ДОДАТОК А Графічна частина кваліфікаційної роботи

Харківський національний університет радіоелектроніки

Кафедра АПОТ

Кваліфікаційна робота магістра

Моделювання мікроелектромеханічних актюаторів з використанням Matlab / Simulink

Магістранта групи СКСм-17-1
Колосова Євгенія Андрійовича

Керівник:
проф. каф. АПОТ
Литвинова Є.І.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра АПОТ, тел. 7021 326, e-mail d_ad@nure.ua

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

МЕТА і ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

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

Завдання дослідження :

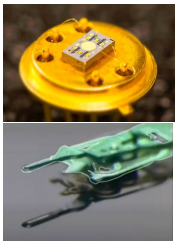
- **аналіз особливостей виготовлення МЕМС, характеристики вбудованих систем, структури типової вбудованої системи та її компонентів;**
- **аналіз загальної структури мікросистеми;**
- **аналіз конструкції та принципів роботи МЕМС-актюаторів головки жорсткого диску;**
- **розробка та аналіз фізичної моделі досліджуваного актюатора;**
- **створення Simulink-моделі актюатора головки жорсткого диску в середовищі Matlab Simulink;**
- **моделювання електромеханічної моделі МЕМС-актюатора головки жорсткого диска в середовищі Matlab Simulink.**

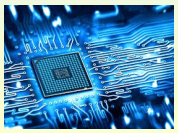
Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Мікроелектромеханічні системи та їх компоненти

Мікроелектромеханічні системи, МЕМС, представляють собою мікромеханічні пристрої, вбудовані в електронну систему, та виготовлені з використанням змішаної технології виготовлення інтегральних мікросхем.

МЕМС складаються з **сенсорів**, **актюаторів** (виконавчих пристроїв, механізмів), а також **електричних та електронних пристроїв** на кристалі кремнію.
МЕМС характеризуються **високим ступенем інтеграції, унікальною мініатюрністю, низьким споживанням електроенергії, можливістю функціонування в жорстких умовах експлуатації.**



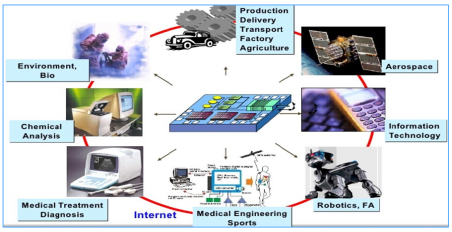


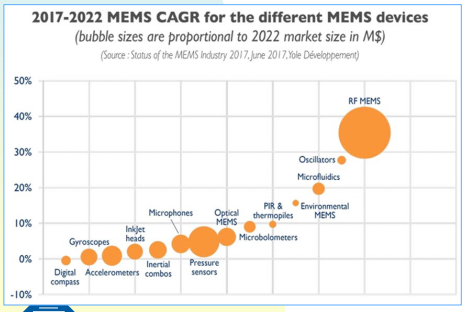
Перевагами МЕМС є **висока функціональність, надійність, широка область застосування** та **висока технологічність.**
МЕМС-актюатори є перспективними пристроями сучасної мікросистемної техніки, що інтенсивно та динамічно розвиваються у науково-технічному напряму.

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Галузі застосування МЕМС-актюаторів та динаміка темпів росту виробництва МЕМС

Галузі застосування МЕМС-актюаторів надзвичайно широка. Вони використовуються у **системах навігації** для літальних апаратів різного призначення, морських судів, в **автомобілебудуванні, свердловинних приладах**, медицині, в промислових вимірювальних системах та системах управління, в смартфонах, ноутбуках, цифрових відеокамерах, робототехніці.





За останні роки спостерігається активна **динаміка совокупного середньорічного темпу росту виробництва MEMS-пристроїв** різного призначення, а саме, **радіочастотних RF МЕМС, мікрорідинних МЕМС, МЕМС-осциляторів, МЕМС для моніторингу навколишнього середовища.**

Об'єми ринку MEMS в галузі споживчих пристроїв зростатимуть швидше, ніж у промисловій області, де ця технологія також дуже затребувана.

