЕМС/КМОП-технологія дозволила виготовляти на одній підкладці МЕМС-структуру пористого типу, тобто розміщувати на одному кристалі три МЕМС-датчика прискорення по кожній осі або МЕМС з шістьма ступенями свободи і мікроелектронних схему управління. І сьогодні практично кожен відомий виробник акселерометрів пропонує інтегровані трехосьові пристрої за ціною одно- і двовісних пристроїв.

Для виготовлення сучасних мініатюрних електронних пристроїв перспективна і технологія монтажу безкорпусних кристалів на друкованій платі (Chip-on-Board, CoB). Поєднання CoM- і CoB-технологій забезпечує більшу гнучкість і кращу пристосованість виробничого процесу до конструктивних змін, надає більше можливостей контролю і виправлення помилок.

Таким чином, сучасні МЕМС виготовляються за допомогою тих же процесів, що і мікросхеми. Тим не менш, деякі процеси і їх послідовність відрізняються, і ця різниця збільшується. Сьогодні МЕМС об'єднують з наноелектромеханічні системами (nanoelectromechanical system, NEMS), що дозволяє розширювати їх застосування, перш за все в биосистемах, радіочастотних пристроях і акселерометрах. В результаті на зміну традиційно використовуваним в напівпровідниковій технології операціями фотолітографії і травлення приходить новий метод – наноімпрінтлітографія. Ця перспективна технологія передбачає занурення наношаблона в м'який шар тонкої полімерної плівки, нанесеної на фоторезист, який потім твердіє під дією тепла і тиску (гаряче тиснення) або УФ-випромінювання (холодне тиснення) зі збереженням форми надрукованого малюнка. Отримана плівка

може бути використана як кінцева структура, так і як наношаблон для формування тривимірних структур. Наноімпрінтлітографія простіше у виконанні, ніж традиційна фотолітографія, не вимагає складної оптики, застосування небезпечних хімічних речовин, потужних джерел живлення, дозволяє працювати з широким діапазоном фоторезисторів і створювати тривимірні структури. Завдяки стрімкому розвитку ця технологія вже дозволяє отримувати малюнки з мінімальними розмірами менше 10 нм. Вона вже вийшла за стіни лабораторій. Доступно обладнання для тиснення, вирівнювання та суміщення шарів з дозволом порядку 20 нм.

При виробництві МЕМС-структур актуально сухе глибоке реактивне іонне травлення (DRIE) на глибину в декількох сотень мікрон. Все це, безумовно, значно відрізняє виробництво МЕМС від традиційних технологічних процесів мікросхем, причому цей процес менше впливає на ціну мікросхеми, ніж на ціну МЕМС. На відміну від мікросхем, корпусування яких не має першорядного значення при проектуванні системи, корпусування МЕМС-структур відіграє важливу роль в процесі виробництва, впливаючи на ціну виробу. На рисунку 1.8 приведено приклади корпусних МЕМС.

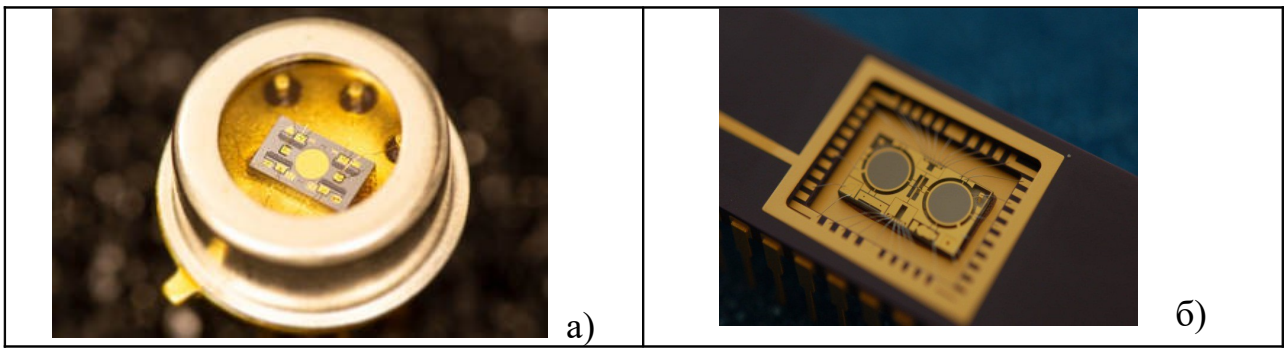


Рисунок 1.8 – Приклади корпусних МЕМС: а) – запаковане MEMS-дзеркало; б) - датчик високого тиску в свердловині

Досить часто через несумісність матеріалів і технологічних процесів виготовлення датчиків, актюаторів і електронних схем доводиться інтегрувати всі компоненти в гетерогенную систему на загальній підкладці

(гібридна інтеграція). Зараз в нанотехнології вивчається можливість реалізації процесу самосборки, який також відрізняється від традиційних методів мікроелекронікі. Паралельно розвиваються два типи наноелектронних приладів – інтегровані з КМОП-мікросхемами і не розраховані на сумісність з ними.

Варто відзначити і високі вимоги до МЕМС і нанопристроїв, що використовуються в автомобільних системах, промисловому обладнанні, медичної апаратури, які з кожним роком стають більш жорсткими. Важлива надійність і відмовостійкість пристроїв, відповідальних за життєзабезпечення пацієнта, за автомобільну та промислову безпеку. Для забезпечення максимально відповідності вимогам різних галузей промисловості розробляються стандарти МЕМС. Над створенням таких стандартів працюють фахівці Міжнародної асоціації виробників напівпровідникового устаткування і матеріалів (SEMI), Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), Об'єднаної ради з електронним пристроям Асоціації електронної промисловості (JEDEC) та інші. Все це означає, що багато ринків (виробів атомної, аерокосмічної та військової галузей промисловості, медичної апаратури) зможуть оптимально використовувати переваги МЕМС-технології, в тому числі і при експлуатації компонентів в жорстких умовах. Але від виробника компонентів це зажадає більш глибокого опрацювання питань вибору технологічних операцій і підбору обладнання для виробництва виробів необхідної якості.

1.4 Постановка завдання дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є розробка процедури моделювання МЕМС-актюатора головки жорсткого диску з використанням математичного пакету Matlab Simulink.

Об'єктом дослідження є МЕМС-актюатори в системах управління рухомими об’єктами в сервоприводах жорсткого диску.

Предметом дослідження є моделі мікромеханічних актюаторів в середовищі Matlab Simulink.

До завдань дослідження входять:

1) аналіз особливостей виготовлення МЕМС, характеристики вбудованих систем, структури типової вбудованої системи та її компонентів;

2) аналіз загальної структури мікросистеми;

3) аналіз конструкції та принципів роботи МЕМС-актюаторів головки жорсткого диску;

4) розробка та аналіз фізичної моделі цього актюатора;

5) створення Simulink-моделі актюатора головки жорсткого диску в середовищі Matlab Simulink;

6) моделювання електромеханічної моделі МЕМС-актюатора головки жорсткого диска в середовищі Matlab Simulink.

2 АКТЮАТОРИ В СИСТЕМАХ МЕХАТРОНІКИ

2.1 Призначення та класифікація актюаторів

Актюатор (actuator) - виконавчий пристрій регулюючої або керуючої системи.

Залежно від використовуваного принципу дії мікроактюатори можна розділити на основні види:

– п'єзоелектричні;

– електростатичні;

– термомеханічні;

– електромагнітні;

– пневматичні.

До найбільш поширених можна віднести електричні, гідравлічні і пневматичні актюатори.

Мікроактюатори класифікуються за типом руху:

– лінійні;

– кругові;

– одновісні;

– двовісні;

– трьохвісні; тощо.

За потужністю актюатори класифікуються:

– актюатори малої потужності;

– актюатори великої потужності.

Мікроактюатори можуть бути безконтактними і контактними, а саме, перебувати в безпосередньому контакті з об'єктом: розташовуватися на поверхні або всередині об'єкта або не мати безпосереднього зв'язку з ним [5].

2.1.1 Електричний привід

До цього типу відносять електричні двигуни різних видів. Існуюча класифікація двигунів, виділяє дві основні групи: двигуни постійного струму і двигуни змінного струму. Суть цього поділу випливає з самої назви.

Серед двигунів постійного струму (AC motors) найбільш доступними є звичайні колекторні двигуни (КД) постійного струму (рис. 2.1 а). Вони досить дешеві у виготовленні і в управлінні, тому зустрічаються практично в кожному побутовому, і не тільки, пристрої яке може живитися від батарейок. КД часто застосовуються і там, де потрібна наявність великого пускового моменту. Наприклад, стартер автомобіля і тяговий двигун електровоза як правило представляють собою колекторний електродвигун постійного струму. Основним недоліком даного типу приводів є наявність щіток, які мають властивість стиратися з часом. Щітки знижують динамічні характеристики мотора і приводять до появи електромагнітного шуму під час його роботи, що викликається дугою між щітками і контактами ротора.

а) б)

Рисунок 2.1 – Двигуни постійного струму

Безколекторні (вентильні) двигуни (ВД) позбавлені щіток, тому мають більш високими швидкісними характеристиками, менше нагріваються і шумлять. Ще однією перевагою ВД перед колекторними двигунами є велика щільність потужності. Як правило, вентильні двигуни при рівних розмірах, могутніше ніж КД (рисунок 2.1, б).

Вентильні двигуни широко застосовуються в авіамоделізмі. Однак, внаслідок використання дорогих рідкоземельних магнітів, ВД коштують значно більше ніж звичайні колекторні. Крім того, пристрій управління швидкістю такого двигуна (ESC) найчастіше виходить дорожче ніж сам мотор.

Двигуни змінного струму (AC motors) є найдешевшими у виготовленні і в обслуговуванні. Такі електродвигуни в основному застосовуються в промисловості і в побутових приладах, де немає необхідності плавно змінювати швидкість обертання ротора. Двигуни змінного струму поділяються на синхронні і асинхронні. У перших, обертання ротора відбувається згідно з обертанням магнітного поля статора. В асинхронному двигуні такої залежності немає, і часто поле обертається швидше ротора.

Для цілей робототехніки найбільше цікавий один з видів синхронного двигуна, званий кроковим двигуном (stepper motor, рисунок 2.2, а). Крокові двигуни дозволяють здійснювати обертання ротора на строго заданий кут без використання датчика кута повороту. ШД можуть бути використані замість сервомашин, оскільки мають досить великий крутний момент і точне позиціонування вала. Подібні приводи використовуються в системах, де необхідне точне позиціювання, таких як наприклад принтери, сканери, плоттери і верстати з ЧПУ (CNC).

Слід зазначити, що зі здешевленням мікроконтролерної електроніки, крокові двигуни поступово замінюються двигунами постійного струму з редуктором і датчиками кута повороту. Так, якщо раніше в оптичних приводах для руху головки застосовувалися крокові двигуни, то тепер цю роботу виконує звичайний КД.

а) б)

Рисунок 2.2 – Двигуни змінного струму

Електричний двигун, в своєму первозданному вигляді (виключаючи крокoвий), має дуже високі обороти але низький крутний момент. Однак, такий стиль руху рідко де може бути використаний. Як правило, потрібно якраз великий момент при низьких оборотах. Для вирішення цієї проблеми застосовуються механічні редуктори. Типовий циліндричний редуктор складається з комбінації шестерней різного діаметру, і перетворює високу кутову швидкість двигуна в нижчу але зі збільшеним крутним моментом. Існують різні типи редукторів, включаючи циліндричні, черв'ячні, планетарні, конічні та ін. Найчастіше можна зустріти циліндричні редуктори, які є в кожній сервомашині, в крокових двигунах і колекторних двигунах постійного струму.

Актюатори на основі електродвигунів використовуються при побудові різних видів актюаторних компонентів МЕМС.

Лінійний актюатор являє собою систему позиціонування, в основі якої лежить перетворення обертального моменту електродвигуна в поступальний рух штока. Як правило, такий пристрій включає в себе сам двигун, редуктор, датчик повороту ротора двигуна і кінцевий вимикач (рисунок 2.3, а) Швидкість руху штока до 50 мм/с в залежності від навантаження.

Сервомашинами, або просто "сервами" називають пристрої для точного позиціонування вузлів радіокерованих моделей. Пристрій складається з електродвигуна, редуктора, потенціометра зворотного зв'язку і плати управління. Завдяки редуктору, сервомашини володіють чималим

обертальним моментом (рисунок 2.3, б).

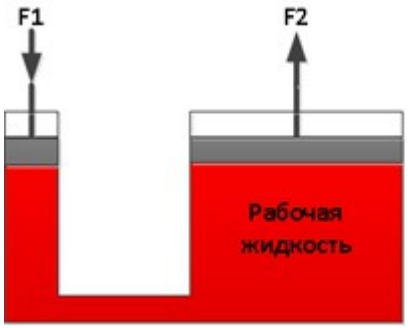
Ще один вид електричних приводів - це соленоїди. Соленоїд має мабуть найпростішої конструкцією з усіх типів актюаторів і являє собою електромагніт у якого внутрішній магнітопровід рухливий або відсутній. Подаючи постійна напруга на соленоїд, він втягує металевий шток, здійснюючи тим самим поступальний рух. При відключенні живлення, шток повертається у вихідне положення за допомогою пружини. Соленоїди застосовуються в клапанах пневматичних і гідравлічних систем, в різних запірних пристроях (рисунок 2.3, в).

а) б) в)

Рисунок 2.3 – Актюатори на основі електродвигунів

2.1.2 Гідравлічний привід

Якщо виконавчий механізм повинен оперувати вантажами більше 100 кг, то слід задуматися про використання гідравлічного приводу. В основі подібних актюаторов лежить простий принцип, який демонструється нижче.



Зліва зображена схема примітивної гідравлічної системи. Якщо на лівий поршень з площею S1 впливає деяка сила F1, то правий поршень, що має площу S2, буде виштовхувати вгору з силою F2. При цьому, співвідношення між силами F1 і F2 має вигляд: F1 / F2 = S1 / S2.

Завдяки такій властивості, гідравлічна система може виконувати ту ж функцію, що і шестерінчастий редуктор. Крім того, гідросистема дозволяє передавати силовий вплив на деяку відстань через гнучкі гідролінії, що набагато зручніше, ніж передача руху за допомогою шестерень.

