

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки

(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Технологічне забезпечення якості оптичних перемикачів зв'язкових
світловодів

(тема)

Виконала: студентка 2 курсу, гр. КІТПВм-19-1
Пащенко А.В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація
та комп'ютерно-інтегровані технології

освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси та виробництво

(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Филипенко О.І.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище,
ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

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

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студенці _____ Пащенко Аліні Валентинівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Технологічне забезпечення якості оптичних перемикачів зв'язкових світловодів

затверджена наказом по університету від 02.11.2020 р. № Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії .12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Розрахунки гравітаційного моменту;

3.2 Розрахунки електромагнітного моменту;

3.3 2-D перемикач;

3.4 Тип пристрою - поворотний;

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ.

4.2 ;Аналіз предметної області.

4.3 Теоретичний аналіз та розрахунки в перемикачах.

4.4 ;Моделювання позиціонування дзеркала і управління.

4.5 Висновки.

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

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання 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	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	02.11.2020	Вик.
2	Аналіз завдання		Вик.
3	Огляд літератури за темою роботи		Вик.
4	Аналіз оптичних перемикачів		Вик.
5	Проведення досліджень		Вик.
6	Проведення моделювання		Вик.
7	Оформлення атестаційної роботи		Вик.
8	Подання на підпис керівнику дипломного		Вик.
9	Подання роботи на підпис зав.кафедри		Вик.
10	Подання роботи на рецензію		Вик.
11	Подання роботи в ЕК		Вик.

Дата видачі завдання _____ 20__ р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Филипенко О.І.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 94 с., 2 табл., 57 рис., 1 дод., 43 джерел.

ОПТИЧНИЙ ПЕРЕМИКАЧ, СВІТЛОВИД, РОЗРАХУНОК,
МОДЕЛЮВАННЯ, МОНІТОРИНГ, МІКРОДЗЕРКАЛО, МАСИВ,
ПОЗИЦІОНУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – процес керування та позиціонування дзеркала в оптичних перемикачах.

Предмет дослідження – оптичні перемикачі зв'язкових світловодів.

Мета магістерської атестаційної роботи – провести дослідження оптичних перемикачів, виконати розрахунки різних параметрів перемикача та провести моделювання позиціонування дзеркал та управління.

Методи дослідження – математичні методи розрахунку, методи електромеханічного моделювання в AWR.

В роботі приведені розрахунки крутного моменту приводного механізму, розрахунки електромагнітного та гравітаційного моменту, розрахунки ширини дзеркального масиву та момент спрацювання дзеркала. Розглянуто системне проектування 2D перемикачів. Проведено моделювання поворотного пристрою та позиціонування дзеркала. Детально описані функції внутрішньовиробничого моніторингу та управління, вибору датчиків, техніки управління, об'єднання сенсорів і побудови оптичних систем для внутрішньовиробничого моніторингу та управління

Результати магістерської атестаційної роботи висвітлені в збірнику студентських наукових статей ADED-2020 [1].

ABSTRACT

Explanatory note: 94 p., 2 tables, 57 figures, 1 app., 43 sources.

OPTICAL SWITCH, LIGHT GUIDE, CALCULATION, MODELING, POSITIONING, MONITORING, MICRO-MIRROR, ARRANGEMENT, DESIGN.

The object of research is the process of control and positioning of the mirror in optical switches.

The subject of the research is optical switches of connecting optical fibers.

The purpose of the master's attestation work is to conduct research of optical switches, perform calculations of various parameters of the switch and conduct modeling of mirror positioning and control.

Research methods - mathematical methods of calculation, methods of electromechanical modeling in AWR.

The paper presents calculations of the torque of the drive mechanism, calculations of the electromagnetic and gravitational moment, calculations of the width of the mirror array and the moment of operation of the mirror. System design of 2D switches is expanded. Modeling of the rotary device and positioning of the mirror are carried out. The roles of in-house monitoring and control, sensor selection, control technology, sensor integration and construction of optical systems for in-house monitoring and control are described in detail.

The results of the master's attestation work were tested in the collection of student scientific articles ADED-2020 [1].

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ	10
1 Дослідження та аналіз оптичних перемикачів	12
1.1 Аналіз типів оптичних перемикачів	12
1.2 Аналіз конструкції оптичного перемикача	21
1.3 Модулятори даних	23
1.4 Змінні атенюатори	24
1.5 Двовимірні МЕМС-перемикачі	27
1.6 Тривимірні МЕМС-перемикачі	30
1.7 Нові технології і застосування МЕМС	32
1.8 Постановка задач досліджень	33
1.9 Висновки до першого розділу	33
2 Обґрунтування розрахунків основних параметрів перемикачів зв'язкових світловодів	35
2.1 Перехід від перемикачів до технологій	35
2.2 Розрахунок поворотного механізму	38
2.3 Системне проектування 2D перемикачів	42
2.4 Узгодження в перемикачах	47
2.5 Висновки до другого розділу	54
3 Моделювання поворотного пристрою	56
3.1 Виготовлення компонентів, дизайн та оптичні характеристики	56
3.2 Відгук скануючого дзеркала	60
3.3 Висновки до третього розділу	66
4 Моделювання позиціонування дзеркала і управління	67
4.1 Роль внутрішньовиробничого моніторингу та управління технологічним процесом	67

4.2 Ідеальні датчики для оптичних вимірювань в процесі роботи	72
4.3 Технологія управління	73
4.4 Виробнича санітарія у лабораторії	84
4.5 Висновки до четвертого розділу	85
Висновки.....	87
Перелік джерел посилання.....	89
Додаток А Демонстраційний матеріал у вигляді презентації	94

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АТО – автоматизоване тестове обладнання;

АФАР – активна фазована антенна решітка;

ВЧ – високочастотні;

ДСТУ – державні стандарти України;

ІКТ – інформаційних і комунікаційних технологій;

МЕМС – мікроелектромеханічні системи;

МОЕМС – мікро-оптоелектромеханічна система;

СВЧ – мікрохвильове випромінювання;

СНіП – санітарні норми і правила;

MEMS – Microelectromechanical systems.

ВСТУП

Сфери застосування оптичних перемикачів великі і включають всі типи бездротової комунікації, а саме: телекомунікаційний зв'язок (мобільні телефони, точки бездротового доступу), супутники і наземні станції, радарні системи, контрольно-вимірювальне та тестове обладнання, автоматизоване тестове обладнання (АТО), медичні прилади.

Перемикачі ВЧ – одні з найбільш затребуваних радіокомпонентів, які входять до складу перемикаючих конденсаторів, ліній затримки, атенуаторів, різного роду модуляторів, фільтрів, синтезаторів частот, приймально-передавальних модулів та ін. Незамінну роль перемикачі грають в радіолокаційних і зв'язкових комплексах, в тому числі при резервуванні потужних ліній для підвищення надійності.

Для перемикання ВЧ сигналів найбільш перспективними є перемикачі на основі мікроелектромеханічних систем (МЕМС), оскільки вони задовольняють нижчеперелічених вимогам:

- дозволяють отримувати перемикачі ВЧ сигналів з нульовим енергоспоживанням в стані спокою;
- дозволяють знизити розміри і вагу перемикачів;
- дозволяють знизити енергоспоживання оптичних перемикачів;
- значно зменшують час перемикання в порівнянні з механічними перемикачами.

Об'єкт дослідження – процес керування та позиціонування дзеркала в оптичних перемикачах.

Предмет дослідження – оптичні перемикачі зв'язкових світловодів.

Мета магістерської атестаційної роботи – проведення досліджень оптичних перемикачів, виконати розрахунки різних параметрів перемикача та провести моделювання позиціонування дзеркал та управління.

Методи дослідження – математичні методи розрахунку, методи електромеханічного моделювання в AWR.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити різні типи оптичних перемикачів, порівняти їх конструкторські та технологічні характеристики;
- провести дослідження надійності перемикачів;
- провести розрахунки параметрів перемикачів;
- провести теоретичний аналіз спрацювання дзеркала;
- провести моделювання поворотного пристрою та позиціонування дзеркала;
- провести комплекс експериментальних досліджень в оптичних перемикачах;
- оформити магістерську атестаційну роботу згідно ДСТУ 3018:2015 [2], та методичними вказівками з розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [3].