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Типова схема вбудованої системи

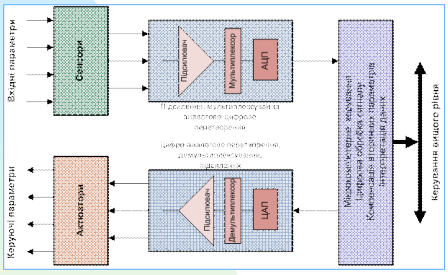
Вбудована система (ВС) (англ. Embedded System) визначається як спеціалізована обчислювальна система, яка в силу розв'язуваної задачі безпосередньо взаємодіє з фізичними об'єктами і процесами.

Вбудована система об'єднує в собі три основні складові:
- **чутливий елемент, або сенсор** (первинний вимірювальний перетворювач), що реагує на зміну певної фізичної величини і перетворює її до відповідного виду (неелектричні в електричні сигнали);
- **мікропроцесорні системи обробки отриманої інформації** - пристрої передачі, опрацювання сигналів, прийняття рішення;
- **мікроактюатор (виконуючий пристрій),** призначений для приведення в рух необхідних механізмів.

Основними особливостями ВС є:
- робота в реальному масштабі часу, багатозадачність та обмежені ресурси;
- програмно-апаратний дуалізм;
- автономність роботи (відсутність оператора, обмеження електроживлення);
- високі вимоги по надійності та безпеки функціонування;
- мінімізація вартості та різноманітні, часто складні, умови експлуатації.

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Загальна структура мікросистеми



В загальній структурі мікросистеми **сенсор** сприймає та перетворює вхідні фізичні, хімічні та інші величини (аналоговий сигнал) в електричний сигнал.

Від сенсору сигнал поступає на **блок**, що виконує **функцію приведення аналогового сигналу до необхідного виду та рівня,** з подальшим перетворенням його в **цифрову форму.**

У блоку сигнал підсилюється, мультиплексується та перетворюється за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) у цифровий сигнал.

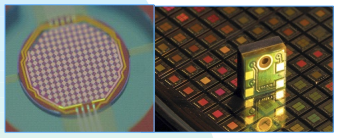
Структура містить **блок МП засобів**, що обробляють вхідний цифровий сигнал відповідно до заданого алгоритму. Модуль може включати процесори, контролери, процесори сигналів, цифрові схеми.

Вихідною інформацією блоку є генерація **керуючого цифрового сигналу** (або групи керуючих сигналів), який за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) перетворюється в **аналогову форму**. Далі сигнал передається на пристрій розподілу аналогових і цифрових сигналів (аналогові комутатори, демультиплексори, буферні регістри), з якого передається на виконуючий пристрій - **актюатор**.

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Особливості технології проектування та виготовлення МЕМС

Технології проектування та **виготовлення МЕМС** розвиваються з урахуванням науково-технологічного прогресу мікроелектроніки у сфері **групових прецизійних технологій виготовлення інтегральних схем.**



Мікросистеми - це **тривимірні структури**, елементи яких повинні мати можливість відносного механічного переміщення окремих складових МЕМС.

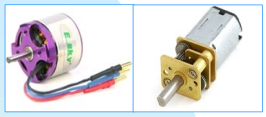
Кожен виріб МЕМС проходить наступні **стадії**:
- **розробка**, що включає аналітичне математичне моделювання за допомогою пакетів прикладних програм, таких як **ANSYS**, **Solid Works** і комп'ютерне моделювання з використанням програмного пакету **Matlab Simulink**;
- **виготовлення** – кристальне продукування мікроелементів та мікросхем, складання модулів систем;
- **тестування** та **випробування** (температурне та кліматичне випробування);
- **вихідний контроль**.

Для виготовлення **МЕМС-сенсорів** та **актюаторів**, використовується **пакетна обробка з великим обсягом інтегральних схем**.