Замкнуте об'ємний гідропривід, який найчастіше використовується в машинах, включає в себе кілька основних компонентів:

- насос (шестерінчастий, поршневий, і ін.);
- гідролінії, включаючи напірну магістраль (труби, рукава);
- гідродвигун (гідроциліндр, поворотний гідродвигун, гідромотор);
- гидрорегулюючі пристрої, такі як дросель або гідророзподільник.

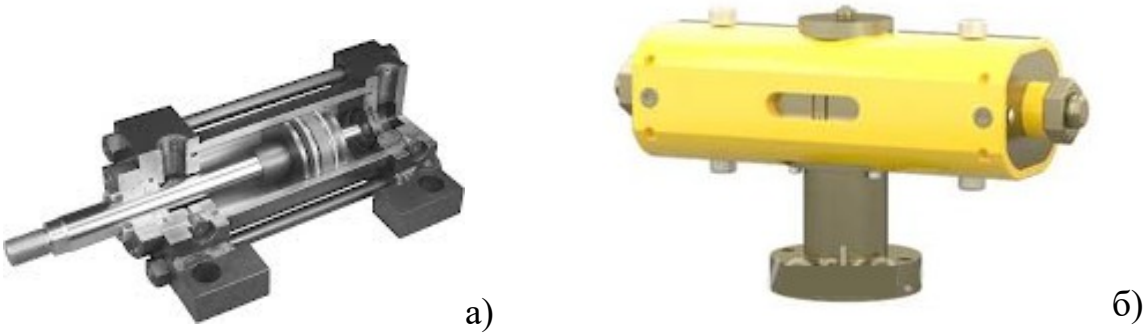
Суть роботи гідроприводу полягає в наступному. Насос створює тиск робочої рідини в напірній магістралі, яка з'єднується з гідродвигуном. У свою чергу, гідродвигун перетворює тиск рідини в механічний рух. При цьому, гідрорегулятори керують швидкістю і напрямком руху гідродвигуна.

На рисунку 2.4, а) зображено гідроциліндр (в розрізі), який є одним з найпоширеніших гідродвигунів. Гідроциліндр перетворить тиск робочої рідини в поступальний рух. Такий пристрій можна виявити в багатьох сучасних великих машинах, як то в екскаваторах, кранах, грейдерах, тощо.

На жаль, гідравлічні мають ряд серйозних недоліків, які ускладнюють їх використання в невеликих проектах. По-перше, гідравлічні досить масивні, і використовувати такий актюатор, наприклад, на невеликому безпілотник вельми проблематично. По-друге, для забезпечення герметичності системи потрібно виготовляти дуже точні і міцні деталі, що сильно позначається на вартості системи. Крім того, гідравлічні системи чутливі до температури. Нагрівання робочої рідини знижує її в'язкість і збільшує ймовірність витоків. Слід зазначити і той факт, що ККД гідроприводу нижче, ніж в шестеренних передачах. Гідроприводи використовуються в різних промислових роботів, що працюють з великими вантажами. Подібні актюатори застосовуються, наприклад, у відомому роботі BigDog.

Пневматичний привід являє собою механізм передачі енергії від

приводного двигуна до деякого навантаження. Як робоче тіло тут виступає атмосферне повітря, який може запасати енергію за допомогою компресора. Стиснутий компресором повітря надходить в пневмолінії, і далі до пневмодвигун (рисунок 2.4, б).



а) б)

Рисунок 2.4 – Гідравлічний та пневматичний приводи

Також як і у гідроприводу, тут є пневмодвигуни з поступальним рухом, поворотні двигуни і пневмомотори. Завдяки відсутності в'язкої середовища, такі двигуни можуть працювати на більшій частоті. Зокрема, швидкість обертання. Пневмомотор може досягати десятків тисяч обертів на хвилину.

До переваг пневмопривода можна віднести той факт, що робоче тіло не обмежена заданим обсягом і може поповнюватися в разі витоку. Власне і відсутність витоків у вигляді горючої рідини також можна назвати плюсом. Замість компресора можна також використовувати балон зі стисненим газом, що значно спрощує побудову пневматичної системи.

Однак, у даного типу актюаторов є і значні мінуси. По-перше, при стисненні і розширенні робочого газу, його температура сильно змінюється. Внаслідок цього, той же пневмомотор може обмерзати, покриватися інеєм. По-друге, ККД пневмопривода навіть нижче ніж у гідравлічного аналога. Ну і по-третє, що дуже важливо саме в робототехніки, пневмопривід має низьку плавність ходу і точність спрацьовування.

З огляду на наявних проблем, пневматичний актюатор раціонально використовувати для механізмів з двома станами. Наприклад, для дій закривання / відкривання, або втягування / виштовхування.

2.1.3 Складні і екзотичні актюатори

Існує актюатор у вигляді пневматичних м’язів, який по суті є пневмодвигуном, який для своєї роботи вимагає наявності повної пневматичної системи. На відміну від поширених пневмоцилиндров, м'язів робить поступальний рух за допомогою розширення в бічних напрямках, а не в поздовжньому. Це все ще не зовсім той принцип, який використовує біологічний м'язів, проте виглядає і діє такий привід вельми схожим чином.

Пневматичний м'язів складається з синтетичного волокна, що робить його дуже легким, на відміну від того ж пневмоцилиндра. М'язів також здатний відводити надлишкову енергію, завдяки чому взаємодія з людиною стає набагато безпечніше. Наприклад, якщо рука робота на основі пневмом'язів буде стискати руку людини, то вона не стане вкладати всю енергію саме в стиснення, а лише відведе надлишковий тиск в розширення тіла м'язів.

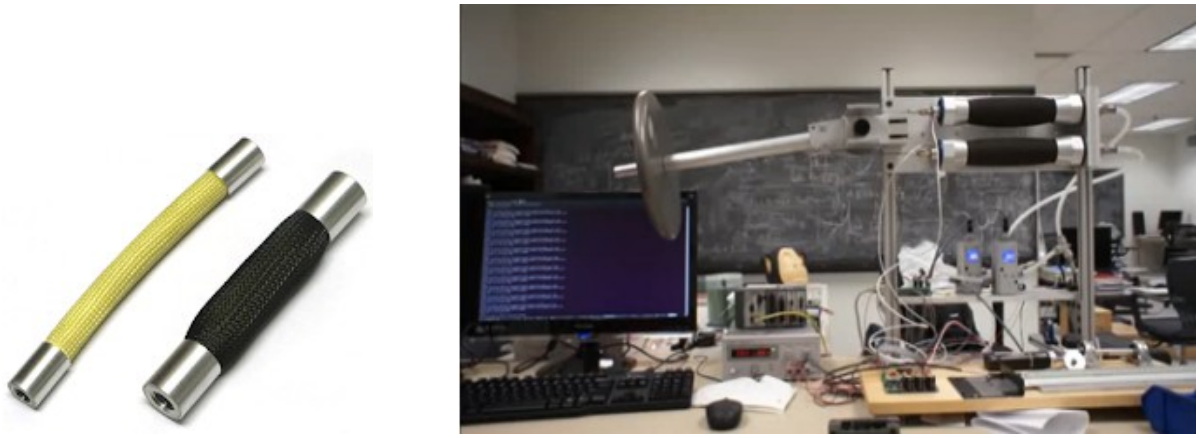


Рисунок 2.5 – Пневматичні м’язи

Існують актюатори на основі електроактивних полімерів (ЕАП, EAP), тобто полімерів, які здатні змінювати свій розмір і форму під впливом електричного поля. Існує кілька різних типів подібних матеріалів, включаючи:

- діелектричні ЕАП (Dielectric);
- сегнетоелектріческие полімери (Ferroelectric);
- полімери з включеннями електрострикційних композитів (Electrostrictive Graft Polymers);
- ЕАП на основі рідких кристалів (Liquid Crystalline Polymers);
- іонні ЕАП (Ionic EAPs);
- ЕАП на основі електрореологіческіх рідин (Electrorheological Fluid);
- іонні, метал-полімерні композити (Ionic polymer-metal composite).

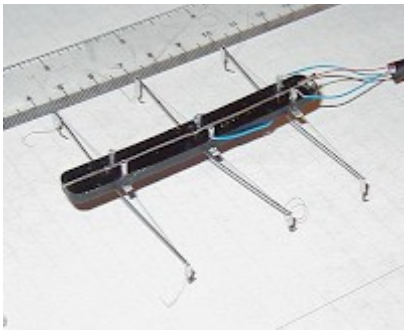
Актюатори на основі електроактивних полімерів мають величезний потенціал в робототехніці. На відміну, наприклад, від пневматичних м'язів, привід на основі полімерного матеріалу має більше спільного зі своїм біологічним прототипом. ЕАП-актюатори не мають обертових і ковзають частин, що позитивно впливає на їх зносостійкість і захищеність від зовнішнього середовища. Вони компактні, і можуть бути об'єднані в пучки з різними каналами управління, забезпечуючи динаміку, схожу з динамікою роботи живих м'язів (рис. 2.6).

Рисунок 2.6 – Актюатор на основі електроактивних полімерів

Важливим є і той факт, що ЕАП-актюатори перевершують інші приводи з мініатюризації. Зокрема, ЕАП можуть використовуватися в мікроелектромеханічних системах, розміри яких варіюються в діапазоні від одного до десятків мікрометрів. Пневматичний м'язів поряд з електроактивними полімерами, все частіше використовується в робототехніці як заміна класичним шестерінчастим, гідро- та пневмоприводам.

Ще одним цікавим матеріалом, на основі яких може бути виготовлений актюатор робота, є метал з ефектом пам'яті. Серед сплавів з таким ефектом, найбільш відомим є ніклід титану, або нитинол (NiTiNOL).

Ефект пам'яті нітінолу полягає в наступному. При низькій температурі, дріт з цього матеріалу поводиться точно також як звичайна дріт з м'якого металу. Його можна згинати і розтягувати, і при цьому вона не буде чинити опір такому впливу. При нагріванні, нітіноловий дріт почне повертатися в своїй початковий стан, в якому він був виготовлений. Наприклад, розтягнута спіраль з нікелідатитану, при нагріванні буде стискатися. На основі металу з пам'яттю засновані актюатори такого відомого робота як Stiquito. При подачі напруги на тонкі нітінолових нитки, останні починають стискатися, передаючи рух нозі робота. Згодом остигає і нога повертається в свій початковий стан.



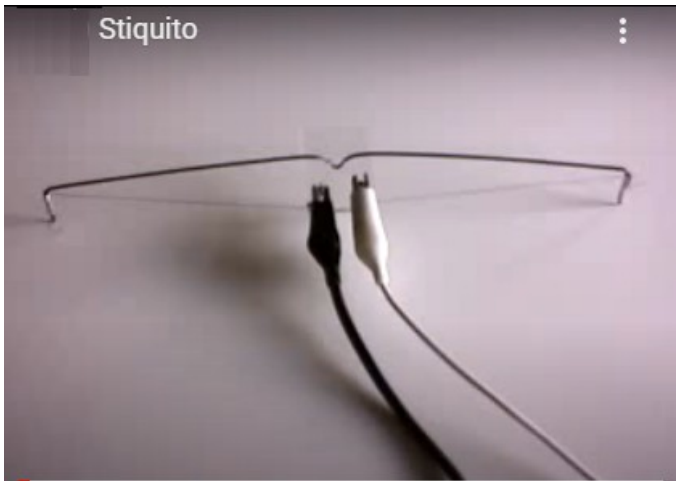


Рисунок 2.7 – Металеві конструкції з ефектом пам'яті

До серйозного недоліку подібних актюаторів, можна віднести їх повільність. Крім того, якщо нагрів матеріалу можна забезпечити пропусканням через нього струму, то забезпечити його швидке охолодження далеко не так просто. Ці два фактори, а також чимала ціна нітінолу, знижують його цінність для широкого застосування.

2.2 Особливості актюаторів та використання актюаторних компонентів в MEMS

Метою мікроактивації є отримання сили, яка могла б виробляти механічне переміщення. У порівнянні з електромагнітним перетворенням енергії, яке переважає в традиційній інженерії рухомих механізмів, в мікроактивації можна використовувати багато інших принципів, які за функціональними або ціновими характеристиками було неефективно використовувати в макротехнологіях.

Накопичена енергія і/або щільність енергії має ключове значення для оцінки працездатності будь-якого актюатора. Так як будь-яке перетворення енергії пов'язано з втратами, то і працездатність також пропорційна коефіцієнту корисної дії, з яким одна форма енергії може бути перетворена в іншу.

Потужність і працездатність системи характеризується також часом, який необхідний для отримання та витрати запасу енергії. Цей часовий інтервал може бути оцінений по тимчасовій константі, яка є характерною для конкретного принципу активації.

Основні методи, що використовуються при отриманні активації: рух, деформація, приведення в дію в таких пристроях можуть бути зведені до наступних методів: електростатичний, магнітний, п'єзоелектричний, гідравлічний, тепловий.

Електростатична активація застосовується приблизно в однієй третині актюаторів, і, ймовірно, це найбільш загальний і добре налагоджений метод. Його головні недоліки - це знос і злипання. Магнітні актюатори зазвичай вимагають відносно великого значення електричного струму, тобто значну кількість енергії. Теплові актюатори теж споживають відносно велику кількість електричної енергії і головний їх недолік в тому, що велика частина тепла розсіюється.

В даний час розробляються мікроактюатори, засновані на ефекті пам'яті форми, які можуть бути зменшені до субмікронних розмірів.

Правила пропорційної мініатюризації призводять до факту, що на мікрорівні поверхневі сили в порівнянні з об'ємними мають більше значення.

З цього випливає, що для мікроактюаторів тертя має дуже велике значення. Крім того, через свою малу масу мікромеханічні елементи мають малу силу інерції, що веде до високих динамічних характеристик, і отже вони часто працюють з високою робочою частотою і швидкістю.