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОПТИЧНИХ ПЕРЕМИКАЧІВ

1.1 Аналіз типів оптичних перемикачів

Перемикачі світлового потоку є одними з ключових елементів, які застосовуються при створенні оптичних комутаторів (all-optical switches), які також називають ООО-комутаторами (optical-optical-optical). На основі оптичних комутаторів піддається реалізації побудова повністю оптичних мереж (All Optical Networks, AON).

Існують різні перемикачі світлового потоку, побудовані із застосуванням різних фізичних принципів, такі як: електрооптичні, магнітооптичні, мікроелектромеханічні, бульбашкові, термооптичні, оптомеханічні, а також перемикачі на основі напівпровідникових оптичних підсилювачів [4].

Волоконно-оптичні перемикачі призначені для перемикання каналів між собою і підключення їх до спільного світоводного тракту.

Основні вимоги до перемикачів:

- мінімальні перехресні втрати;
- малі оптичні втрати (наскрізні);
- висока швидкодія.

Для побудови оптичних перемикачів можуть використовуватися також більш швидкодіючі ефекти, такі як дифракційний акустичний ефект: дифракція оптичних хвиль на акустичній хвилі і магнітооптичний ефект Фарадея, пов'язаний з обертанням площини поляризації в магнітооптичних кристалах під дією поздовжнього магнітного поля. У схемі з електромагнітним керуванням (рис. 1.1) лівий верхній світловод жорстко пов'язаний рухомим якорем електромагніту. При відсутності напруги на обмотці управління світловод 1 знаходиться в верхньому положенні. У цьому

випадку здійснюється оптичний зв'язок між світловодами 1 і 2. При подачі напруги на обмотку електромагніта яркір переміщує пов'язаний з ним світловод 1 з верхнього положення в нижнє, що призводить до встановлення оптичного зв'язку між світловодами 1 і 3. Частота перемикачання такого пристрою становить одиниці-десятки герц [5].

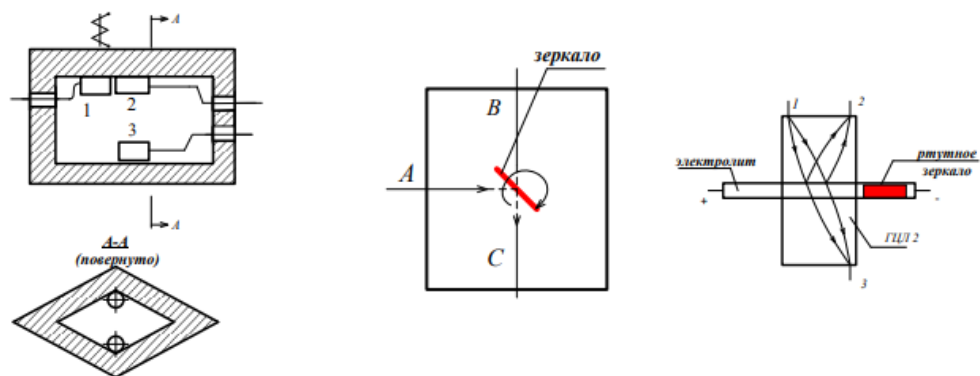


Рисунок 1.1 – Конструкції оптичних перемикачів [5]

У схемі перемикача з обертовим дзеркалом (рис. 1.1) зв'язок між світловодами А і С виникає, коли кут нахилу дзеркала щодо осі світловода дорівнює 45 градусів. Якщо кут дорівнює мінус 45 градусів, то виникає зв'язок між світловодами А і В. Швидкість перемикачання в цьому пристрої визначається частотою обертання дзеркала і може досягати декількох кілогерц.

В електрооптичних перемикачах (рис. 1.1) ртутна крапля, розташована в капілярі, переміщається під дією електричного поля, що створюється зовнішнім джерелом напруги. Якщо дзеркало знаходиться в зазорі між ГЦЛ1 і ГЦЛ2, то здійснюється оптичний зв'язок між полюсами 1 і 2. Якщо крапля знаходиться поза, здійснюється зв'язок між полюсами 1 і 3.

До експлуатаційних характеристик оптичних перемикачів прийнято відносити, такі параметри:

- швидкість перемикання;
- розмірність матриці;
- вносяться втрати.

В ієрархії швидкостей перемикання в оптичних мережах розрізняють чотири рівні швидкостей перемикання [4]:

- низькі (час перемикання порядку від 10 с до 3 с);
- середні (час перемикання порядку від 10 с до 6 с);
- високі (час перемикання порядку від 10 с до 9 с);
- дуже високі (час перемикання близько 10 с).

Розмірність матриці визначається кількістю вхідних і вихідних портів. Внесені втрати – ослаблення сигналу в процесі комутації.

Електрооптичні перемикачі виробляються на основі кристала ніобата літію (UNbO_3), із застосуванням лінійного електрооптичного ефекту Поккельса, при якому під дією прикладеного до кристалу електричного поля відбувається зміна коефіцієнта заломлення світла. Електрооптичний ефект проявляється в тому, що при впливі електричного поля на деякі оптично прозорі кристали відбувається зміна показника заломлення матеріалу, і відповідно змінюється інтенсивність світла, що пройшло через кристал. Однак пристрої з літію дуже чутливі до поляризації випромінювання [6].

На основі літературних даних і публікацій аналізуються різні типи перемикачів світлового потоку в оптичних комутаторах, із застосуванням яких можлива побудова повністю оптичних мереж. Необхідність створення повністю оптичних мереж обумовлена вирішенням проблеми передачі постійно зростаючого обсягу трафіку даних.

Ключова роль у створенні повністю оптичних мереж відводиться оптичним комутаторам, так як без них не представляється можливим реалізація основної парадигми повністю оптичних мереж – прозорості всіх компонентів мережі в умовах побудови розгалужених оптичних мереж. Необхідна комутація на оптичному рівні (тобто комутація здійснюється без

перетворення оптичного сигналу в електричну форму і назад), яка реалізується за допомогою оптичних перемикачів. Будуть розглянуті перемикачі, побудовані із застосуванням різних фізичних принципів, такі як: електрооптичні, магнітооптичні, мікроелектромеханіетичні, бульбашкові, оптомеханічні, а також перемикачі на основі напівпровідникових оптичних підсилювачів.

Було проведено порівняння за ключовими показниками, таким як, швидкість перемикання, що вносяться втрати, споживана потужність і тд. Розглянуто основні переваги та недоліки різних типів оптичних перемикачів.

Магнітооптичні перемикачі реалізують комутацію світлового потоку за допомогою оптичних пристроїв примикають до магнітоактивного елементу.

Магнітоактивний елемент здійснює поляризаційну модуляцію світла при впливі керуючого магнітного поля, в основі даного процесу лежить ефект Фарадея. Швидкість перемикання магнітооптичного перемикача не поступаються досягнутим результатам для промишлених зразків електрооптичних перемикачів і становлять величину порядку 10 нс. Рівень внесених втрат планарного магнітооптичного перемикача, який застосовує в якості узгоджувальних елементів градієнтні мікролінзи, складає 2,54 дБ. Питома споживана потужність становить близько 20 мкВт/МГц [7].

MEMS, в яких кожне мікродзеркало обертає, тобто плоске дзеркало повертається на певний фіксований кут і комутує відбитий промінь на вихідний порт. Залежно від принципу фізичної конструкції масивів мікродзеркал розрізняють 2D MEMS і 3D MEMS. В зв'язку з особливостями фізичної реалізації 2D MEMS для створення комутатора пхп (входів/виходів) потрібно n^2 дзеркал. Таким чином, при збільшенні кількості портів стає істотною проблема погіршення рівня сигналу, викликана збільшенням довжини оптичного шляху, прохідного сигналу від вхідного порту до вихідного.

Розглянемо переваги та недоліки досліджуваних перемикачів світлового потоку.

До переваг електрооптичних перемикачів можна віднести твердотільні конструкції, швидкість перемикання, а до недоліків – вносяться втрати, поляризація, масштабованість, вартість.

Магнітооптичні перемикачі: переваги: втрати практично не залежить від довжини хвилі, не потрібно енергії для підтримки швидкості перемикання; недоліки – велике споживання потужності, саморозігрів.