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

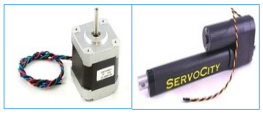
Актюатори в системах мехатроніки

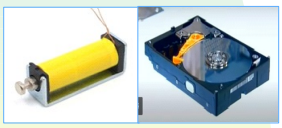
Актюатор (actuator) - виконавчий пристрій регулюючої або керуючої системи.



В якості актюаторів можуть застосовуватись **електродвигуни постійного** (колекторні двигуни) та **змінного** (вентильні двигуни) **струму**. **Актюатори на основі електродвигунів** використовуються при побудові різних видів актюаторних компонентів МЕМС.

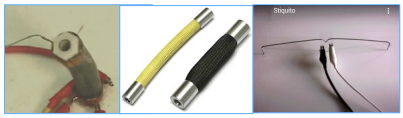
Для цілей робототехніки використовуються **синхронні крокові двигуни**, що дозволяють здійснювати обертання ротора на строго заданий кут. Подібні приводи використовуються в системах, де необхідне точне позиціювання, таких як принтери, сканери, плотери.





Електричні приводи – **соленоїди** мають простішу конструкцію з усіх типів актюаторів і являють собою електромагніт, у якого внутрішній магнітопровід рухливий або відсутній. При подачі постійної напруги на соленоїд, він втягує металевий шток, здійснюючи тим самим поступальний рух.

В робототехніці широко застосовуються **актюатори на основі електроактивних полімерів, полімерні пневматичні м'язи** та **металеві конструкції з ефектом пам'яті**, що використовуються для керування роботів.



Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Основні компоненти жорстких дисків ПК

Сучасні накопичувачі на жорстких магнітних дисках складаються з наступних вузлів:

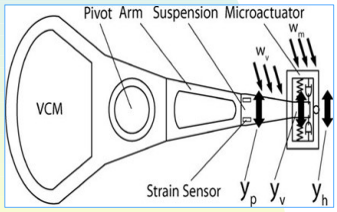
- **диски** з нанесеним на їх поверхню тонкоплівковим магнітним робочим шаром;
- **головки читання/запису**. Використовуються тонкоплівкові, магніторезистивні головки, що виготовлені за технологією високої магніторезистивності;
- **механізм приводу головок**. Поворотний привод з рухомою котушкою, який має сервосистему стеження, що використовує сервоінформацію на спеціальному диску з вбудованими кодами;
- **двигун приводу дисків** з автоматичною системою регулювання швидкості обертання зі зворотним зв'язком;
- **повітряний фільтр** (фільтр рециркуляції).

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Технологія Multi Actuator жорсткого диску

В сучасних жорстких дисках застосовується **електромагнітний пристрій - мікроактюатор**, що є **соленоїдом**, який **позиціонує головки жорсткого диску.**

Актюатор переміщує магнітні голівки відносно поверхні носія для зчитування і запису даних. Актюатор забезпечує синхронний рух всіх голівок, кожна з яких встановлена на кінці штанги актюатора.

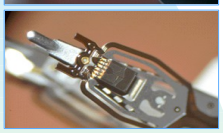


Мініатюрний **актюатор жорсткоко диску створений за технологією Multi Actuator.** Технологія забезпечує дуже високу **точність позиціонування головок читання-запису щодо поверхні магнітних дисків** до декількох нанометрів.

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

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

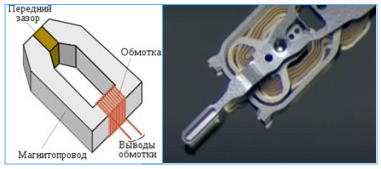
Головки зчитування-запису жорсткого диску ПК



Існують головки зчитування-запису наступних типів:
- **стеклоферитові** (або композитні);
- **з металом у зазорі** (MIG);
- **тонкоплівкові** (TF);
- **магніторезистивні** (MR).

Сьогодні найпоширеніше використання знаходять тонкоплівкові та магніторезистивні головки зчитування-запису.
Тонкоплівкові головки виробляються шляхом фотолітографії. Перевагами використання є висока достовірність запису і зчитування даних.