З одного боку тертя веде до втрат, які є причиною погіршення функціонування елементів, з іншого боку тертя призводить до зносу, який негативно впливає на функціональну поведінку і веде до прискореного старіння і, в кінцевому рахунку, поломки компонента. Тертя є ключовим фактором, який визначає не тільки ефективність, але і довговічність. Однак тертя не завжди супроводжується зносом, можливо тертя і без зносу. Важливі фактори, що впливають на величину тертя: стан поверхні актюатора, поверхнева топологія і взаємодіючі матеріали.

Діапазон застосування мікроактюаторов надзвичайно широкий і різний, і він постійно зростає. Вони використовуються в робототехніці, в керуючих пристроях, в космічній галузі, в біомедицині, дозиметрії, в вимірювальних приладах, в технологіях для розваг, автомобілебудуванні тощо.

Сучасні актюатори включають: мікродвигуни (електростатичні, пьезо-, вібраційні, рідинні і твердотільні реактивні, імпульсної дії), Мікродозатори,

мікропозіціонери, засоби інтроскопії, неінвазивні засоби вивчення внутрішніх органів і мозку людини, цільової доставки ліків і іншу унікальну медичну апаратуру.

Окремим напрямком можна вважати мікроробототехніку та її медичні, військові, космічні мікро- і наноустройства, мобільні роботи для різних середовищ, розподілені робототехнічні пристрої, біологічні та біоподобні роботи.

2.3 Технологія Multi Actuator жорсткого диску

Технологія Multi Actuator жорсткого диску забезпечує точність позиціонування головок читання-запису щодо поверхні магнітних дисків. Традиційно в жорстких дисках, навіть в найсучасніших, є електромагнітний пристрій актюатор, він же соленоїд, який позиціонує головки жорсткого диску щодо всієї поверхні магнітних пластин, які обертаються всередині накопичувача. У такого актюатора є межа точності позиціонування голівок. Компанією Seagate був розроблений мініатюрний актюатор, що дозволяє позиціонувати головку з дуже високою точністю, до декількох нанометрів. Такі актюатори також називають наноактюаторами.

Звичайно, діапазон позиціонування голівок наноактюаторами вкрай малий і початкове позиціонування забезпечує загальний для всіх головок актюатор, а вже потім більш точне позиціонування виробляє наноактюатор. У кожної голівки свій наноактюатор (рис. 2.8).

Принцип роботи актюатора – п'єзоелектричний. Принцип дії п'єзоелектричних актюаторів заснований на використанні зворотного п'єзоелектричного ефекту – виникненні механічної деформації під дією електричного поля.

Технологія Multi Actuator є ексклюзивною для Seagate, відрізняється від конкуруючих технологій завдяки використанню двох елементів приводу, а не одного, забезпечуючи більший хід і діапазон руху для приводу. В ході

розробки технології Multi Actuator компанія Seagate також використовувала розробку алгоритмів і передову теорію управління, яка використовується в високотехнологічних військових і аерокосмічних застосунках, для вдосконалення конструкції мікроскопічного сервоприводу.

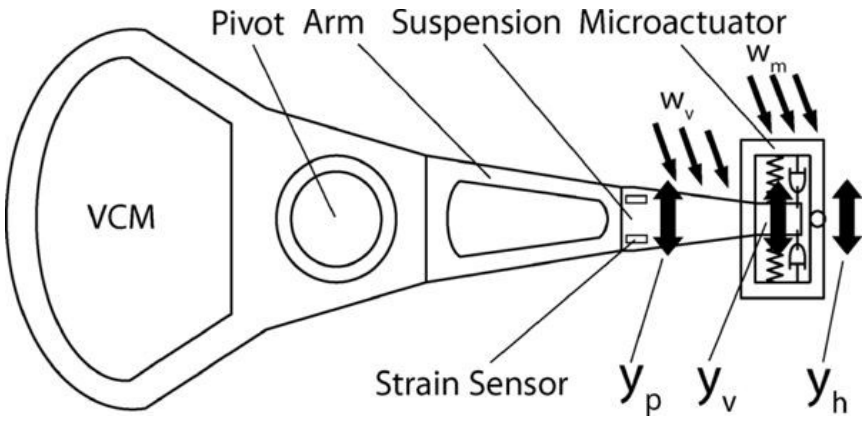


Рисунок 2.8 - Схематичне зображення важеля для позиціонування голівки з наноактюатором

Орієнтуючись на сучасні технологічні тенденції, Seagate працює над створенням технології Multi Actuator, що дозволяє подвоїти продуктивність жорстких дисків нових поколінь і підвищити ефективність гіпермасштабуємих центрів обробки даних (рис. 2.9).

Рисунок 2.9 – Multi Actuator компанії Seagate

Технологія Multi Actuator здатна вивести на новий рівень продуктивність критично важливих додатків і гарантувати клієнтам Seagate можливість ефективної обробки постійно зростаючих обсягів інформації.

Актюатором називається компонент жорсткого диска, який переміщує магнітні голівки відносно поверхні носія для зчитування і запису даних. В сучасних дисках актюатор виконується у вигляді єдиного конструктивного вузла, що забезпечує синхронний рух всіх голівок, кожна з яких встановлена на кінці штанги актюатора.

Перше покоління технології Multi Actuator від Seagate надає можливість оснащувати жорсткі диски двома незалежними вузлами актюаторів, що мають загальний центр повороту. Кожен з них здійснює управління половиною штанг і голівок.

Це дозволяє розділити один фізичний диск на два незалежних пристрої, здатних одночасно виконувати різні операції читання і запису. Жорсткий диск, таким чином, отримує можливість подвоїти продуктивність при збереженні початкової «одноактюаторної» ємності.

Впроваджуючи технології запису з енергетичною підтримкою (Energy Assisted Magnetic Recording, EAMR), такі як магнітний запис з нагріванням носія (Heat-Assisted Magnetic Recording, HAMR), в Seagate прагнуть до експоненціального зростання ємності дискових накопичувачів.

Однак до сих пір в центрах обробки даних не вдавалося помітно збільшити продуктивність більшості додатків тільки за рахунок збільшення ємності зберігання через обмеження в ефективності виконання операцій введення-виведення. Два актюатора в жорстких дисках вирішують цю проблему. Вони забезпечують значне зростання показника IOPS (Input/Output Operations per Second), дозволяють провайдерам хмарних послуг використовувати переваги накопичувачів підвищеної ємності.

Технологія магнітного запису з нагріванням носія Heat-Assisted Magnetic Recording (HAMR) забезпечує значне збільшення ємності дисків за рахунок нового виду покриття, що дозволяє зменшити розміри магнітної

області, що зберігає один біт даних, і розташувати біти надзвичайно близько один до одного. Технологія Multi Actuator поширює на дискові накопичувачі ідеологію паралелізму. Тепер хост-комп'ютер отримує можливість працювати з кожним диском як з двома незалежними накопичувачами. Технологія Multi Actuator докорінно покращує конструктивні рішення, використовувані в жорстких дисках, дозволяє формувати в кожному накопичувачі незалежні потоки даних, вдвічі збільшуючи продуктивність операцій введення-виведення.

Паралелізм – це стратегія побудови IT-архітектури, в рамках якої хост-комп'ютер направляє одночасно безліч запитів на виконання операцій різними пристроями. Така організація обчислювального процесу істотно прискорює виконання робочих завдань. Для ефективного використання даних необхідно також підвищувати швидкість доступу до дисків. Тому створення сучасних пристроїв зберігання вимагає одночасного зростання їх ємності і продуктивності. Ємність і вартість накопичувачів пов'язані, як правило, лінійної залежністю. Однак на підвищення продуктивності виявляє помітний вплив також специфіка робочого навантаження і архітектура системи зберігання кожного конкретного клієнта. Жорсткі диски мають бути оптимізовані за показником IOPS/TB при мінімальній вартості зберігання терабайта даних. У технічних термінах це означає оптимізацію показника IOPS і зниження затримок в режимі випадкового виконання операцій введення-виведення, а також підвищення швидкодії в режимі послідовної передачі даних.

Спільне використання технологій HAMR і Multi Actuator в дисках Seagate забезпечує кардинальне поліпшення найважливіших параметрів дискових накопичувачів, надаючи споживачам доступ до жорстких дисків принципово нового рівня, що відповідає вимогам сучасних центрів обробки даних.

3 ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ ЖОРСТКИХ ДИСКІВ ПК

3.1 Вузли жорсткого диску

Сучасні накопичувачі на жорстких магнітних дисках практично всі складаються з одних і тих же вузлів (рис. 3.1):

– диски з нанесеним на їх поверхню оксидним або тонкоплівковим магнітним робочим шаром, кількість дисків зазвичай від 1 до 5 (максимум 11), діаметр дисків 5,25 / 3,5 / 2,5 / 1,8 або 1,0 дюйм) ;

– головки читання/запису (кількість 3-10 шт., використовуються композитні феритові головки з металом в зазорі, тонкоплівкові, магніторезистивні, головки GMR виготовлені за технологією високої магніторезистивності);

– механізм приводу головок (привод з рухомою котушкою, як правило, поворотний з сервосистемою стеження, що використовує сервоінформацію на спеціальному диску, на диску з вбудованими кодами або із записом сервоінформації в другому магнітному шарі);

– двигун приводу дисків (шпиндельний двигун 7200 і більше оборотів за хвилину з автоматичною системою регулювання швидкості обертання зі зворотним зв'язком);

– повітряний фільтр (фільтр рециркуляції і барометричний фільтр).

Друкована плата зі схемами управління (плата електроніки містить схеми, управління накопичувача і практично майже всі схеми виконують функції контролера жорсткого диска), кабелі та роз'єми (інтерфейсний роз'єм, роз'єми електроживлення, управління двигуном шпинделя, затиск або роз'єм заземлення) відносяться до електронних компонентів жорстких дисків.

Рисунок 3.1 – Вузли жорсткого диску

Диски, двигун приводу дисків, головки і механізм приводу голівок зазвичай розміщуються в герметичному корпусі, який називається HDA (Head Disk Assembly - блок головок і дисків). Зазвичай цей блок розглядається як єдиний вузол; його майже ніколи не розкривають. Інші вузли, що не входять в блок HDA, - друкована плата, лицьова панель, елементи конфігурації і монтажні деталі - є знімними.

В якості основного матеріалу для жорсткого диску в даний час використовується скло (композитний матеріал на основі скла і кераміки, він значно міцніше, ніж кожен з його компонентів окремо). Скляні диски відрізняються більшою міцністю і жорсткістю, у порівнянні з дисками, що вироблялися раніше з алюмінієвого сплаву , тому їх можна зробити в два рази тонше алюмінієвих, а іноді ще тонше. Крім того, вони менш сприйнятливі до перепадів температур, тобто їх розміри при нагріванні і охолодженні змінюються дуже незначно. В даний час в деяких накопичувачах, що випускаються такими фірмами, як IBM, Seagate, Toshiba, Technology і Maxtor, широко використовуються скляні або склокерамічні диски.

Всі жорсткі диски покриваються тонким шаром речовини, що здатна зберігати залишкову намагніченість після впливу зовнішнього магнітного поля. Цей шар називається робочим або магнітним, і саме в ньому зберігається записана інформація. У сучасних моделях накопичувачів використовуються тонкоплівкові диски.

Тонкоплівковий робочий шар має малу товщину, він має високі міцність і якість покриття. Ця технологія є в основі виробництва накопичувачів нового покоління, в яких вдалося істотно зменшити величину зазору між голівками і поверхнями дисків, що дозволило підвищити щільність запису. Спочатку тонкоплівкові диски використовувалися тільки в високоякісних накопичувачах великої ємності, але зараз вони застосовуються практично у всіх накопичувачах. Це покриття набагато тонше, ніж оксидне.

Тонкоплівковий робочий шар називають також гальванізованим або напиленням, оскільки наносити тонку плівку на поверхню дисків можна по-різному. Тонкоплівковий гальванізований робочий шар отримують шляхом електролізу. Робочим шаром служить шар зі сплаву кобальту завтовшки всього близько 3 мікродюймів (приблизно 0,08 мкм).

3.2 Головки зчитування-запису

У міру розвитку технології удосконалювалися і конструкції головок читання-запису (рис 3.2). За минулі роки конструкції головок пройшли шлях розвитку від головок з феритовими сердечниками до сучасних типів.

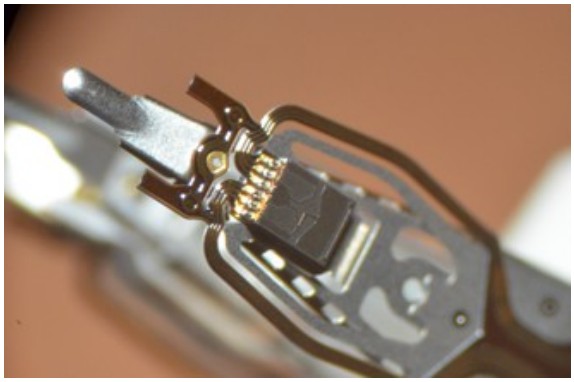


Рисунок 3.2 – Головки зчитування-запису

Найчастіше використовуються головки наступних типів:

– стеклоферитові (або композитні);
– з металом у зазорі (MIG);
– тонкоплівкові (TF);
– магніторезистивні (MR) або високомагніторезістівні (GMR).

Класичні феритові головки створювались на основі пресованого фериту (на основі окису заліза). Магнітне поле в зазорі виникає при протіканні через обмотку електричного струму. У свою чергу, при змінах напруженості магнітного поля поблизу зазору в обмотці наводиться електрорушійна сила. Таким чином, головка є універсальною і може використовуватися як для запису, так і для зчитування.

Стеклоферитові головки широко використовувалися в таких накопичувачах, як ST-225 фірми Seagate. У міру збільшення ємності накопичувачів феритові головки були повністю витіснені іншими різновидами. Феритові головки непридатні для запису на носії з великою коерцитивної силою, їх частотна характеристика обмежена, а чутливість низька.

У головках з металом у зазорі (Metal-In-Gap - MIG) магнітний зазор, розташований в задній частині стеклоферитового сердечника, заповнений металом, за рахунок цього суттєво зменшується схильність матеріалу сердечника до магнітного насичення, що дозволяє підвищити магнітну індукцію в робочому зазорі і, отже, виконати запис на диск з більшою щільністю. Крім того, на поверхні диска формуються намагнічені ділянки з більш чітко вираженими межами (зменшується ширина зон зміни знака). Ці головки дозволяють використовувати носії з великою коерцитивної силою і тонкоплівковим робочим шаром. Головки мають меншу масу і поліпшену аеродинамічну форму.