До переваг МЕМС перемикачів відносять високу відбивну здатність, малу дисперсію і аберацію, невелику вартість, мініатюрність, масштабованість, до недоліків: крихкість, надійність, низьку швидкість перемикання.

До переваг оптико механічних перемикачів відносять: простота реалізації, оптичні характеристики, а до недоліків – швидкість перемикання, складність при пересуванні комутуючих елементів.

Бульбашкові перемикачі: переваги – надійність, модульна масштабіруемість, недоліки – швидкість перемикання, низька стабільність і високі вносяться втрати.

До переваг ППОУ перемикачів відносять швидкість, компенсацію втрат, недоліки – шум, масштабованість.

Дана проблема вирішується в 3D МЕМС, в якій для реалізації комутатора потрібно $2n$ дзеркал. При цьому основними проблемами 3D МЕМС залишаються більш жорсткі вимоги до дзеркала, системам його позиціонування і розміщення керуючих електродів. Розмірність матриці сучасних оптичних комутаторів [4] з технологією 3D МЕМС становить 320 x 320 портів, швидкість перемикання від 10 мс до 20 мс, що вносяться втрати – 2 дБ, споживана потужність 45 Вт. В даний час ведеться робота по збільшенню розмірності матриці оптичного комутатора, так показано, що є можливість створення оптичного комутатора з розмірністю матриці 512 x 512

(застосовується масив 2 x 2, з 128 портами в кожному масиві, рис. 1.2) і вносяться втрати не більше 1,5 дБ [8].

Оптомеханічні перемикачі являють собою рухливий відрізок оптичного волокна, що переміщується за допомогою механічного повзунка. При цьому пересування комутуючих компонентів повинно контролюватися з високою точністю. Даний тип перемикачів затребуваний для організації резервування та в деяких видах випробувального устаткування, так як він простий в реалізації і вартість його не велика [6]. Швидкість перемикання від 10 мс до 25 мс. Внесені втрати менш 0,5 дБ.

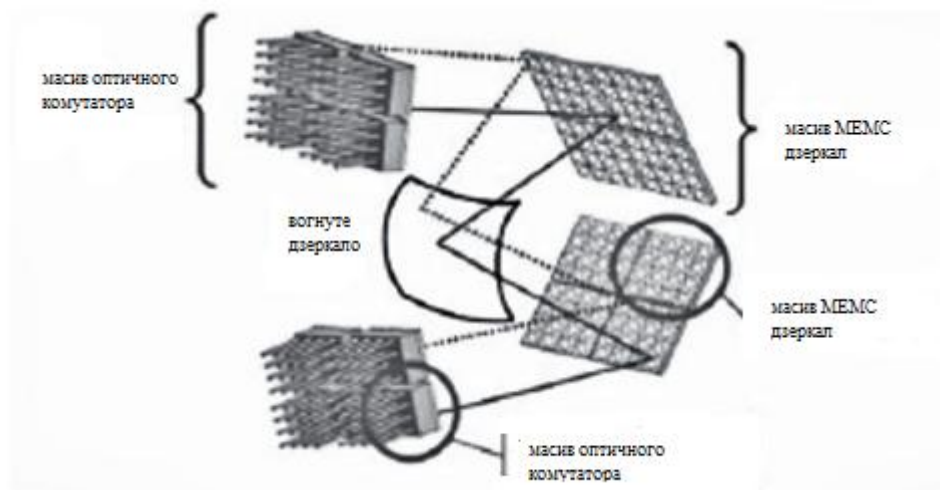


Рисунок 1.2 – Схема оптичного перемикача 3D MEMS з тороїдальним увігнутих дзеркалом [6]

Бульбашкові перемикачі використовують принцип блокування світлового потоку шляхом утворення повітряної бульбашки в точці комутації або переміщення повітряної бульбашки в точку комутації при нагріванні. Суть полягає у використанні двох наборів кремнієвих підкладок з поздовжніми смужками. Нижня підкладка має шар, що складається з виправлених в кремнії поздовжніх мікроскопічних канавок, що перетинаються один з одним. Ці канавки заповнені спеціальною рідиною, що

має той же показник заломлення, що і кремній. Вони грають роль хвилеводів, за якими може поширюватися вхідний світловий потік. На верхній підкладці розташовуються електроди, протікання струмів за якими викликає нагрів рідини і утворення бульбашок газу в місці перетину канавок. У звичайних умовах світло безперешкодно проходить через рідину. Але коли в одному з перетинань утворюється пухирець, вхідний промінь світла, що несе інформаційний сигнал, відбивається від нього, змінює свій напрямок і направляється в інший канал. Швидкість перемикавання менше 10 нс, що вносяться втрати менше 5 дБ.

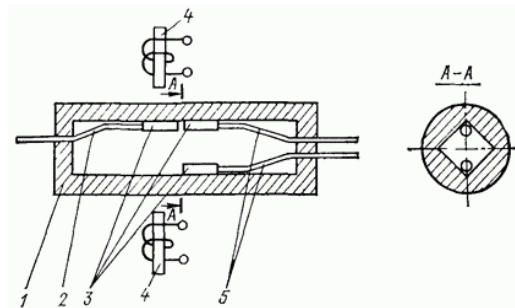
Перемикачі на основі напівпровідникових оптичних підсилювачів (ППОУ) в якості керуючого механізму використовують напругу зсуву. Якщо істотно зменшити цю напругу, то інверсії населеності досягти не вдасться і відбудеться поглинання вхідного сигналу підсилювачем. Якщо збільшити напругу, то відновлюється нормальне посилення сигналу. Швидкість перемикавання менш 1 нс. Внесені втрати 0,05 дБ [7].

Всі волоконно-оптичні перемикачі можна розділити на дві групи: механічні, в яких перерозподіл оптичної енергії відбувається в результаті руху волоконних світловодів, дзеркал, призм, рідин та інших елементів; оптичні, в яких зміна напрямку оптичного променя відбувається в результаті зміни оптичних параметрів нерухомою середовища поширення випромінювання.

Найбільш широке застосування знайшли механічні перемикачі, в яких здійснюється рух волоконного світловода. Поєднання рухомого і нерухомого волоконних світловодів здійснюється або за базовою поверхні – образної канавки (рис. 1.3), або за рахунок точного позиціонування рухомих вузлів, що містять світловоди, щодо нерухомих.

Перемикачі цього типу достатньо технологічні, вони забезпечують як для одномодових, так і для багатомодових волокон низький рівень оптичних

втрат (від 0,3 дБ до 1,5 дБ) і перехресних перешкод (менш 60 дБ, а можливо і менш 120 дБ), малу споживану потужність (від 2 мВт до 20 мВт).



- 1 – корпус; 2 – рухливий волоконний світловод; 3 – наконечники, армуючі волоконні світловоди, 4 – магнітна система;
5 – нерухомі волоконні світловоди

Рисунок 1.3 – Механічний оптичний перемикач з рухомим волоконним світловодом [7]

Їх недоліками є обмежена швидкодія (від 2 мс до 50 мс) і чутливість параметрів до зовнішніх впливів. Природно, що перемикачі із застосуванням мікролінз менш чутливі до вібрації, теплових впливів і т.д. [9].

Перемикачі на основі рухомих дзеркал, завжди вимагають використання колімуючих елементів (рис. 1.4). Вони мають параметри, аналогічні параметрам механічних перемикачів на основі рухомих волоконних світловодів, і аналогічні переваги і недоліки. В даний час вони використовуються тільки для багатомодових світловодах.

Розроблено також перемикачі з використанням рідин в якості переміщуваного оптичного елемента. Перемикач на основі рухається в електроліті дзеркала з ртуті (рис. 1.5) має дуже малу керуючу потужність (~ 25 мкВт), витримує до 10⁷ перемикань без деградації, але оптичні втрати в ньому вище (від 0,5 дБ до 2 дБ), ніж у механічних, і досить значні перехресні перешкоди (від 22 дБ до 51 дБ).