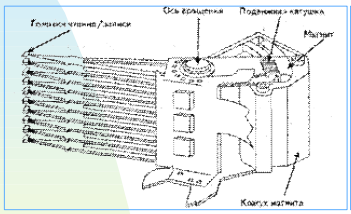
Магніторезистивні головки розроблені фірмою IBM, їх використання дозволяє домогтися найвищих значень щільності запису і швидкодії накопичувачів у порівнянні з тонкоплівковими головками, що є істотною перевагою.
У міру підвищення поверхневої щільності запису сфера застосування магніторезистивних головок буде розширюватися і поступово вони замінять тонкоплівкові головки.

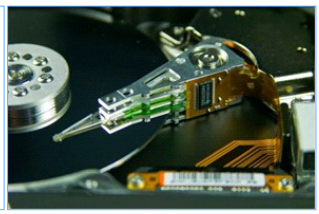


Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Механізм приводу головок зчитування-запису

Механізм приводу головок зчитування-запису – вузол накопичувача, 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.

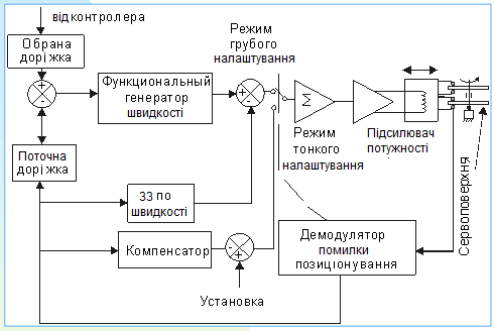




На рисунку показана стандартна **конструкція механізму приводу головок з рухомою котушкою**. **Тип приводу з рухомою котушкою** визначає **швидкодію** і **надійність накопичувача**, **достовірність зчитування даних**, його **температурну стабільність**, **чутливість до вибору робочого положення і вібрацій.**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

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Модель системи сервоприводу для точного позиціонування головок з автоматичним регулюванням



Модель системи сервоприводу представляє собою **систему наведення (позиціонування), яка точно підводить головки до потрібного циліндру.**

Основною перевагою системи є використання сигналу зворотного зв'язку, що має інформацію про реальне взаємне розташування доріжок і головок. Для регулювання положення актюатора сервоприводу використаний ПІ-регулятор.

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.

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.

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

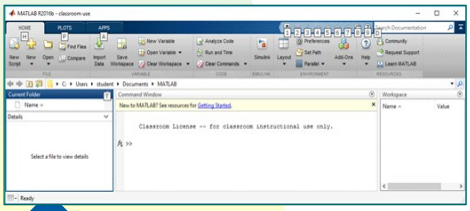
Моделювання МЕМС-актюатора в Matlab Simulink

При проектуванні МЕМС застосовується **метод імітаційного моделювання**, що використовується при необхідності спостереження динаміки значень вихідних змінних протягом певного проміжку часу. **Система імітаційного моделювання Simulink** є компонентом інтегрованого середовища інженерних розрахунків пакету **Matlab**.

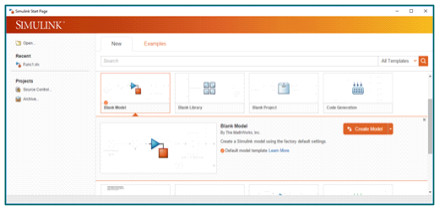
Пакет **Matlab Simulink** дозволяє здійснювати дослідження (моделювання у часі) поведінки МЕМС та їх компонентів і характеризується простотою та наочністю використання.

У Simulink застосовується **візуально-орієнтований підхід**, при якому готові блоки за допомогою миші переносять з бібліотеки Simulink у робоче вікно документа Simulink і з'єднують лініями входи і виходи цих блоків. Результатом є отримана Simulink-модель проекту. Дослідження поведінки моделі здійснюється натисканням кнопки Run.