Завдяки своїм перевагам головки з металом в зазорі повністю замінили традиційні стеклоферитові голівки в високоякісних накопичувачах. В даний час використовуються тонкоплівкові голівки.

Тонкоплівкові (Thin Film – TF) головки виробляються шляхом фотолітографії за тією ж технологією, що і інтегральні схеми. На одній підкладці "друкують" відразу кілька тисяч голівок, які виходять в результаті мініатюрними і дуже легкими. Робочий зазор в тонкоплівкових голівках можна зробити дуже вузьким, причому його ширина регулюється в процесі виробництва шляхом нарощування додаткових шарів немагнітного алюмінієвого сплаву. Алюміній повністю заповнює робочий зазор і добре захищає його від пошкоджень (відколів країв) при випадкових контактах з диском. Сердечник робиться зі сплаву заліза і нікелю, індукція насичення якого в 3 – 5 разів більше, ніж у фериту.

В результаті, підвищується залишкова намагніченість ділянок поверхні носія і збільшується амплітуда сигналу. Поліпшується співвідношення "сигнал-шум" в режимі зчитування, що підвищує достовірність запису і зчитування даних. Завдяки невеликій висоті тонкоплівкових голівок при тих же розмірах корпусу накопичувача вдається встановити більшу кількість дисків.

Тонкоплівкові головки використовувалися в більшості накопичувачів високої ємності, їх конструкція і характеристики постійно поліпшувалися. З часом були створені магніторезистивні голівки (рис. 3.3).

Магніторезистивні (Magneto-Resistive - MR) головки розроблені фірмою IBM порівняно недавно, і їх використання дозволяє домогтися найвищих значень щільності запису і швидкодії накопичувачів. У більшості накопичувачів формату 3,5 дюйма, ємність яких перевищує 1 Гбайт, використовуються саме такі головки. У міру підвищення поверхневої щільності запису сфера застосування магніторезистивних головок буде розширюватися, і поступово вони зовсім витіснять тонкоплівкові головки.

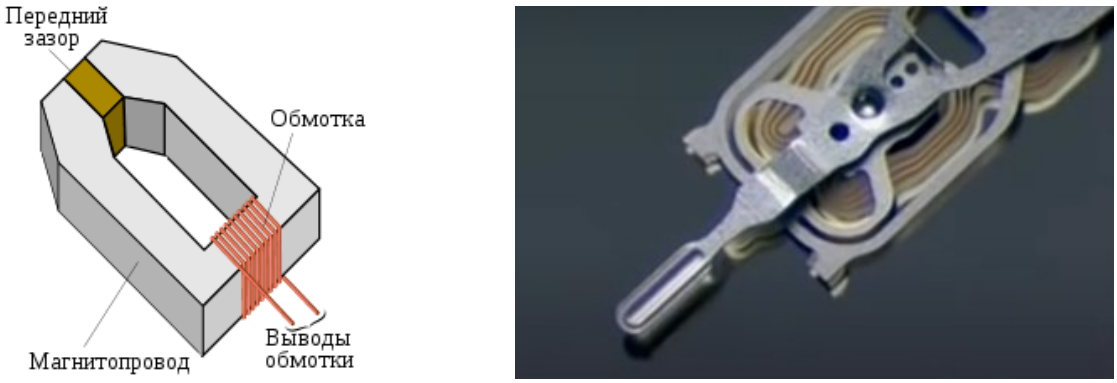


Рисунок 3.3 – Магніторезистивна головка запису-зчитування

Робота магніторезистивних головок грунтується на тій обставині, що опір провідника незначно змінюється під впливом зовнішнього магнітного поля. При проходженні магніторезистивної голівки над ділянками з різним значенням знака залишкової (постійної) намагніченості (при зчитуванні даних) її опір виявляється різним. Через головку протікає невеликий постійний вимірювальний струм, і при зміні опору змінюється і падіння напруги на ній. Амплітуда вихідного сигналу головки виявляється приблизно в три рази більше, ніж у тонкоплівковій. Магніторезистивні головки дорожче і складніше головок інших типів, оскільки в їх конструкції є додаткові елементи, а технологічний процес виготовлення включає кілька додаткових етапів. Основні відмінності магніторезистивних головок від звичайних:

– до головок повинні бути підведені додаткові дроти для подачі вимірювального струму на резистивний датчик;

– в процесі виробництва використовується 4 - 6 додаткових масок (фотошаблонів);

– завдяки високій чутливості магніторезистивні головки більш сприйнятливі до зовнішніх магнітних полів, тому їх доводиться ретельно екранувати.

Для поліпшення параметрів головки в режимі зчитування потрібно зменшувати ширину зазору (для збільшення роздільної здатності), а під час запису зазор повинен бути ширше, оскільки при цьому магнітний потік

проникає в робочий шар на велику глибину, "намагнічуючи" його по всій товщині. У магніторезистивних головках з двома зазорами кожен з них може бути зроблений оптимальної ширини. Записуюча (тонкоплівкова) частина головки формує на диску ширші доріжки, ніж це необхідно для роботи пристрою вузла, що зчитує (магніторезистивного). На сьогоднішній день магніторезистивні головки встановлюються в накопичувачах великої ємності та знайшли широке застосування.

3.3 Механізм приводу головок

Найважливішим вузлом накопичувача є механізм приводу головок, який встановлює їх в потрібне положення. З його допомогою головки переміщаються від центру диска до його країв і встановлюються на заданий циліндр. Всі головки змонтовані на загальному рухомому каркасі і переміщуються одночасно.

Конструкція каркаса з головками досить проста. Кожна головка встановлена на кінці важеля, закріпленого на пружині і злегка притискає її до диску. Диск як би затиснутий між парою головок зверху і знизу.

На рис. 3.4 показана стандартна конструкція механізму приводу головок з рухомою котушкою. Тип приводу з рухомою котушкою багато в чому визначає швидкодію і надійність накопичувача, достовірність зчитування даних, його температурну стабільність, чутливість до вибору робочого положення і вібрацій. Всі сучасні накопичувачі є з приводами на основі рухливих котушок.

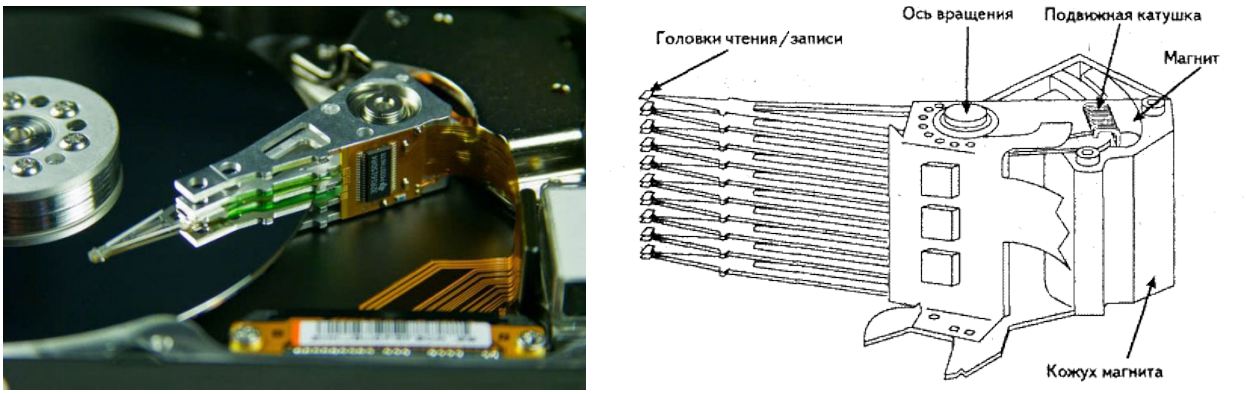


Рисунок 3.4 – Конструкція механізму приводу головок з рухомою котушкою

Привод з рухомою котушкою використовується практично у всіх сучасних накопичувачах. У приводі використовується сигнал зворотного зв'язку з метою точного визначення положення головок щодо доріжок і з метою скорегувати їх в разі потреби. Така система дозволяє забезпечити більш високу швидкодію, точність і надійність.

Привод з рухомою котушкою працює за принципом електромагнітного соленоїда. У типовій конструкції приводу рухлива котушка жорстко з'єднується з блоком головок і розміщується в полі постійного магніту. Котушка і магніт не пов'язані між собою (немає сил тертя), а переміщення котушки здійснюється тільки під впливом електромагнітних сил. При появі в котушці електричного струму вона зміщується щодо жорстко закріпленого постійного магніту, пересуваючи при цьому блок головки.

В пристроях з рухомою котушкою немає заздалегідь зафіксованих положень. Замість цього в них використовується спеціальна система наведення (позиціонування), яка точно підводить головки до потрібного циліндра (тому привід з рухомою котушкою може плавно переміщати головки в будь-які положення). Ця система називається сервоприводом (рис. 3.5), і основна її перевага в тому, що для точного наведення (позиціонування) головок використовується сигнал зворотного зв'язку, що має інформацію про реальне взаємне розташування доріжок і головок. Дану

систему часто називають системою зі зворотним зв'язком (або з автоматичним регулюванням).

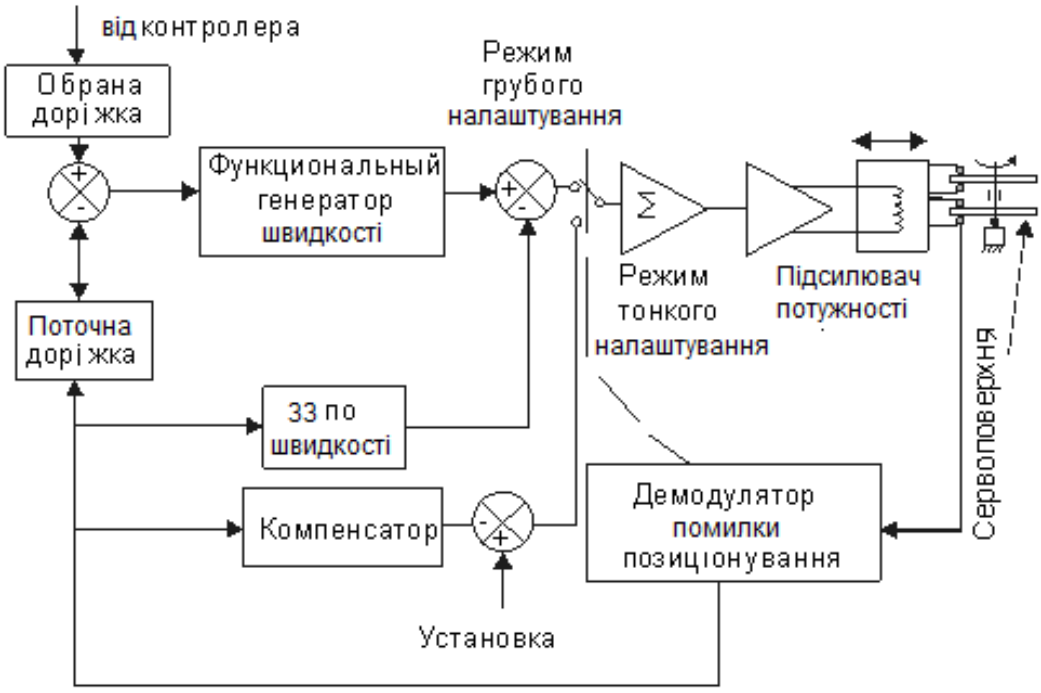


Рисунок 3.5 – Модель системи сервоприводу для точного наведення (позиціонування) головок з автоматичним регулюванням

Коливання температур не позначаються на точності роботи приводу з рухомою котушкою і зворотним зв'язком. При стисненні і розширенні дисків всі зміни їх розмірів відслідковуються сервоприводом, і положення головок коригуються належним чином. Для пошуку конкретної доріжки використовується заздалегідь записана на диску допоміжна інформація (сервокод), і в процесі роботи завжди визначається реальний стан циліндра на диску з урахуванням всіх відхилень температур. Сервокод зчитується безперервно в процесі нагрівання накопичувача і розширення дисків, головка відстежує доріжки постійно, і проблем зі зчитуванням даних не виникає. Привід з рухомою котушкою і зворотним зв'язком часто називають системою стеження за доріжками. Механізми приводу головок з рухомою котушкою

бувають двох типів (ці типи відрізняються тільки фізичним розташуванням магнітів і котушок): лінійний і поворотний.

Система позиціонування порівнює номер циліндра, що надходить від контролера, на який потрібно встановити головки, а поточна адреса доріжки зчитується з сервоповерхні. Залежно від різниці цих значень контролер визначає напрямок переміщення блоку головок і виробляє сигнал для управління струмом рухомої котушки, що викликає її переміщення в потрібному напрямку і надає руху пов'язаний з нею механізм приводу головок. Під час руху блоку головок триває обчислення різниці номеру заданого і поточного циліндрів, і пропорційно різниці формується струм в обмотку котушки. При виявленні необхідної доріжки подається команда на припинення руху блоку головок і він зупиняється в околицях шуканої доріжки. Далі сервосистема здійснює тонке налаштування позиції таким чином, щоб перед операціями обміну головки розташовувалися точно над доріжкою, де сигнали, які зчитуються сервоголовкой є максимальними.

Лінійний привод переміщує головки по прямій лінії, строго уздовж лінії радіуса диска. Котушки розташовуються в зазорах постійних магнітів. Головне достоїнство лінійного приводу полягає в тому, що при його використанні не виникають азимутальні похибки, що характерні для поворотного приводу. (Під азимутом розуміється кут між площиною робочого зазору головки і напрямком доріжки запису.) При переміщенні з одного циліндра на інший головки не повертаються, і їх азимут не змінюється.

В даний час поворотний привод використовується майже у всіх накопичувачах з рухомою котушкою. Поворотний привід працює за тим же принципом, що і лінійний, але в ньому до рухомої котушки кріпляться кінці важелів головок. При русі котушки щодо постійного магніту важелі переміщення головок повертаються, пересуваючи головки до осі або до країв дисків. Завдяки невеликій масі така конструкція може рухатися з великими прискореннями, що дозволяє істотно скоротити час доступу до даних.