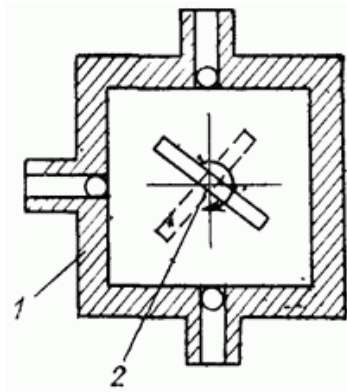


Рисунок 1.4 – Механічний оптичний перемикач з рухомим дзеркалом [9]

Досліджувалася також можливість створення перемикачів з зазором між торцями волоконних світловодів, заповненим рідиною. При заповненні зазору рідиною з показником заломлення, рівним показнику заломлення серцевини, умова повного внутрішнього відбиття від скошених торців порушується і випромінювання надходить у вихідний світловод. Однак такі пристрої навряд чи знайдуть широке застосування, так як вони не мають переваг по швидкодії і характеризуються гіршими значеннями перехресних перешкод.

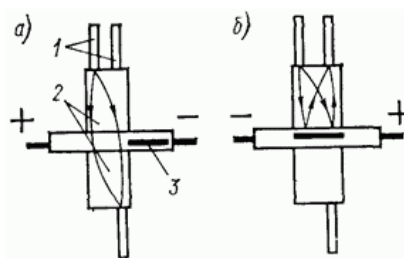
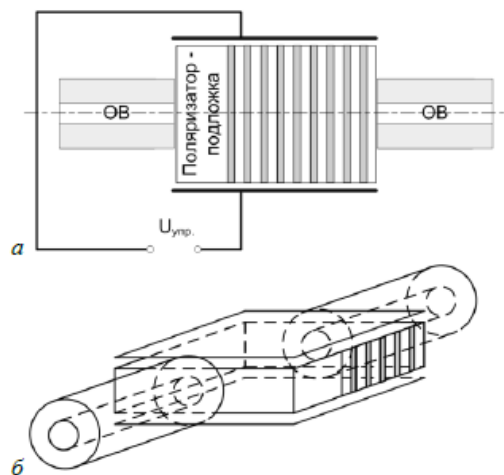


Рисунок 1.5 – Оптичний перемикач з рухомим в електроліті дзеркалом [9]

Недоліком всіх механічних перемикачів є наявність рухомих елементів, що принципово знижує їх надійність і робить чутливими до зовнішніх впливів.

1.2 Аналіз конструкції оптичного перемикача

Геометричні розміри в 11 мкм дозволяють здійснювати вирощування шарів дзеркала безпосередньо на одному сколе волокна. Далі повинна слідувати прецизійне стикування з серцевиною другого волокна (рис. 1.6, а, б) Розміщення конструкції в імперсіоній рідині з низьким показником заломлення, яке буде виконувати функції, аналогічні функціям оболонки звичайного оптичного волокна. Далі слід герметизація, нанесення епоксидного клею і посилення конструкції трьома пластмасовими прутками для міцності.



а – перемикач; б – прецизійна стикування волокон

Рисунок 1.6 – Конструктивне виконання перемикача [10]

Для успішного вирішення завдання підведення високочастотних імпульсів управління використовується досягнення СВЧ-електроніки і мікропроцесорної техніки. На поточному етапі розвитку цих напрямків є можливість генерації в безпосередній близькості до оптимізації перемикача пристроєм управління високочастотних сигналів, наприклад генерація і посилення другої гармоніки в нелінійних фотонних кристалах або генерація

НВЧ-коливань до 150 ГГц в діодах Ганна. Так як електрооптичний ефект Керра досить швидкий ефект, динаміка в ньому визначається часом релаксації речовини 10-10-10-11 с, то швидкість роботи оптичного перемикача повністю визначається інертністю ланцюгів передачі сигналу і інерційністю обкладок конденсатора [10].

Для успішного вирішення завдання введення оптичної потужності в світловідомій частині оптичного волокна з мінімальними втратами, пропонується використовувати способи колімації оптичного випромінювання. Колімація оптичного випромінювання дозволить зменшити внесене затування.

Внесене структурою загасання в основному визначається зменшенням знову введеної потужності випромінювання в торець оптичного волокна за рахунок розходження світлового пучка. Загасання для представленої багатосарової структури протяжністю в 11 мкм без додаткових коштів колімації становить 1,21 дБ в проходить сигнал в довжинах хвиль повного пропускання і 1,81 дБ – в відбитий в довжинах хвиль відображення.

Вплив модуляційної нестійкості не веде до перевищення регламентної величини амплітуди джиттера при оптичної потужності сигналів в межах 0,07 Вт. Імовірність битової помилки не перевищує значення при вхідної оптичної потужності, що дорівнює 0,07 Вт. Тому модуляційна нестійкість є незначною.

Нелінійні параметричні процеси, які проявляються у вигляді гармонійних складових, не призводять до спотворення корисного сигналу. Останнє пов'язано з тим, що порогові потужності, необхідні для генерації паразитних гармонік навіть при досягненні повного синхронізму, виявляються близько від 37 Вт до 54 Вт, тобто істотно перевищують значення потужності 0,07 Вт. Таким чином, дією інших нелінійних ефектів (крім нелінійного заломлення) для вхідного сигналу 0,07 Вт можна знехтувати.

1.3 Модулятори даних

Перше практичне застосування MEMS-пристроїв у волокні зв'язку було в якості оптичного модулятора даних, спочатку призначеного для недорогої мережі. Модулятор це, по суті, перемикач 1×1 , що працює в будь-якій передачі, (два волокна) або відображення (одне волокно). Оптична потужність надається віддаленим джерелом постійної інтенсивності, і модулятором у відповідь на відкриття і закриття друкує сигнал даних до прикладеної напруги. Сигналізація в оптоволоконних мережах DWDM зазвичай вимагає дорогого лазера з керуванням довжиною хвилі. Пасивні модулятори даних пропонують потенційно недороге рішення, але хвильові модулятори теж були дорогі і занадто вузькі в оптичній спектральній смузі пропускання, щоб бути практичними компанія MEMS запропонувала нове і практичне рішення.

Механічний модулятор (MARS) це змінний еталон з повітряним зазором, що працює в тіні. Основна структура являє собою чверть хвильового діелектричного покриття антивідблиску, підвішене над кремнієвою підкладкою. Хвильовий шар виготовлений з нітриду кремнію з оптичним трактом $1/4\lambda$, що становить приблизно 0,2 мкм. Механічно активний шар нітриду кремнію є підвішений над повітряним зазором, створеним фосфосілікатом товщиною $3/4\lambda$, жертвний шар скла (0,6 мкм). Без деформації, пристрій працює як діелектричне дзеркало приблизно на 70 % (1,5 дБ) відбивної здатності. Напруга, прикладена до електродів на верхній частині мембрани, створює електростатичну силу і витягує мембрану ближче до субстрату, в той час як натяг мембрани забезпечує лінійна відновлювальна сила. Коли зазор мембрани зменшується до $\lambda/2$ шар стає близьким до нуля.

У більш пізніх пристроях використовувалася висока вихідна потужність структури із симетричною геометрією. Ці пристрої були здатні на відносно високу швидкість операції: шляхом оптимізації розміру і відстані між протруєння, отвору доступу, забезпечуючи критичне механічне

демпфірування. У той час як така швидкість передачі даних більше не актуальна для телекомунікацій, навіть для волоконно-оптичних модулів, відповідні модулятори корисні для малопотужних розсіювачів енергії, телеметрії з дистанційних датчиків з використанням космічної оптики зв'язку. На рисунку 1.7 показана конфігурація для дуплексного модулятора, що включає еталон MEMS, де дані можуть бути отримані фотодіодом і передані, модулюючи еталонну відбивну здатність.

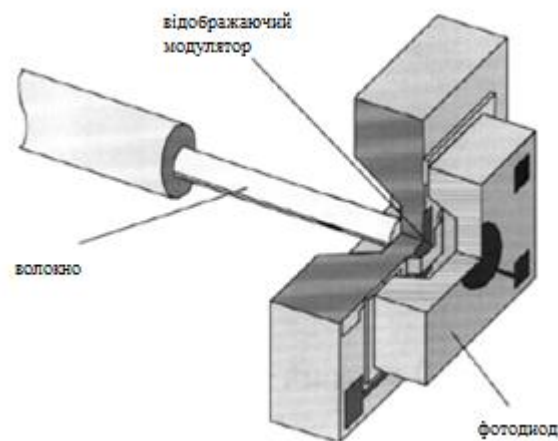


Рисунок 1.7 – Пакетна конфігурація приймача даних MEMS [8]

1.4 Змінні атенюатори

Модулятори даних працюють з цифровими сигналами, проте фундаментальна реакція еталонного модулятора аналогова. Електрично керовані змінні атенюатори були побудовані за допомогою оптичних компонентів з електромеханічним приводом. Волоконні ербієвні підсилювачі можуть використовувати змінні атенюатори, щоб пригнічувати перехідні скачки напруги, але необхідна тимчасова шкала 10 мкс, набагато повільніша, ніж швидкість модуляції даних. MEMS забезпечили привабливу заміну оптомеханічним атенюатором [8].