Головне вікно системи Matlab Simulink



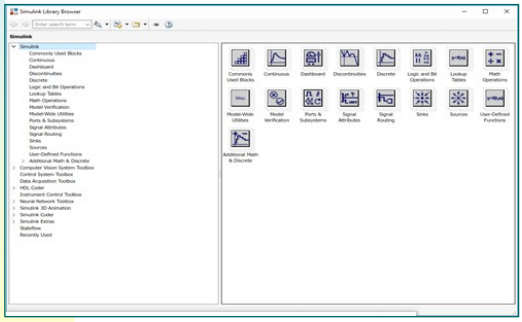
Simulink Library Browser



Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Вікно браузера бібліотеки Simulink

Вікно браузера містить наступні елементи:
- 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).



Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

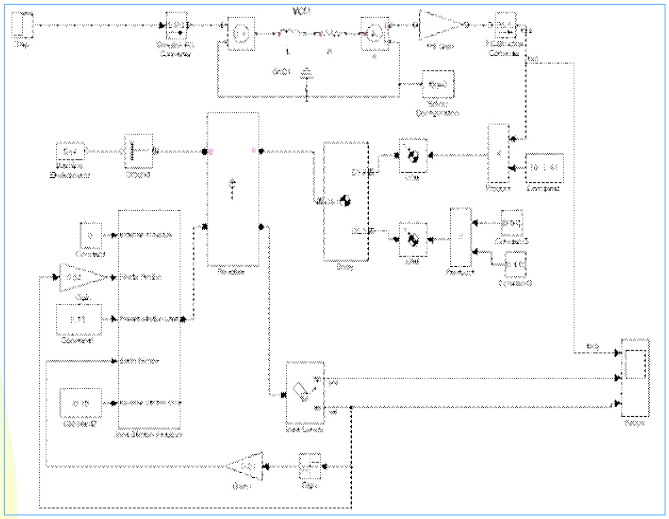
Фізична модель сервоприводу головки жорсткого диску

Актюатор являє собою тверде тіло з одним обертальним ступенем свободи. На одному кінці актюатора розташований двигун з рухомою котушкою, а на іншому - головки зчитування/запису.

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.



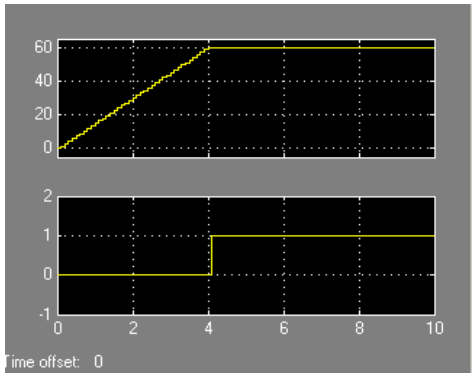
Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Моделювання роботи системи управління поворотом головки жорсткого диску

Результат моделювання роботи системи управління поворотом головки жорсткого диску з вихідної позиції (φstart = 0) на кут 60 ° (φfinish = 60 °) представлений на рисунках.

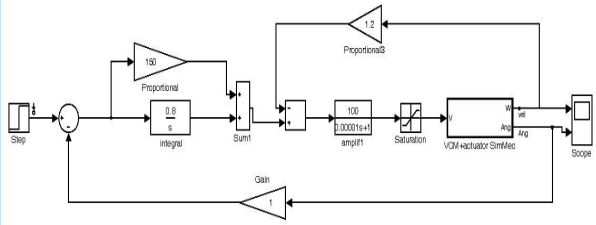
На верхньому рисунку показано часову залежність кута повороту головки жорсткого диску φ (t).

На нижньому рисунку – сигнал управління (включення) u(t) наступних переміщень головки жорсткого диску.



Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Simulink-модель системи 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 системи**.

На прикладі побудованої **моделі сервоприводу головки жорсткого диска** показано 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**, а саме, найпростіша модель аеропружності.