Швидкому переміщенню головок сприяє і той факт, що плечі важелів робляться різними - той, на якому змонтовані головки, має велику довжину. До недоліків цього приводу слід віднести те, що головки при переміщенні від зовнішніх циліндрів до внутрішніх повертаються і кут між площиною магнітного зазору головки і напрямком доріжки змінюється. Саме тому ширина робочої зони диска (зони, в якій розташовуються доріжки) виявляється найчастіше обмеженою.

Для управління приводами з рухомою котушкою в різний час використовувалися три способи побудови петлі зворотного зв'язку:

– системи з допоміжним "клином";

– системи з вбудованими кодами;

– системи з спеціалізованим диском.

Способи розрізняються технічною реалізацією, але призначені для досягнення однієї і тієї ж мети - забезпечувати постійне коректування положення головок і їх наведення (позиціонування) на відповідний циліндр. Основні відмінності між ними в тому, на яких ділянках поверхонь дисків записуються сервокоди. При всіх способах побудови петлі зворотного зв'язку для її роботи необхідна спеціальна інформація (сервокоди), яка записується на диск при його виготовленні. Зазвичай вона записується в так званому коді Грея. У цій системі кодування при переході від одного числа до наступного або попереднього змінюється всього один двійковий розряд. При такому підході інформація зчитується і обробляється набагато швидше, ніж при звичайному двійковому кодуванні, і визначення місця розташування головки відбувається практично без затримки. Сервокоди записуються на диск при складанні накопичувача і не змінюються протягом всього терміну його експлуатації.

Запис сервокодів виконується на спеціальному пристрої, в якому головки послідовно переміщаються на строго певні позиції, і в цих положеннях на диски записуються вищезгадані коди. Для точної установки головок в таких пристроях використовується лазерний приціл, а відстані

визначаються інтерференційним методом, тобто з точністю до часток хвилі лазерного випромінювання.

У багатьох сучасних накопичувачах з приводом від рухомої котушки в процесі роботи через певні проміжки часу виконується температурне калібрування. Ця процедура полягає в тому, що всі головки по черзі переводяться з нульового на який-небудь інший циліндр. При цьому за допомогою вбудованої схеми здійснюється перевірка, наскільки змістилася задана доріжка щодо свого положення в попередньому сеансі калібрування, і обчислюються необхідні поправки, які заносяться в оперативний пристрій в самому накопичувачі.

Одною з переваг приводу з рухомою котушкою є автоматична парковка головок. Коли живлення включено, головки позиціонуються і утримуються в робочому положенні за рахунок взаємодії магнітних полів рухливої котушки і постійного магніту.

4 МОДЕЛЮВАННЯ МЕМС-АКТЮАТОРА в Matlab Simulink

4.1 Автоматизація проектування МЕМС з використанням Matlab Simulink

Процес складання опису, необхідного для створення в заданих умовах ще неіснуючого об'єкта, на основі первинного опису цього об'єкта і/або алгоритму його функціонування, що включає в себе комплекс робіт з пошуку, дослідження, розрахунків, моделювання та конструювання називається проектуванням. Проектування - це складний специфічний вид творчої діяльності людини, заснований на глибоких наукових знаннях і творчому пошуку, використанні накопиченого досвіду і навичок у певній сфері.

Автоматизація проектування МЕМС передбачає систематичне використання засобів обчислювальної техніки при раціональному розподілі функцій між проектувальником та ЕОМ і обґрунтованому виборі методів машинного рішення задач.

На початковому етапі проектування МЕМС відбувається опис мікросистеми, що включає як електричні параметри системи, так і механічні. Наступний крок передбачає проектування електричної схеми вбудованої системи з подальшим її аналізом за допомогою відповідних програмних засобів [4]. За результатами побудови першого наближення електричної схеми мікросистеми відбувається проектування конструкції механічної складової з подальшим моделюванням її вихідних характеристик. Такий аналіз дозволяє уточнити електричну схему заміщення та інтегрувати її у загальну схему виробу. Ітераційний процес продовжується доти, поки всі вихідні електричні та механічні параметри не будуть задовольняти технічному завданню. Після цього проектування передбачає виготовлення та тестування мікросистеми.

Враховуючи те, що МЕМС є наукоємними пристроями, їх ефективне проектування неможливе без використання нових інформаційних технологій, програмних засобів, методів, моделей, методологій і алгоритмів.

Основою САПР є математичні моделі, як множина математичних об’єктів і відношень між ними, що адекватно відображають конкретні властивості МЕМС. Якщо в проектуванні використовують різні рівні абстрагування, то такий підхід називається багато масштабним моделюванням. В залежності від послідовності процедур і етапів розрізняють низхідний, висхідний і змішані етапи проектування. Послідовність розв’язування задач від нижніх рівнів до верхніх характерна для висхідного проектування. Зворотний напрям – це низхідне проектування. Для проектування МЕМС потрібні інтегровані системи, що включають в себе:

– проектування на компонентному рівні;

– проектування на міждисциплінарному рівні;

– проектування електронних компонент;

– проектування з врахуванням забезпечення надійного функціонування.

Для розв’язання задач проектування МЕМС, як правило, використовується блочно-ієрархічний підхід, який передбачає використання принципу ієрархічності для структурування представлень про об’єкти за ступенем деталізації описів та принцип декомпозиції (блочності, модульності) для розбиття представлень кожного рівня на складові (довершені блоки) з можливістю їх поблокового проектування.

Системою в загальному вигляді називають об’єктивну єдність закономірно зв’язаних між собою об’єктів і явищ. Якісно оцінюючи складність систем, розрізняють великі системи, вбудовані системи, підсистеми, комплекси, пристрої.

Оскільки МЕМС є складною системою то верхній рівень проектування можна розбити на блоки нижчого рівня проектування, і це буде другий рівень. Блоки другого рівня також є складними об’єктами і їх можна

розглядати як системи відносно до блоків третього рівня та доцільно з технічного погляду, розділити на простіші блоки. В результаті кожний блок другого рівня можна описати як об’єднання блоків третього рівня. При потребі можна використовувати блоки четвертого і нижчих рівнів. Так процес продовжується доти, поки блоки m-го рівня вже недоцільно з певних міркувань піддавати декомпозиції на простіші. Блоки найнижчого рівня, як правило, називають базовими елементами. Поділ на блоки виконується, як правило, за функціональною ознакою. Тобто, у випадку побудови елементів МЕМС, де для розроблення використовують три рівні на відміну від розроблення інтегральних схем (розроблення підсистеми обробки, збереження та передавання даних), перший рівень – МЕМС з набором функцій зазначених у технічному завданні, блоки другого рівня – це пристрої для контролю за станом навколишнього середовища, для збирання, опрацювання, збереження та видавання керуючих сигналів, пристрої для впливу на навколишнє середовище та ін., а блоки третього рівня – балки, пружини, інерційні маси, інтегральні транзистори, резистори, конденсатори тощо.

У процесі розробки МЕМС переважно використовують класичне багаторівневе ієрархічне проектування “згори донизу”, “знизу догори”, паралельне їх поєднання, наскрізне тощо. Процес автоматизованого проектування мікросистем з врахуванням особливостей розроблення підсистеми збирання, опрацювання, збереження та видавання керуючих сигналів у формі інтегральної схеми передбачає чотири рівні, які мають класичні назви: перший – системний, другий – функціональний, третій – схемотехнічний, а четвертий – компонентний (рис. 4.1) [4,6].

Рисунок 4.1 – Рівні проектування МЕМС

На системному рівні проектування розробляється технічне завдання для проектування вбудованої системи, на основі аналізу додаткових функцій, які належить виконувати вбудованій системі.

На сучасному етапі автоматизованого проектування саме електромеханічних, електромагнітних, п’єзоелектричних, електротеплових та інших елементів мікросистемної техніки використовується три рівні, тобто: системний, схемотехнічний та компонентний. Відповідно, відсутній функціональний рівень. Складність фізичних процесів, які проходять в цих пристроях з мікронними розмірами, жорсткі вимоги до точності їх виготовлення (допуски на конструктивні параметри елементів мікросистемної техніки жорсткіші, ніж на елементи електронних схем). Багатофункціональність елементів конструкції, необхідність оцінювання принципової можливості функціонування пристрою та можливості його реалізації за допомогою існуючих технологій, особливо в процесі проектування нових елементів МЕМС потребують розв’язання задач, що знаходяться між системним та схемотехнічним рівнями, що представляють собою задачі кінематики в механіці, які можна віднести до функціонального рівня проектування та задачі, пов’язані з розробленням алгоритмічного забезпечення МЕМС та інші задачі.

Розроблено спеціалізовані системи моделювання і проектування МЕМС – CoventorWare, EM3DS (Coventors, Inc.) IntelliSuite (IntelliScience Corp.), MEMCAD ((Microcosm Technologies Inc.) MEMS Pro (Tanner Research Inc.) NODAS (Carnegie Mellons University MEMS LAB). При моделюванні на мікрорівні використовуються універсальні програми ANSYS (ANSYS,Inc.) NASTRAN (MSC.Software Corp.) Abaqus (Dassault Systems), COMSOL Multiphysics (раніше Femlab, Comsol Inc.), які дозволяють розв'язувати задачі механіки деформованого тіла і механіки конструкції, механіки рідини і газу, теплопередачі і теплообміну, електродинаміки і акустики, тощо. SUGAR (University of California, Beerkly) має в собі бібліотеку МЕМС для системи Matlab.

При проектуванні МЕМС застосовується метод імітаційного моделювання. Метод імітаційного моделювання – це чисельний метод проведення на обчислювальних машинах з математичними моделями, що описують поведінку складних систем протягом тривалих періодів часу. Принципова відмінність імітаційного експерименту від реального полягає в тому, що в процесі імітації експеримент проводиться не з самою системою, а з її моделлю.

Імітаційне моделювання застосовується при необхідності спостереженні зміни середніх значень вихідних змінних протягом певного проміжку часу. За допомогою методу імітаційного моделювання можуть бути побудовані моделі, що відображають велику сукупність елементів даної системи. Імітаційне моделювання вільно від обмежень, властивих аналітичним методам, на імітаційної моделі можна провести експерименти, які на реальному об'єкті по ряду причин провести неможливо. Імітаційне моделювання дозволяє проводити довготривалі експерименти шляхом стиснення тимчасової шкали.

Система імітаційного моделювання Simulink є компонентом інтегрованого середовища інженерних розрахунків Matlab компанії MathWorks.

Simulink поєднує в собі наочність аналогових машин і точність цифрових обчислювальних машин. Simulink забезпечує користувачеві доступ до всіх можливостей пакета Matlab, в тому числі до великої бібліотеки чисельних методів.

Пакет Simulink дозволяє здійснювати дослідження (моделювання у часі) поведінку мікроелектромеханічних систем. Утворення чисельної моделі досліджуваної системи здійснюється шляхом графічного складання у спеціальному вікні схеми з'єднань елементарних візуальних блоків, що містяться в бібліотеках Simulink. Кожний блок фактично являє собою математичну програму. Лінії з'єднання блоків перетворюються на зв'язки між цими програмами, які дозволяють визначити послідовність виклику програм і пересилання інформації. У результаті такого складання утворюється програмна модель, яку називають S-моделлю і яка зберігається у файлі з розширенням .mdl. Такий процес утворення обчислювальних програм прийнято називати візуальним програмуванням [6].

Використання Simulink є особливо зручним при моделюванні систем, які складаються із з'єднаних певним чином окремих функціональних пристроїв, поведінка яких описується відомими залежностями. Тоді схема з'єднань візуальних блоків у вікні блок-схеми S-моделі збігається з реальними зв'язками між цими пристроями. Ця обставина суттєво спрощує програмний аналіз і синтез систем управління.

Розширення системи Matlab Simulink характеризується простотою і наочністю використання при моделюванні різних пристроїв і систем, в тому числі і електротехнічних (рис. 4.2). У Simulink використовується візуально-орієнтований підхід, коли готові блоки за допомогою миші переносять з бібліотеки в вікно документа Simulink і з'єднують лініями входи і виходи цих блоків. В результаті створюється S-модель, тобто Simulink-модель, яка запускається натисканням кнопки Run.

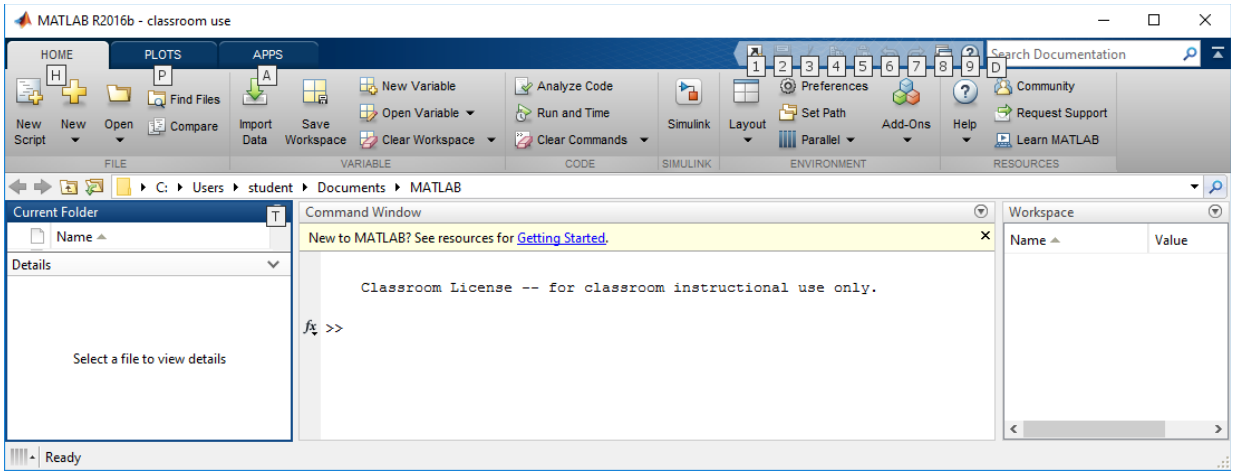


Рисунок 4.2 – Головне вікно системи Matlab Simulink

Бібліотека Simulink є набором різних візуальних блоків. Для доступу до них необхідно натиснути кнопку Simulink Library на панелі інструментів MATLAB. При цьому з'являється вікно браузера (оглядача, навігатора, програми перегляду) бібліотеки, представлене на рис. 4.3.