Перший MEMC атенюатор був виготовлений шляхом масштабування оптичної апертури модулятора MARS від 25 мкм до 300 мкм так, що він міг бути освітлен колімірованим променем, відбитий сигнал був сфокусований в окреме вихідне волокно, уникаючи необхідності використання зовнішніх циркуляційних насосів для поділу вихідного сигналу. Перший такий пристрій показано на рисунку 1.8.

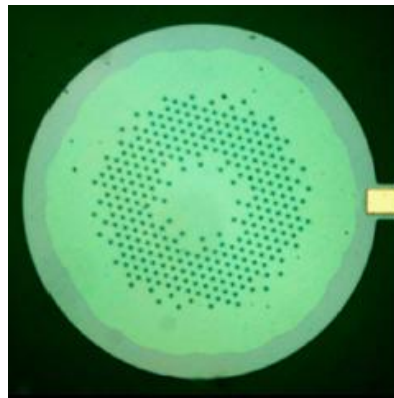


Рисунок 1.8 – MEMC-еталон змінного атенюатора з використанням барабанної головки діаметром 0,5 мм [8]

Залежність довжини хвилі простого еталона від довжини хвилі становила зменшення, з використанням більш складного трьохшарового діелектричного стека, як механічно активної структури, де оригінальний кремній $1/4\lambda$ шар нітриду затиснутий між струмопровідним полікремнієвим верхом (товщина $1/2\lambda$) і нижнім (товщина $1/4\lambda$) шаром.

Цей атенюатор забезпечує швидкий (3 мкс) відгук з керованими 30 дБ, загасання в робочій смузі пропускання 40 нм, з 0,06 дБ, поляризаційні втрати в залежності від поляризації, а також підтримується 100 мВт рівень потужності, присутній в підсилювачах.

Самий прямий підхід до загасання – це використання MEMC приводу для вставки оптичного блоку між входами і вихідного волокна. Це було

реалізовано за допомогою поверхневої мікрообробки. і з гребінчастим приводом. Такі атенюатори пропонують відмінний динамічний діапазон (вимір обмежен при 90 дБ), але втрати, що залежать від поляризації, можуть бути великими (1 дБ) при високих значеннях.

Необхідні подальші поліпшення, і вони були зроблені, об'єднання геометрії колімірованого пучка з крутінням першої поверхні. Дзеркальний рефлектор забезпечив структуру з низьким рівнем втрат, що вносяться і з чудовими спектральними і поляризаційними характеристиками. Наприклад, пристрій, продемонстрований Isamoto досяг 40 дБ загасання за допомогою дзеркала 600 мкм з приводом від 5 В для нахилу вгору на $0,3^\circ$. Аналогічні зміни були комерціалізовані, хоча конкретні проекти не були опубліковані.

Інші комерційні MEMC атенюатори засновані на дифракційному MEMS-пристрої, також використовується з колімірованим променем. Пристрій забезпечує відмінні оптичні характеристики, а також високу швидкість: стабільна робота з контрастом 30 дБ і менш ніж час відгуку 40 мкс при використанні 8 В приводу [9].

Нова структура дифракційного MEMC атенюатора, показана на рис.1.9, використовується для того, щоб подавити залежність від поляризації втрат до величини менше 0,2 дБ.

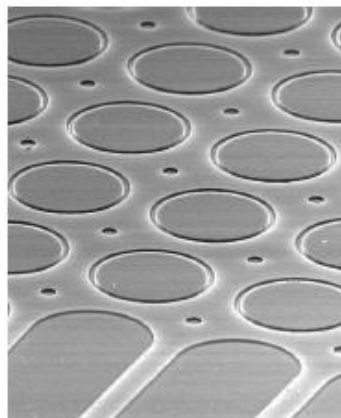


Рисунок 1.9 – Дифракційні MEMC атенюатори [9]

1.5 Двовірні МЕМС-перемикачі

Захисні перемикачі виготовляються з $1 \times N$ або маленьких $N \times N$ перемикачів. Це може бути реалізовано за допомогою двовірного масиву вертикальних мікродзеркал, широко відомих як 2-D MEMS перемикачі. На рисунку 1.10 показано загальну схему такого перемикача. Оптичні промені колімуючі, щоб зменшити дифракційні втрати. Мікродзеркала: вони або направляють оптичні промені на ортогональні вихідні порти або передають їх в падаючі порти.

Зазвичай, тільки одне мікродзеркало в стовпці або рядку знаходиться в положенні відображення під час роботи [10].

Для 2×2 перемикачів, низькі втрати (0,6 дБ) можуть бути досягнуті без використання коліматора, особливо, коли мікродзеркало занурене в індексуєчу рідину. Замикання 2×2 перемикачів, що включають бістабільні структури MEMS, було пізніше комерціалізоване. Для більших перемикачів потрібні оптичні коліматори для зменшення дифракційних втрат. Існують два основні підходи до спрацьовування мікродзеркала. Перше базується на обертанні мікродзеркала.

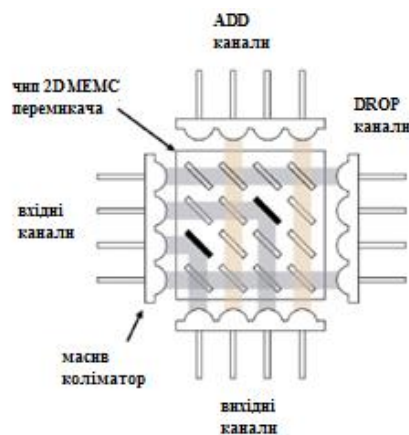


Рисунок 1.10 – Схема 2-D MEMS оптичних перемикачів [10]

Дзеркало спочатку паралельно підкладці (положення OFF). При спрацьовуванні воно повертається у вертикальне положення (ON). Другий підхід переміщуються вертикальні мікродзеркала, що входять і виходять з оптичних шляхів без зміни кута дзеркала. 2-D перемикачі були реалізовані за допомогою обох насипних мікрообработок і технології поверхневої мікрообробки. Найбільш часто використовується електростатичне приведення в дію. Також було продемонстровано магнітне спрацьовування.

Кількість портів 2-D перемикачів визначається декількома факторами, включаючи кут дзеркала, розмір, коефіцієнт заповнення (ширина дзеркала), і кривизну. Для мінімізації оптичних дифракційних втрат конфокальна геометрія використовується з середньою довжиною оптичного тракту, рівний діапазону, який пропорційний квадратику талії оптичного променя. Тому необхідні більші дзеркала, щоб підтримувати довшу довжину реле в більш високих комутаторах з великою кількістю портів [11].

У перемикачі $N \times N$ розмір дзеркала масштабується як N , в той час як лінійний розмір мікросхеми масштабується як N^2 . Великі чіпи більш сприйнятливі до недосконалостей дзеркальних кутів, які викликають згасання оптичних пучків на прийомних волокнах. В кінцевому рахунку, розмір чіпа буде обмежений виготовленням точності мікродзеркала. 16×16 перемикачі були реалізовані, і 32×32 перемикачі знаходяться в межах можливостей сьогоднішніх технологій.

На рис. 1.11 показаний скануючий електронний мікрограф (СЕМ) з двомірного перемикача.

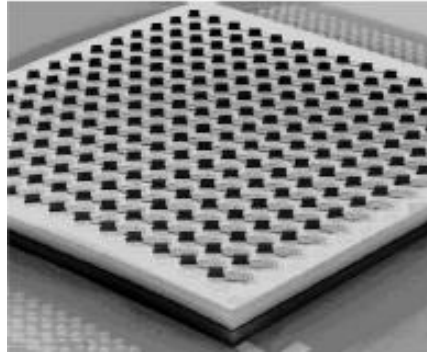


Рисунок 1.11 – СЕМ перемикач 16×16 [11]

Вертикальне дзеркало кріпиться на кінчик консолей. Похилий кантилевер можна зняти вниз електростатично. Кут дзеркала зберігається на 90° під час перемикання.