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Результат моделювання системи регулювання положення актюатора з ПІ-регулятором

Результати моделювання часових відгуків системи з використанням структурної схеми системи регулювання положення актюатора сервоприводу з ПІ-регулятором показано на рисунках.

На верхньому рисунку представлено залежність швидкості повороту головки жорсткого диску (Vel) від часу.

На нижньому рисунку показано залежність кута повороту (в радіанах) головки (Ang) від часу.

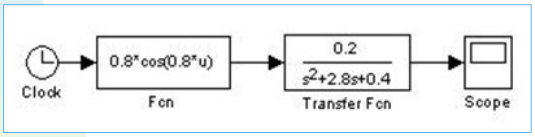
Використання ПІ-регулятора в Simulink-моделі системи регулювання положення головки жорсткого диску дозволяє отримати згладжування характеристики сигналу керування актюатора.

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Simulink-модель осцилятора на основі блоку Transfer Fcn

Для врахування ефектів впливу аеродинамічного потоку на актюатор та пригнічення **флатера** актюатора було використано **модель одномірного гармонійного осцилятора**.

Модель осцилятора на основі блоку Transfer Fcn

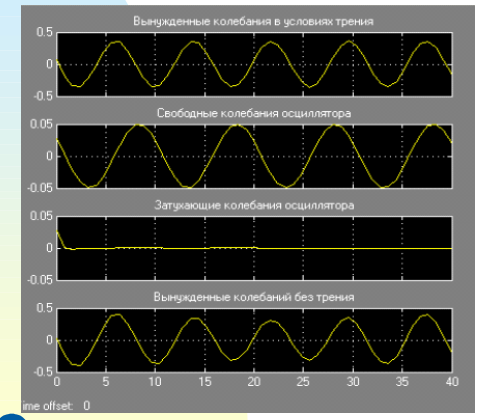


При **моделюванні руху осцилятора засобами Matlab** на основі **рівняння руху гармонійного осцилятора** та **перетворення Лапласа** була побудована **Simulink-модель осцилятора** з використанням **блоку передавальної функції Transfer Fcn** розділу Continuous бібліотеки Simulink.

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Результати поведінкового моделювання коливань осцилятора

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



Представлено **графіки коливань осцилятора**:

1 графік – залежність **вимушених коливань в умовах тертя** та **вільних**, **згасаючих** та **вимушених** коливань при відсутності тертя на **2**, **3**, **4** графіках відповідно.

Kharkov National University of Radio Electronics,
Design Automation Department, phone 7021 326

Магістрант Колосов Євгеній СКСм-17-1

Висновки

- В кваліфікаційній роботі розглянуто **особливості проектування** та **виготовлення** МЕМС–актюаторів, що проходять стадію розробки, яка включає в себе **аналітичне моделювання за допомогою пакету Matlab Simulink**, стадії виготовлення, кристального продукування та збірку мікросистем і стадії тестування, випробування та вихідного контролю.
- Проведено аналіз **структури типової вбудованої системи** та **загальної структури мікросистеми**.
- 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.
- Для моделювання електромеханічної системи моделі актюатора було використано пакет розширення Matlab/Simulink/SimScape. Розроблено Simulink-модель системи сервоприводу для точного наведення (позиціонування) головок з автоматичним регулюванням. Для регулювання положення актюатора сервоприводу використаний ПІ-регулятор.
- Використовуючи **фізичну модель актюатора**, як вкладена в **структуру системи регулювання положення головки жорсткого диску**, здійснено моделювання Matlab **Simulink-моделі МЕМС-актюатора приводу головки**. Результат моделювання представлений для **системи управління поворотом головки жорсткого диску.**
- Для врахування ефекту впливу аеродинамічного потоку на актюатор і пригнічення **флатера актюатора** було використано **Simulink-модель одномірного гармонічного осцилятора**. Наведено **графіки коливань осцилятора**: вимушених коливань тертя, а також вільних, згасаючих і вимушених коливань при відсутності тертя.

Kharkov National University of Radio Electronics,
Design Automation Department, phone 7021 326