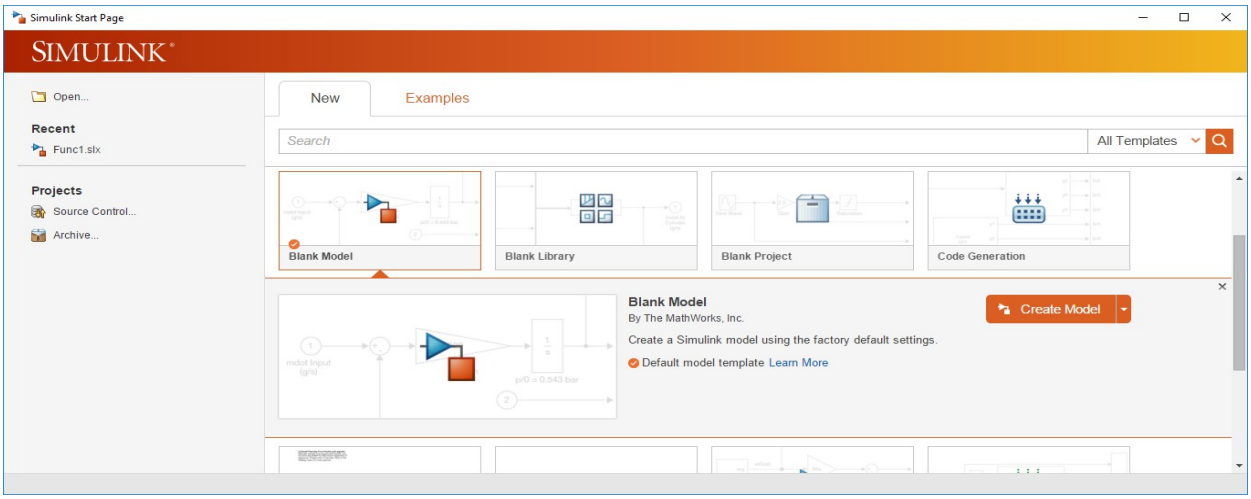


Рисунок 4.3 – Simulink Library Browser

Вікно браузера бібліотеки містить елементи (рис 4.4):

– заголовок, з назвою вікна - Simulink Library Browser;

– панель інструментів з ярликами найбільш часто використовуваних команд;

– вікно коментаря для виведення повідомлення про обраний блок;

– список розділів бібліотеки, реалізований у вигляді дерева;

– вікно вмісту розділу бібліотеки (список вкладених розділів бібліотеки або блоків).

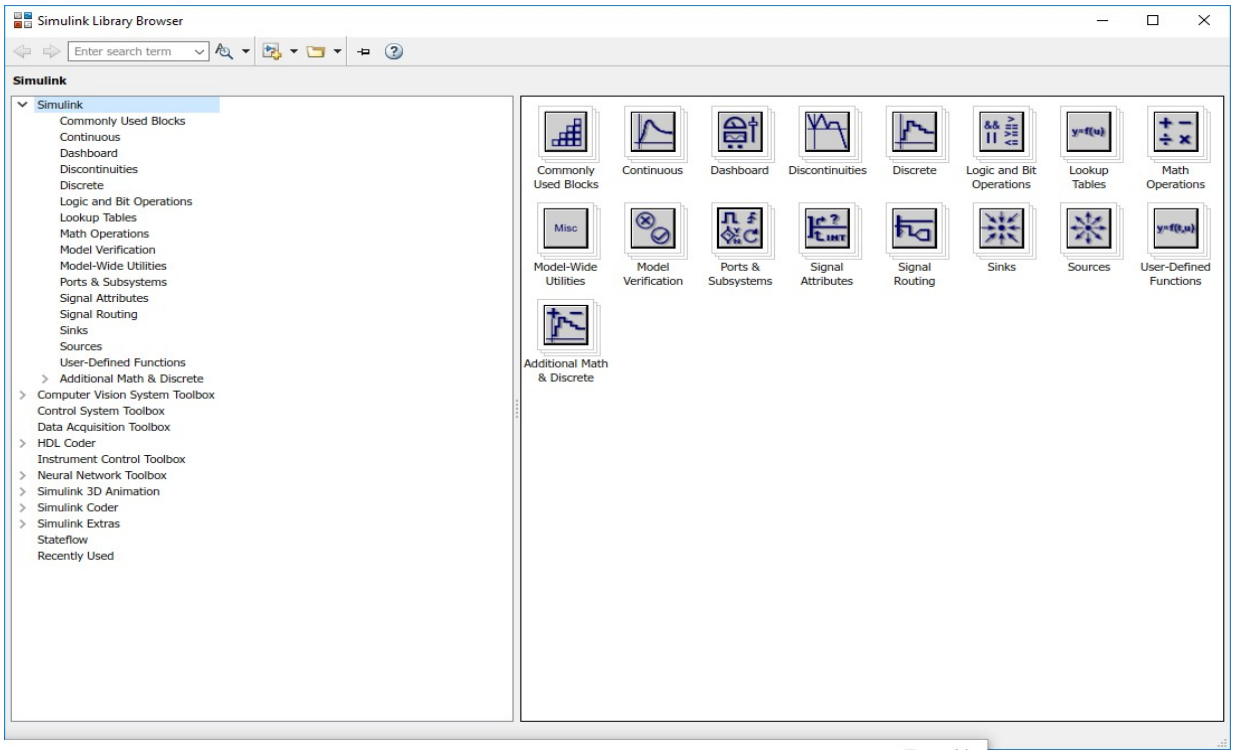


Рисунок 4.4 – Вікно браузера бібліотеки

Процес побудови Simulink-моделі включає в себе компоновку моделі і завдання необхідних параметрів.

Компонування полягає у виборі з бібліотек Simulink необхідних блоків, їх розміщення у вікні браузера бібліотеки і їх з'єднання між собою. Далі для кожного блоку встановлюються відповідні параметри, що відповідають вимогам, що моделюються.

4.2 Фізична модель сервоприводу головки жорсткого диску

Для моделювання електромеханічної системи моделі актюатора приводу головки жорсткого диска було використано пакет розширення Matlab/Simulink/SimScape.

У найпростішому випадку актюатор являє собою тверде тіло з одним обертальним ступенем свободи. На одному кінці актюатора розташований двигун з рухомою котушкою (voice coil motor - VCM), а на іншому - головки читання / запису.

На актюатор діють сили з боку двигуна, сила тертя в осі і сила з боку потоку повітря від обертового диска, що обертається із середньою швидкістю 7000 об/хв. У простій моделі коливальні режими аеропружності актюатора не враховуються.

У бібліотеці Matlab/Simulink/Simscape є засоби, що дозволяють скласти досить докладну віртуальну фізичну модель актюатора приводу головок жорсткого диска [7]. Дану модель наведено на рис. 4.5. Вона складена з використанням елементів з бібліотек Foundation Library і SimMechanics.

На даному рисунку модель двигуна з рухомою котушкою представлена блоком VCM, що складається з елементів L, R, керованого джерела напруги, датчика струму A і формувача моменту PS Gain.

Вихідний сигнал VCM - момент, пропорційний струму в котушці двигуна.

В схемі актюатор представлений блоком Body (тверде тіло) з віссю обертання Revolute (вал), що проходить через точку CS1.

В параметрах настройки блоку Body задаються маса твердого тіла, тензор моменту інерції, початкова орієнтація щодо базової системи координат.

На актюатор діє момент двигуна, прикладений до точки CS3 і момент сили опору повітряного потоку, в найпростішому випадку заданий постійною величиною і прикладений в точці CS2.

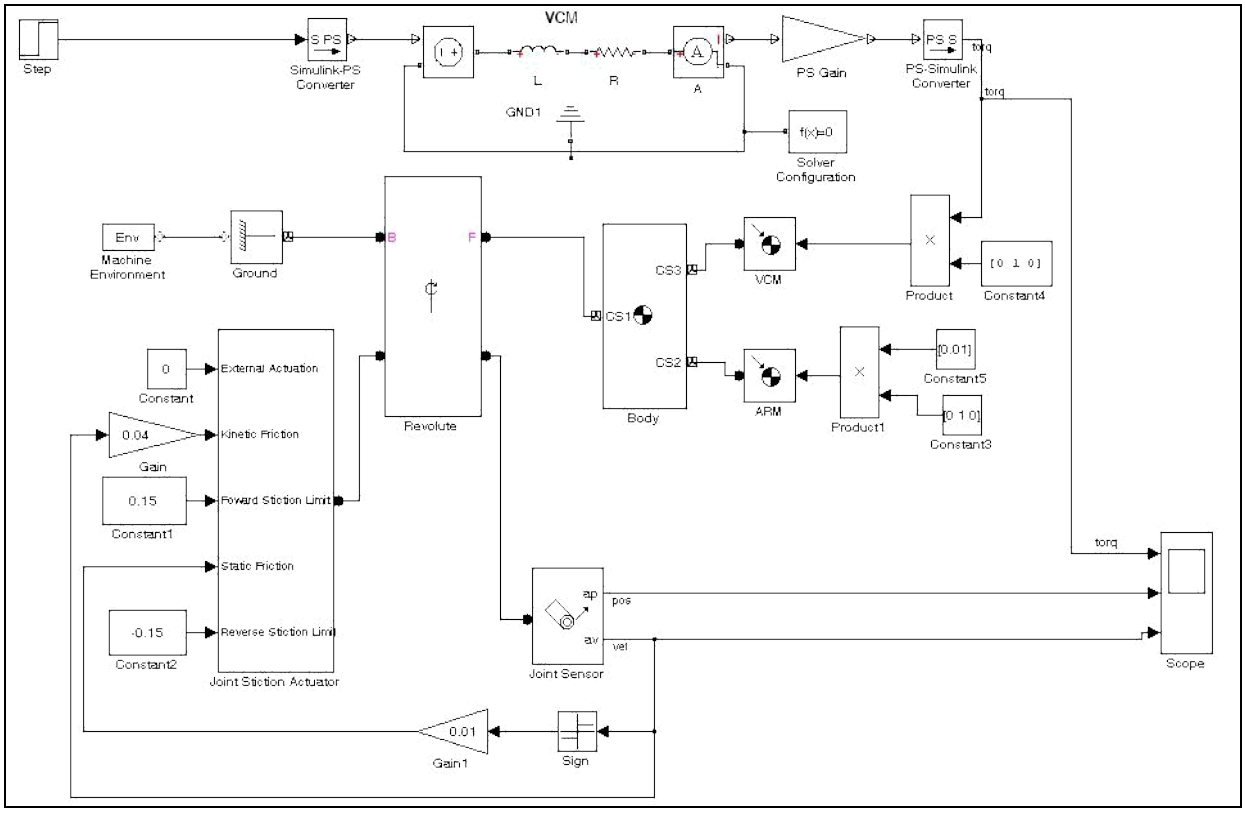


Рисунок 4.5 – Фізична модель актюатора приводу головок жорсткого диска з використанням елементів бібліотеки Matlab / Simulink / Simscape

Блоком Joint Striction Actuator задається характеристики тертя на осі обертання актюатора: величина статичного тертя Static Friction, коефіцієнт в'язкого тертя Kinetic Friction, максимальні значення моменту тертя Forward Striction Limit і Reverse Striction Limit. Дані характеристики дозволяють реалізувати систему з нелінійною моделлю тертя, що залежить від напрямку та величини кутової швидкості.

Моменти зовнішніх сил і зовнішні сили діють на тіло за допомогою блоку Body Actuator.

Параметри руху актюатора – кут повороту і кутова швидкість формуються датчиком Joint Sensor.

В системі існує необхідність взаємної прив'язки (завдання положення початку координат і орієнтації осей) систем координат Body CS1, CS2 і CS3, системи координат елемента Revolute до базової системи координат (World).

Результат моделювання роботи системи управління поворотом головки жорсткого диску з вихідної позиції (φstart = 0) на кут 60 ° (φfinish = 60 °) представлений на рис. 4.6. На верхньому рисунку показано залежність кута повороту головки жорсткого диску φ (t), а на нижньому рисунку – сигнал управління (включення) u (t) наступних переміщень головки жорсткого диску.

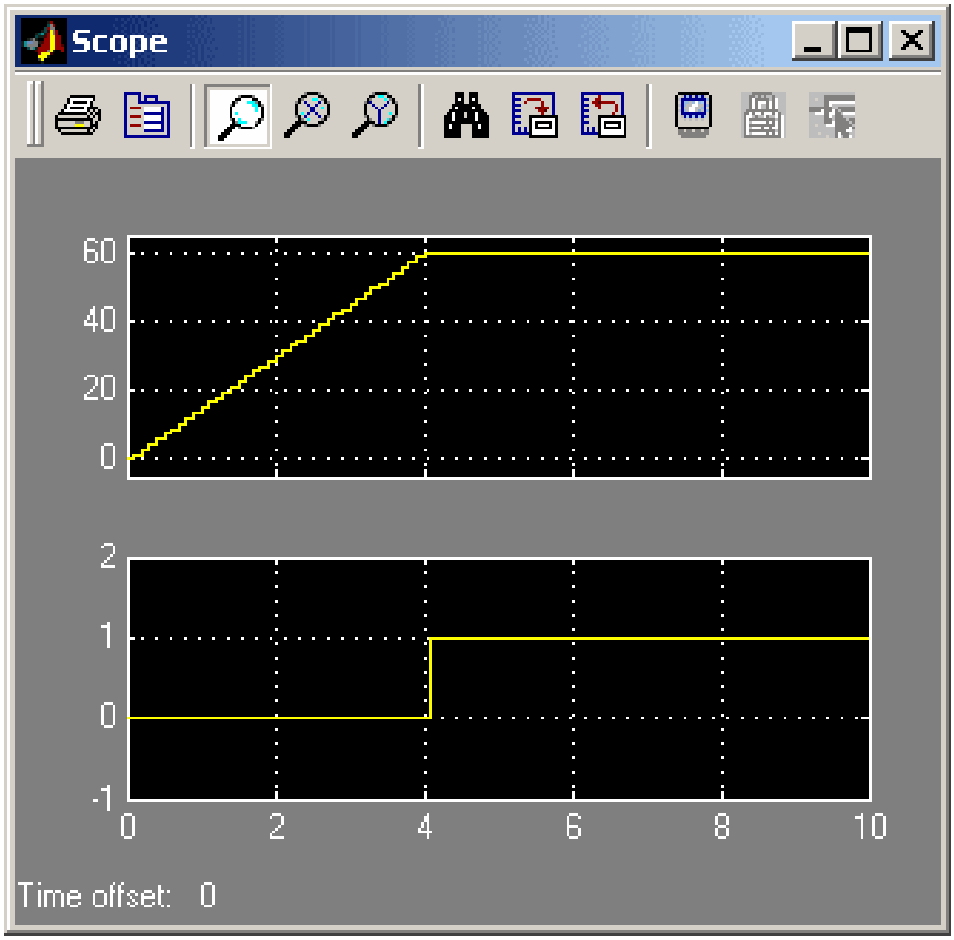


Рисунок 4.6 – Залежність кута повороту головки жорсткого диску φ (t) та сигнал управління (включення) u (t) наступних переміщень головки жорсткого диску

4.3 Система регулювання положення актюатора сервоприводу

Для регулювання положення актюатора сервоприводу використаний ПІ-регулятор. В результаті підстановки створеної моделі актюатора в Simulink-модель автоматичного регулювання з ПІ-регулятором отримано структурну схему, що показано на рис.4.7.