Дзеркала монтуються в вертикальному положенні з кутовим розподілом $(90 \pm 0,1)^\circ$.

Пакет герметичних перемикачів показаний на рисунку 1.12. Максимальні внесені втрати становлять 1,7 дБ і 3,1 дБ, отримані для перемикачів 8×8 і 16×16 відповідно, і перехресні перешкоди менше 50 дБ. Час перемикання менше ніж 7 мс [12].

Упаковка має вирішальне значення для досягнення довгострокової надійності і задоволення кваліфікації Telcordia в області телекомунікацій.

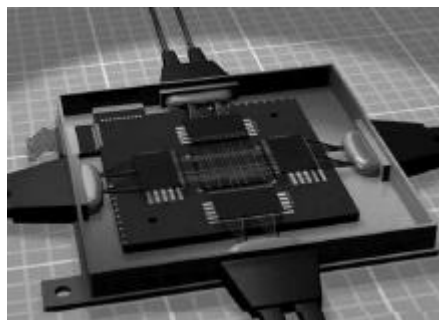


Рисунок 1.12 – Упакований перемикач [12]

1.6 Тривимірні MEMS-перемикачі

Прозорий оптичний поперечний перемикач з великим портом, підрахунок якого може бути реалізований за допомогою 3-D MEMS перемикачів, показаних на рисунку 1.13. Вхідні та вихідні волокна розташовані в 2-D масивах.

Оптичні промені направляються в трьох вимірах двома ступенями двохосьових мікродзеркал, направляючи його на потрібний вихід [13].

Порт 3-D MEMS комутатора має сприятливий закон масштабування по відношенню до кількості портів: припускаючи максимальний кут сканування, дзеркало фіксоване, довжина оптичного тракту пропорційне N в перемикачах $N \times N$.

Для підтримки конфокальної конфігурації як мінімум втрата, талія пучка, і, отже, розмір дзеркала, потрібні масштабуватися в міру \sqrt{N} . Детальне проектування компромісів і системних реалізацій 3-D MEMS були повідомлені недавно.

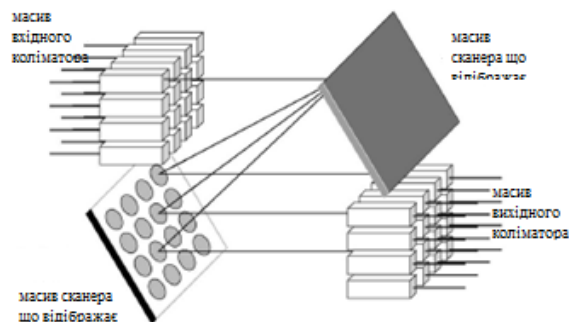


Рисунок 1.13 – Схема 3-D MEMS-перемикача [13]

Були запропоновані схеми зменшення розмірів перемикача і кута нахилу мікродзеркала. Lucent вставив лінзу Фур'є між двома мікрочіпами з

фокусною відстанню рівним діапазону променя (рис. 1.14), що зменшує необхідний кут сканування дзеркала. Крім того, дзеркала можуть бути розміщені на талії пучка, в результаті чого оптичні промені в 2 рази менші. Це дозволяє використовувати дзеркала меншого розміру і / або зменшити перехресні завади.

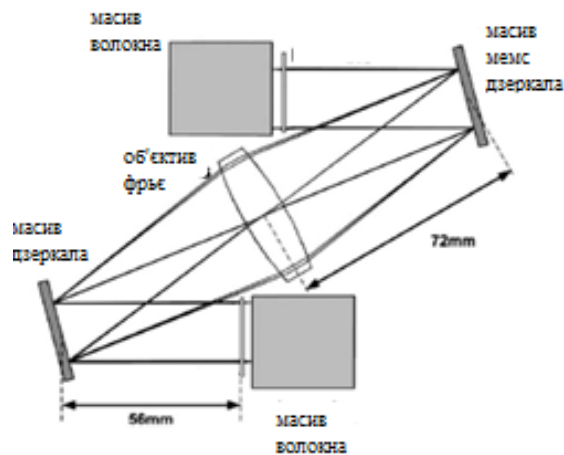


Рисунок 1.14 – Компонування оптичної системи Lucent [14]

Фуджитсу використовував «дах» дзеркала для з'єднання двох суміжних мікродзеркальних чіпів (рис. 1.15). Дзеркало даху зміщує оптичні промені в бічному напрямку, зменшуючи необхідний кут нахилу, складання оптичного променя також зменшує площу, займану вимикачем.

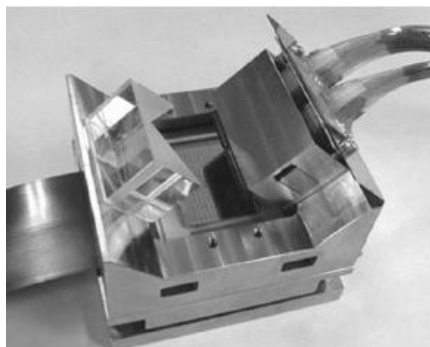


Рисунок 1.15 – З'єднання двох мікросхем MEMS [14]

1.7 Нові технології і застосування MEMC

Мікродиски або мікрорезонатори пропонують ще один порядок зменшення розміру для широкого діапазону функцій WDM, такі як мультиплексори додавання / видалення, компенсатори дисперсії, модулятори і лазери WDM. Напівпровідниковий мікрорезонатор з високим індексом контрастності може ще більше знизити розміри резонатора, що дозволяє отримати широкі FSR і невеликі розміри. Інтеграція MEMC з мікрорезонатора дозволить включити безліч параметрів функцій WDM. Порівняння з іншими механізмами настройки (теплова настройка, інжекція електроносіями або обрізка посилення в напівпровідниках), MEMC-тюнінг більш ефективний і споживає набагато менше енергії. Здатність фізично змінити відстань між хвилеводом і мікрорезонатором дозволяє контролювати коефіцієнт зчеплення, що є важливим параметром настройки для обробки більшості сигналів функції, але важко досягнути звичайними способами [15].

Резонатор мікродиска, налаштовується на кремній, та перебудовується оптичним зв'язком за допомогою приводів MEMS пристрою (рис. 1.16). Це вертикально пов'язаний мікродісковий резонатор з підвісними. Коефіцієнт оптичного зв'язку контролюється витягаючи хвилевід в сторону мікродиска. Фактор якості мікродиска вимірюється до 10^5 завдяки процесу згладжування шляхом водневого відпалу. Відстань між хвилеводом і мікродиском становить 1 мкм. З прикладеною напругою мікрорезонатора може перемикається між нижньою муфтою, критичної муфтою, або режимом розгону. При критичному з'єднанні оптичне пропускання наскрізного хвилеводу пригнічується за допомогою 30 дБ. У режимі розгону інтенсивність передачі становить майже 100 %, в той час як фази обурені навколо резонансу.

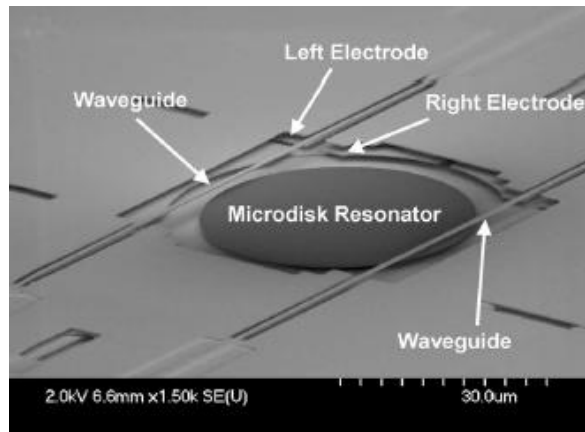


Рисунок 1.16 – СЕМ мікродіскового резонатора МЕМС зі змінними оптичними з'єднувачами [15]

1.8 Постановка задач досліджень

Отже, за проведеним аналізом предметної області сучасного стану виробництва оптичних перемикачів зв'язкових світловодів, не зважаючи на існуючі рішення, було визначено, що існує необхідність в розробці технологічного забезпечення якості оптичних перемикачів зв'язкових світловодів, шляхом моделювання.

Під якістю розуміємо наявність певної кількості властивостей і характеристик перемикачів, які входять в його якість і задовольняють вимогам.

1.9 Висновки до першого розділу

В першому розділі був проведений аналіз видів оптичних перемикачів. Визначено, що перемикачі світлового потоку є одними з ключових елементів, які застосовуються при створенні оптичних комутаторів, які також називають ОО-комутаторами. На основі оптичних комутаторів піддається реалізації побудова повністю оптичних мереж.

Існують різні перемикачі світлового потоку, побудовані із застосуванням різних фізичних принципів, такі як: електрооптичні, магнітооптичні, мікроелектромеханічні, бульбашкові, термооптичні, оптомеханічні, а також перемикачі на основі напівпровідникових оптичних підсилювачів.

Волоконно-оптичні перемикачі призначені для перемикання каналів між собою і підключення їх до спільного світоводного тракту.

Були розглянуті переваги на недоліки, та виявлені основні вимоги до перемикачів: мінімальні перехресні втрати; малі оптичні втрати (наскрізні), висока швидкодія.

Було проведено постановку завдання на дипломування, визначено, що точність позиціонування є основною складовою, що визначають якість роботи оптоелектронних перемикачів зв'язкових світловодів.

Основна частина роботи спрямована на розрахунки основних характеристик оптичних перемикачів та моделювання позиціонування дзеркала.

2 ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКІВ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕМИКАЧІВ ЗВ'ЯЗКОВИХ СВІТЛОВОДІВ

2.1 Перехід від перемикачів до технологій

Технологія мікрообробки має багато переваг, таких як мініатюризація, низька вартість, автоматичне вирівнювання, і надійність завдяки пакетним процесам. Области застосування включають магнітні головки для жорсткого диска, головки струменевих принтерів, мікродісплей (інформаційні технології), маніпулятори для телефонів, медичне обладнання для діагностики та хірургії, штучних організмів (біотехнологія), датчиків, автоматичного управління системи (зчитування та управління), оптичні перемикачі, дзеркала зі змінною фокусною відстанню, мікролінзи (оптичні компоненти), фільтри, форсунки, клапани та двигуни (сверхмалі пристрої).

МОЕМС (мікро-оптоелектромеханічна система) характеризується багатьма природними перевагами в порівнянні зі звичайними методами в мікрооптичних системах, отримана на основі технології мікрообробки. Вона може виробляти різноманітні оптичні компоненти, такі як мікродзеркала, мікролінзи, мікростопа, мікрорешітки і т.д. Серед них мікродзеркала грають важливу роль в маніпулюванні напрямком лазерного пучка у вільному просторі.

Мікродзеркало або його масив також може бути використаний для зміни напрямку світла вгору до підкладки під прямим кутом, щоб його можна було використовувати в якості багатопозиційного джерела світла. Принцип багатопозиційного джерела світла показаний на рисунку 2.1.

В цілому, МЕМС-дзеркало може приводитися до дії електростатичною або магнітною силою. Дзеркальний масив MEMS та мікрооб'єктив можуть

бути інтегровані системою лава, виготовлені з використанням процесу травлення кремнію.

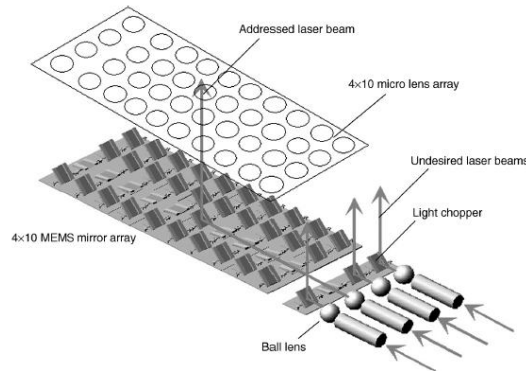


Рисунок 2.1 – Конфігурація масиву джерел світла 4×10 [16]

Дзеркало MEMC призначене для відбиття колімірованого променя під кутом 45 градусів. *Al* використовується для пружини і дзеркала, *Ni* використовується для м'якого магніту. Як показано на рисунку 2.2, форма магніту визначена наступним чином так, що він займає розумну площу в дзеркалі і збільшує анізотропію в магніті, для поліпшення виконавчих характеристик із зовнішнім магнітним полем.

Кожне дзеркало має електрод для електростатичного затиску, дзеркальну плиту для відбиття світла, магнітний матеріал для магнітного приводу, стопор для кутового управління прогином.

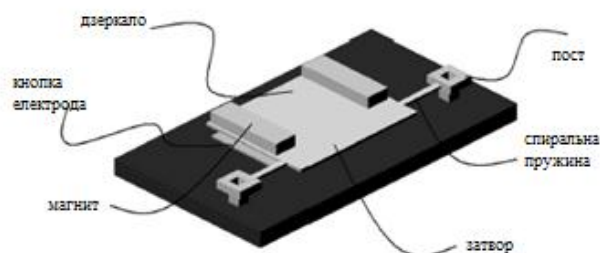
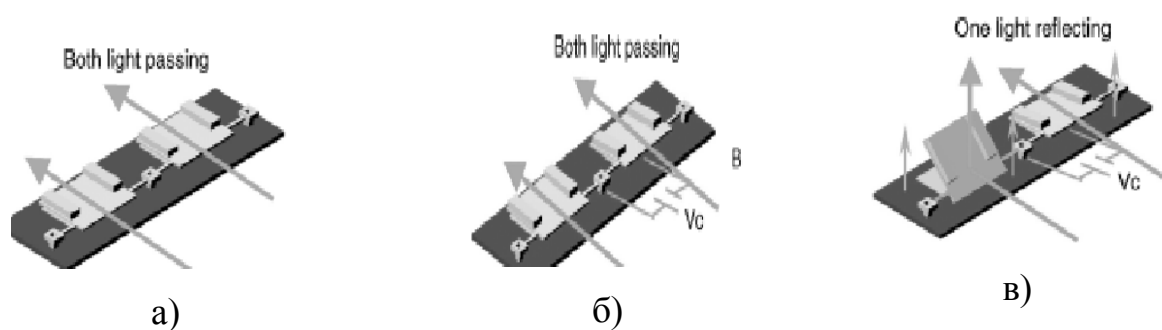


Рисунок 2.2 – Схематичний вид дзеркала MEMC [16]

Для перпендикулярного відображення до підкладки під прямим кутом потрібно 45° кутового відхилення мікродзеркала. Тому досить довгої пружини сконструйованої таким чином, щоб не піддаватися пластичній деформації в межах повної кутової роботи. Інше міркування – метод приведення в дію при великому кутовому відхиленні. Електромагнітне спрацьовування, як відомо, більш вигідно, ніж інші методи з великим кутом спрацьовування і *Ni* використовується в якості м'якого магнітного матеріалу для електромагнітного приведення в дію. Останнє міркування, що стосується пристрою, – це механічна пробка, яка призначена для управління кутовими прогибами точно з використанням розмірного співвідношення дзеркала. Функція стопора полягає в тому, щоб доторкнутися до підкладки і запобігти подальшому обертанню дзеркала, коли досягне повного обертання на 45° .

Спрощений вид послідовності операцій показаний на рисунку 2.3. Як показано на рисунку 2.3, а всі дзеркала паралельні підкладці в початковому стані. Щоб звернутися до конкретного дзеркала, всі інші дзеркала затискаються, подаючи напругу, як показано на рисунку 2.3, б. Потім, якщо застосовується магнітне поле, це специфічне дзеркало, не затиснуте електростатичною силою, відхиляється, як показано на рис. 2.3, в.



а) початковий стан; б) стан адресації; в) стан спрацювання

Рисунок 2.3 – Послідовність роботи дзеркала 2x1 мікро [16]

2.2 Розрахунок поворотного механізму

Для розуміння приводного механізму відповідно крутний момент і взаємозв'язок між ними повинні бути відомі. На рисунку 2.4 показаний спрощений вид різних моментів, що генеруються в дзеркалі МЕМС, в розділі прикладене зовнішнє магнітне поле H . Коли магнітний матеріал на дзеркалі з вектором намагнічування сітки M поміщений в зовнішнє магнітне поле, H , момент T_n , прикладений до M на H , може бути виражений у вигляді:

$$T_n = VMH \sin \alpha , \quad (2.1)$$

де V – об'єм магніту;
 α – кут між H і M .