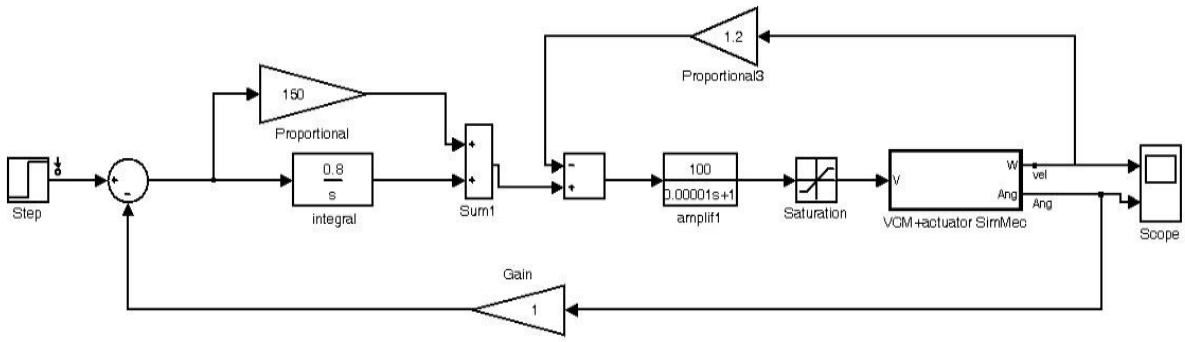


Рисунок 4.7 – Структурна схема системи регулювання положення актюатора сервоприводу

Результати моделювання часових відгуків системи з використанням структурної схеми з ПІ-регулятором приведено на рис.4.8.

На рисунку зображено залежність швидкості повороту головки (Vel) і кута повороту (в радіанах) головки (Ang) від часу.

Отриманий результат моделювання відповідає залежностям, що наведено у [6].

На прикладі побудованої моделі сервоприводу головки жорсткого диска показаний варіант побудови системи з використанням фізичних

моделей окремих елементів і фізичних явищ з використанням бібліотеки Matlab / Simulink / Simscape.

В об'єкт управління включені нелінійна модель сухого тертя, модель двигуна з рухомою котушкою, актюатор у вигляді орієнтованого в просторі твердого тіла, найпростіша модель аеропружності.

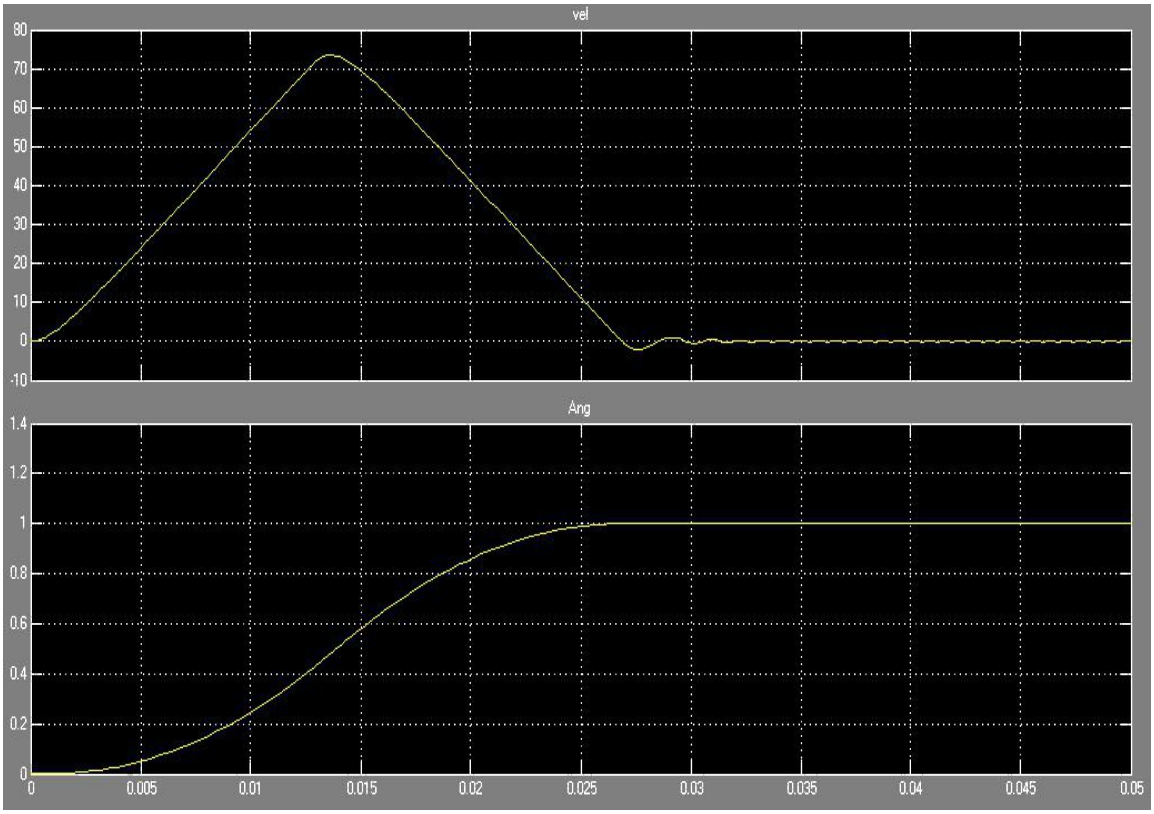


Рисунок 4.8 – Результат моделювання електромеханічної системи з актюатором з використанням ПІ-регулятора

Використання фізичної моделі актюатора, як вкладення в структурну схему системи регулювання положення головки жорсткого диска в Simulink-модель, дозволило отримати результати моделювання, що збігаються з даними з відкритих джерел [6].

Надалі передбачається, використовуючи бібліотеку Simulink/Aerospace, більш коректно врахувати ефекти впливу аеродинамічного потоку на актюатор, що дозволить врахувати резонансні явища, пов'язані з флатером

актюатора. Для цього будемо використовувати модель одномірного гармонійного осцилятора.

4.4. Моделювання одномірного гармонійного осцилятора в середовищі MATLAB / SIMULINK

Життєвий цикл багатьох технічних систем постійно супроводжують різні коливальні процеси, надаючи на них або шкідливий вплив, або, навпаки, дозволяючи ефективно виконувати покладені на них функції. Своїми значними наслідками відомі явища флатера, шіммі, бафтинга - інтенсивних, найчастіше раптових, коливань елементів конструкції обертових пристроїв.

Вся радіотехніка і електроніка заснована на створенні і перетворенні необхідних електромагнітних коливань. На стику акустики твердого тіла, фізики напівпровідників і радіоелектроніки розвивається акустична електроніка. При цьому все різноманіття фізико-технічних систем, що здійснюють коливання, об'єднується в клас осциляторів, серед яких помітне місце займають гармонійні одномірні осцилятори, в тому числі різні коливальні контури і кварцові резонатори. Для моделювання флатера в голівках диска також використовується модель осцилятора. Широке поширення і перспективи технічного застосування подібних осциляторів спонукають звернутися до їх моделювання з використанням сучасних програмних засобів, зокрема, інструментального пакету Matlab/Simulink [9].

В якості теоретичної основи побудови пошукової моделі прийнято рівняння руху гармонійного осцилятора, що здійснює вимушені одномірні коливання в умовах тертя.

Гармонійний осцилятор – система, яка при виведенні її з положення рівноваги відчуває дію певної сили F, що пропорційна зміщенню x за законом Гука при механічних коливаннях:

$$F = -kx, \tag{4.1}$$

де k – константа, що описує жорсткість системи.

Тоді, використовуючи другого закона Ньютона, прискорення системи має вигляд:

$$a = -\frac{k}{m}x. \tag{4.2}$$

Позначивши $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ і виконавши заміну прискорення a на другу похідну від координати за часом може бути записано рівняння руху гармонійного осцилятора, що має має вигляд [1]:

$$\ddot{x} + 2\lambda \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{f}{m}\cos\gamma t, \tag{4.3}$$

де x - відхилення координати осцилятора від її рівноважного значення;

λ - коефіцієнт загасання коливань;

$\frac{k}{m}$ - частота вільних або власних коливань осцилятора;

m и k – дійсні константи, що характеризують фізичні властивості осцилятора і безпосередньо визначають параметри його вільних коливань;

f – амплітуда і γ – частота коливань зовнішньої збурювальної сили F(t).

Рівняння (4.3) узагальнює всі відомі види руху одномірного гармонічного осцилятора і при $\lambda = 0$ та $f = 0$, тобто за відсутності

зовнішніх збурень і тертя набуває вигляду $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ рівняння вільних одномірних коливань. При $\lambda = 0$ і $f \neq 0$ співвідношення (4.3) трансформується в рівняння $\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{f}{m}\cos\gamma t$ вимушених коливань, що здійснюються осциллятором під дією якоїсь зовнішньої сили $F(t) = f\cos\gamma t$, а при $\lambda \neq 0$ і $f = 0$ перетворюється в рівняння $\ddot{x} + 2\lambda\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$ згасаючих коливань осцилятора, що обумовлені дією сили тертя. При цьому теоретична фізика для $\lambda < \omega_0$ дає рішення рівняння (4.3) у вигляді функції:

$$x = ae^{-\lambda t}\cos(\omega_0 t + \alpha) + b\cos(\gamma t + \delta), \qquad (4.4)$$

де a – амплітуда; α – початкове значення фази вільних коливань осцилятора (довільні постійні величини, які визначаються з початкових умов), а амплітуда b і початкове значення фази δ вимушеного коливання визначаються зі співвідношень:

$$b = \frac{f}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \gamma^2)^2 + 4\lambda^2\gamma^2}}, \qquad (4.5)$$

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{2\lambda\gamma}{\gamma^2 - \omega_0^2}. \qquad (4.6)$$

Прирівнюючи в різних поєднаннях разом і окремо λ і f до нуля, зі співвідношення (4.4) можна отримати різні рішення рівняння (4.3), в тому числі для вільних, вимушених і згасаючих коливань осцилятора.

Рівняння (4.3) вичерпно описує різні рухи широко розповсюдженого в техніці одномірного гармонійного осцилятора, а рівняння (4.4) дає його рішення. Разом співвідношення (4.3) і (4.4) становлять сукупність готових математичних моделей поведінки осцилятора в різних умовах, які, однак, для

практичного застосування вимагають програмної реалізації, зокрема засобами Matlab.

При моделюванні руху осцилятора засобами Matlab, маючи в своєму розпорядженні рівняння (4.3), задану модель зручно отримати, використовуючи блок Integrator розділу Continuous бібліотеки Simulink.

Порядок проходження доданків правої частини рівнянні (4.3) дає структуру певної моделі (рис. 4.9).

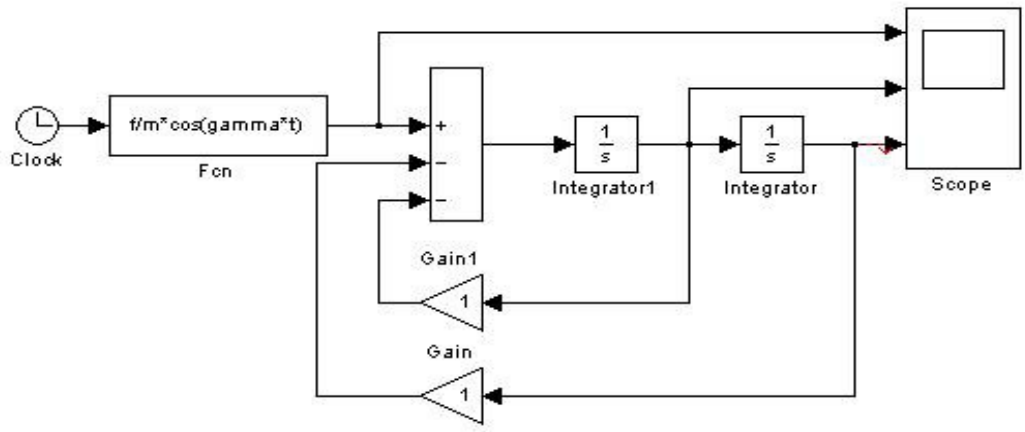


Рисунок 4.9 – Модель осцилятора на основі блоку Integrator

Так, зовнішня збурююча сила задається блоком Fcn. При цьому перша похідна, що є швидкістю осцилятора, обчислюється блоком Integrator1, а переміщення осцилятора обчислює блок Integrator.

Блоки Gain1 і Gain призначені для завдання коефіцієнтів 2λ і ω_0^2. При цьому всі компоненти правої частині (4.3) алгебраїчно підсумовуються блоком Sum, а графіки зміни зовнішньої сили, швидкості і величини переміщення осцилятора виводяться в окремі вікна на один екран віртуального осцилографа Scope.

Для проведення обчислювального експерименту побудовану модель належить налаштувати, задавши значення параметрів осцилятора, початкові умови його руху і закон зміни зовнішньої сили, що збурює.

В умовах абстрактного експерименту маса осцилятора m=5 кг, властивий йому коефіцієнт пружності $k = 2\frac{кг}{с^2}$. Тоді квадрат частоти власних коливань такого осцилятора $\omega_0^2 = \frac{k}{m} = 0,4с^{-2}$. При цьому коефіцієнт загасання коливань $\lambda = 1,4с^{-1}$, а збурююча сила F (t) діє на осцилятор з амплітудою $f = 4кг$ Ч$и$ Ч$с^{-2}$ і частотою $\gamma = 0,8с^{-1}$.

В якості початкової умови руху осцилятора прийнято відхилення осцилятора від положення рівноваги $x = 0,05m$ і $x = 0$.

Отримані результати при названих умовах показано на рис. 4.10.

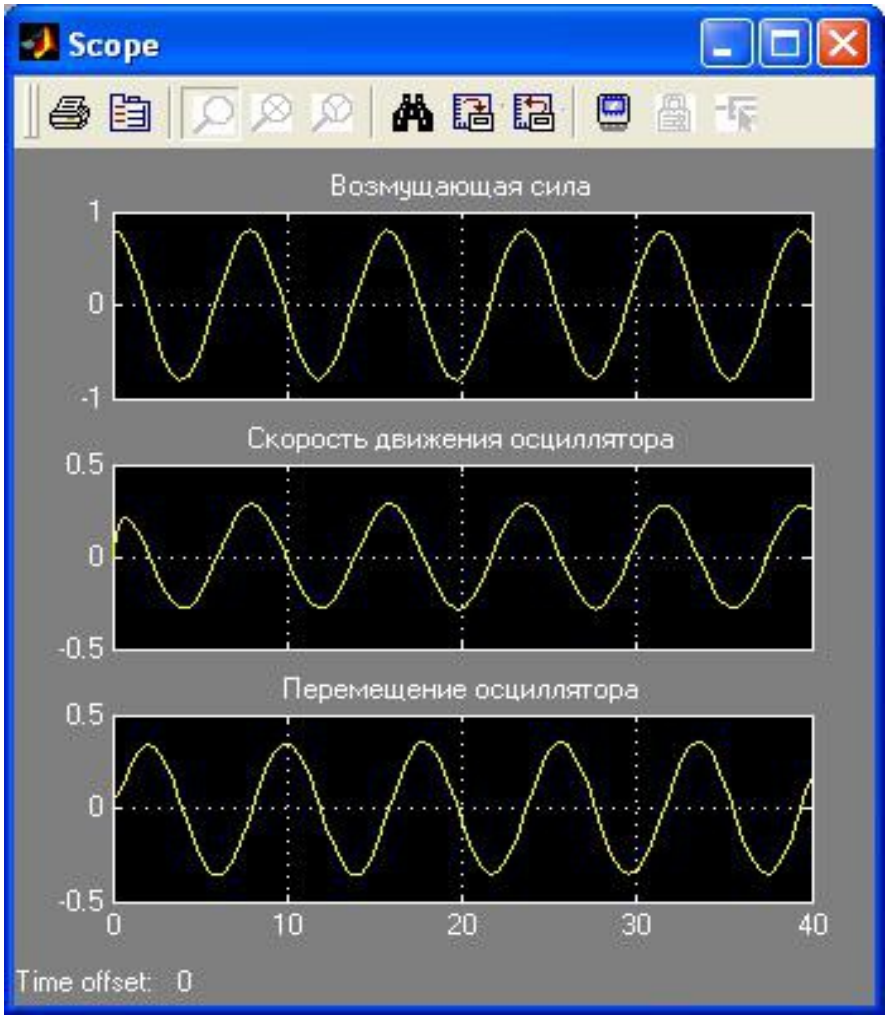


Рисунок 4.10 – Результат роботи моделі на основі блоку Integrator при заданих умовах експерименту

Аналогічну модель в середовищі Matlab Simulink може бути побудувана інакше при застосуванні до початкового рівняння (4.3) перетворення Лапласа, яке при нульових початкових умовах призводить його до виду:

$$s^2X(s) + 2\lambda sX(s) + \omega_0^2X(s) = \frac{1}{m}F(s). \tag{4.7}$$

Тоді передавальна функція осцилятора має вигляд:

$$\frac{F(s)}{X(s)} = \frac{1/m}{s^2 + 2\lambda + \omega_0^2}. \tag{4.8}$$

Такий підхід дозволяє застосувати для побудови необхідної моделі блок передавальної функції Transfer Fcn розділу Continuous бібліотеки Simulink. Отримана при цьому модель показана на рис. 4.11, а результати її роботи приведено на рис. 4.12.

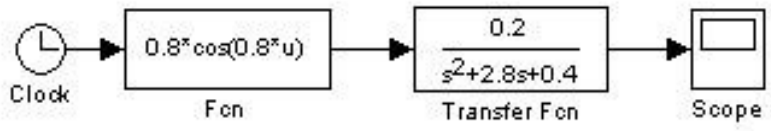


Рисунок 4.11 – Модель осцилятора на основі блоку Transfer Fcn

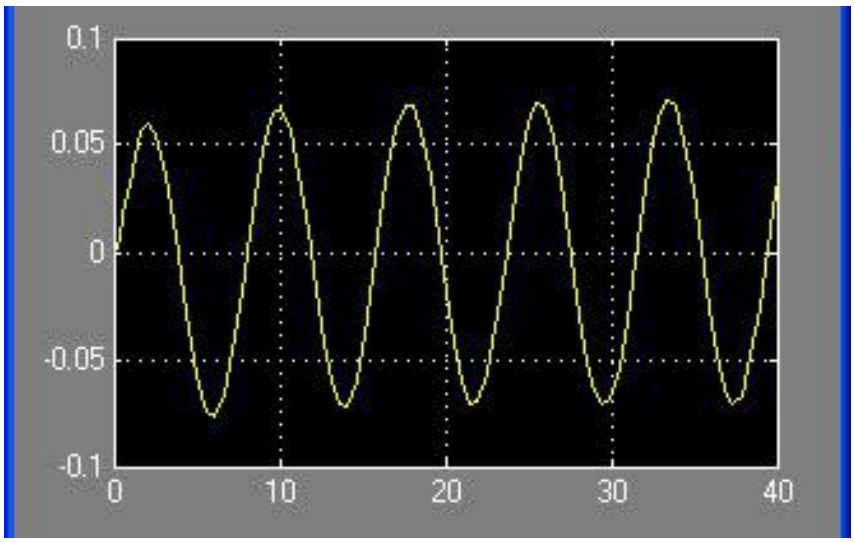


Рисунок 4.12 – Результат роботи моделі на основі блоку Transfer Fcn

На підставі рівняння (4.4) може бути отримана модель, яка дозволяє на одному екрані віртуального осцилографа Scope отримати чотири графіка коливань осцилятора: вимушених коливань в умовах тертя, а також вільних, згасаючих і вимушених коливань при відсутності тертя (рис. 4.13). Для цього в моделі використовуються чотири блоки Fcn з настройками у межах відповідних блоків.

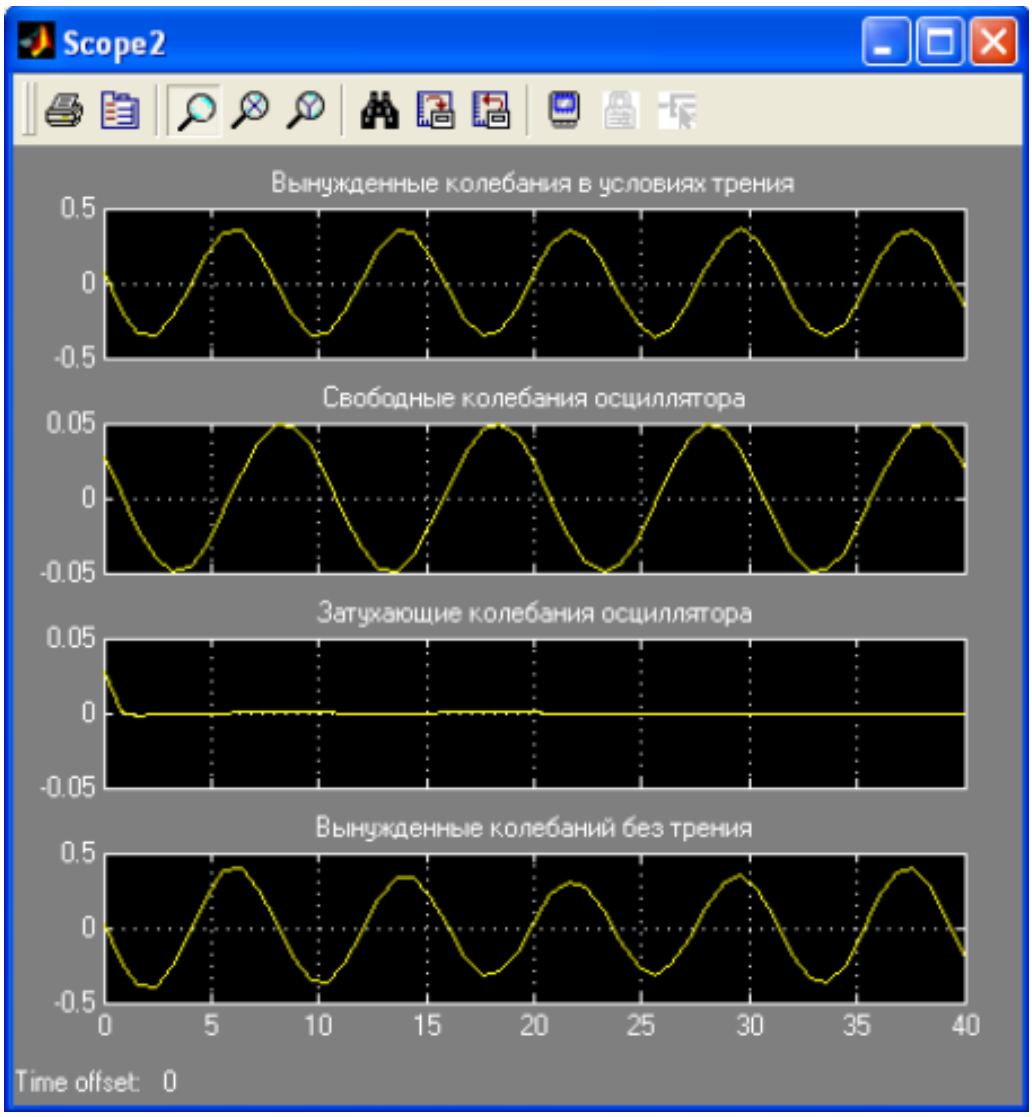


Рис. 4.13 – Результат роботи моделі на основі блоків Fcn

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проведено аналіз особливостей проектування та виготовлення МЕМС–актюаторів. МЕМС проходять стадію розробки, що включає в себе аналітичне математичне моделювання за допомогою пакету, Matlab стадію виготовлення методом групової технології; стадію кристального продукування мікроелементів і мікросхем, збірку модулів систем; стадії тестування, випробування та вихідного контролю.

Проведено аналіз структури типової вбудованої системи та загальної структури мікросистеми. Розглянуто класифікацію актюаторів та виконано аналіз принципів їх роботи в рухомих об’єктах. Розглянуто технологію Multi Actuator жорсткого диску, яка забезпечує точність позиціонування головок читання-запису щодо поверхні магнітних дисків. Розглянуто типову структуру сучасних накопичувачів на жорстких магнітних дисках практично всі складаються з одних і тих же вузлів.

Розроблено модель системи сервоприводу для точного наведення (позиціонування) головок з автоматичним регулюванням. Для регулювання положення актюатора сервоприводу використаний ПІ-регулятор.

Для моделювання електромеханічної системи моделі актюатора приводу головки жорсткого диска було використано пакет розширення Matlab/Simulink/SimScape.

Використовуючи фізичну модель актюатора, як вкладення в структурну схему системи регулювання положення головки жорсткого диску здійснено моделювання електромеханічної моделі МЕМС-актюатора приводу головки накопичувача жорсткого диску в середовищі Matlab Simulink. Результат моделювання представлений для системи управління поворотом головки жорсткого диску.

Для врахування ефекту впливу аеродинамічного потоку на актюатор і врахування резонансних явищ, пов'язаних з флатером актюатора, було

використано модель одномірного гармонічного осцилятора. Наведені графіки коливань осцилятора: вимушених коливань в умовах тертя, а також вільних, згасаючих і вимушених коливань при відсутності тертя.

При проведенні поведінкового моделювання отримані графіки залежностей, що підтверджують отримані математичні моделі актюатора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лазарєв Ю.Ф. Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації: підруч./ Ю. Ф. Лазарєв, П. М. Бондар – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 644 с.

2. Калинкина М.Е. Микроэлектромеханические системы и датчики / М.Е. Калинкина, О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич, А.В. Комарова, – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 75 с.

3. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК_Пресс, 2008. – 784 с.

4. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: учебное пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.

5. Актюатор [Электронний ресурс] / Популярная робототехника – Режим доступу: www / URL https://sites.google.com/site/poprobotics /ideologia/aktuator?pli=1 – 20.10.2021 р. – Загол. з екрану.

6. Борисевич А. В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 200 с.

7. Ткалич О.В. Применение пакета Matlab для моделирования мехатронных систем / О.В. Ткалич., Н.Н.Пономарев // Труды УрФУ, 2015. – С. 147-152.

8. Сысоева С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения // Компоненты и технологии. – 2014. – №. 6. – С. 40-46.

9. Голоденко Б.А. Моделирование одномерного гармонического осциллятора в среде MATLAB / Б. А.Голоденко, Е. В.Чеснокова, А. Б.Голоденко // Вестник ВГУИН. – 2012. – № 2. – С. 81-84.