Момент, що крутить T_n , повертає M на кут θ в сторону від свого рівноважного напрямку, званого віссю "Легкість".

Однак, коли M повертається в бік від легкої осі, створюється магнітна анізотропія крутного моменту T_a , яка намагається перебудувати M в легку вісь. T_a може бути виражено як:

$$T_a = -K_a \sin \theta , \quad (2.2)$$

де K_a – магнітно-анізотропна константа.

У дзеркалах МЕМС домінуюча магнітна анізотропія обумовлена формою магнітного матеріалу, що дозволяє K_a висловити як:

$$K_a = \frac{1}{2\mu_0} (N_c - N_a)M, \quad (2.3)$$

де N_a і N_c – константи анізотропії форми довжини і товщини;
 μ_0 – діелектрична проникність вільного простору;
 M – намагніченість.

Оскільки крутний момент анізотропії T_a намагається повернути M і легку вісь назад, то рівний, але протилежний крутний момент T_a додається до легкої осі і, отже, до самого магнітного матеріалу.

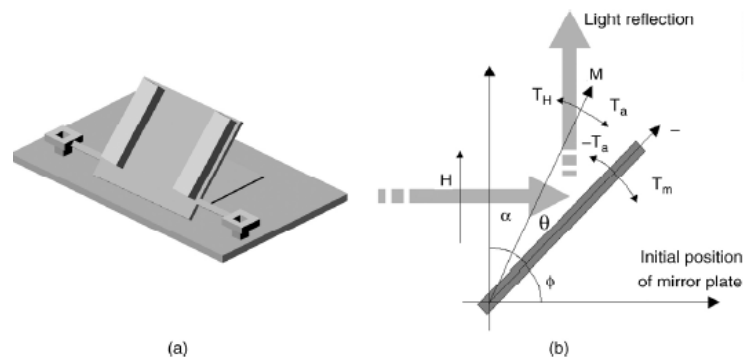


Рисунок 2.4 – Відповідні крутний момент для магнітного приводу [17]

Якщо магнітний зразок прикріплений до конструкції з крутальною жорсткістю $k\phi$, $-T_a$ змусить магнітний зразок повернутися на кут ϕ від своєї первісної орієнтації. Як ϕ збільшується, механічний відновлює крутний момент, T_m , наданий:

$$T_m = -K_\phi \phi . \quad (2.4)$$

Залежний коефіцієнт залишкового напруження $k\phi$ можна ігнорувати, оскільки навіть для напруги, що досягає 1 ГПа, член σJ пучка є дуже малою частиною K пучка G . Якщо напрямок зовнішнього магнітного поля залишається під постійним кутом γ до початкового напрямку легкої осі, тоді, спочатку $\alpha = \gamma$, воно зменшується на θ і ϕ , що дозволяє його переписати як:

При відхиленні дзеркала вниз електростатичний момент і гравітаційний момент рівні в напрямку проти часові стрілки, а також електромагнітний момент і механічний момент здійснюються за часовою стрілкою.

При малому кутовому відхиленні електромагнітний момент може виражатися словами:

$$T_n = VMH \cos \theta , \quad (2.7)$$

і гравітаційний момент може бути виражений як:

$$T_g = mgr \cos \theta , \quad (2.8)$$

де m – маса дзеркала і магніту;

g – прискорення сили тяжіння;

r – відстань від осі обертання до центра ваги.

Гравітаційний момент настільки малий у порівнянні з електростатичним моментом, що ефект гравітації може бути усунутий.

Якщо дзеркало має бути затиснуте під прикладеним зовнішнім магнітним полем, яке потрібно для відхилення дзеркала на 45° , сума електростатичного моменту і гравітаційний момент повинен бути більше, ніж сума електромагнітного моменту і механічний момент затяжки.

Тобто, для того, щоб затиснути дзеркало, необхідно виконати еквайзер

$$T_g + T_e > T_n + T_m . \quad (2.9)$$

2.3 Системне проектування 2D перемикачів

Найпростіша архітектура для 2D MEMS перемикачів – це поперечна мережа, показана на рисунку 2.6. Вхідні і вихідні волокна розміщені на двох перпендикулярних сторонах підкладки, на яких мікродзеркала відкинуті. Оптичні сигнали, що надходять з входу, оптичні волокна проходять через відповідну систему колімування, який виконує адаптацію напрямних світлових променів, які розповсюджують у вільному просторі. Після переміщення по MEMS матриці, промінь відхиляється дзеркалом в стані включення, в той час як він не піддається впливу дзеркала в вимкненому стані. В даному випадку, є тільки один маршрут для кожної пари вхід-вихід в мережі. Простота поперечини оплачується високою вартістю впровадження, так як кількість мікродзеркал в мережі $N \times N$ – це $2N$, і, таким чином, необхідна площа підкладки яка також збільшується квадратично. У поперечній балці оптичні сигнали також мають великі втрати: нерівномірність (диференціальні втрати), втрати (з одиничним відображенням) що в основному залежать від протяжності шляху, пройденого оптичним променем, довжина може варіюватися від 1 до $2N$ – відстані (кроку).

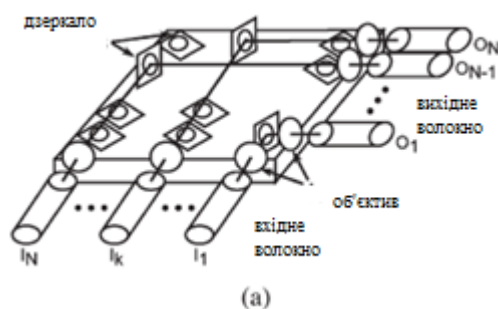


Рисунок 2.6 – Поперечна архітектура [19]

Матриця L-перемикання. Як випливає з назви, вона має форму як буква алфавіту *L* (рис. 2.7). Архітектура перемикання має три квадранта: квадрант перехрестя, на перехресті квадранти I і II, оснащені двосторонніми дзеркалами. У матриці $N \times N$ L-перемикача використовується $N^2/4$ двостороннє дзеркало і $N^2/4$ односторонні дзеркала в кожному з двох інших квадрантів на загальну суму дзеркал $3N^2/4$. Кожен світловий промінь може відобразитися тільки один або два рази, незалежно від мережі. Найдовший і найкоротший шлях у L-перемикачах мають довжину $N+N/2-1$ і $N/2+1$ крок відповідно. Максимальна довжина світла переміщення балок зменшується в порівнянні з поперечною балкою, зменшується найдовший шлях в L-образному перемиканні і зменшення максимуму можливі втрати при будь-якому підключенні вимикача (вносяться втрати). Зменшується максимальна різниця в шляху також від $2(N-1)$ кроку поперечної балки до $N-2$ кроки, зменшуючи диференціальні втрати. Крім того, в L-перемикачах матриця вимагає на 25 % менше похилих дзеркал, ніж звичайна поперечна архітектура.

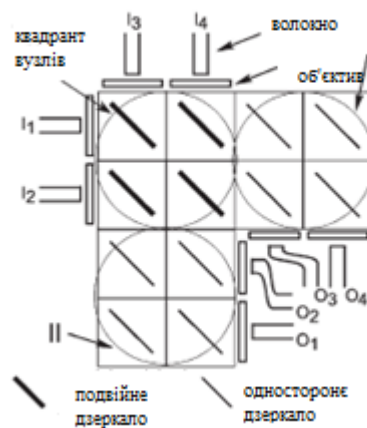


Рисунок 2.7 – 4×4 L-комутаційна архітектура [19]

Інша ефективна архітектура заснована на підключенні масивів конфігурації. На рисунку 2.8 показана архітектура з'єднання масивів 8×8 .

Мережа загального призначення $N \times N$ має N фіксовану і односторонній зв'язок дзеркала і $N(N - 1)/2$ рухливі і двосторонні дзеркала. Вхідний і вихідний порти розташовані по вертикалі і горизонталі по сторонам мережі. Найдовші і короткі шляхи вимірюють $N+N/2 - 1$ і $N/2 + 1$ кроку, відповідно, як у випадку з матриці перемикання L . Велика економія на кількості дзеркал компенсується дуже великою кількістю віддзеркалень променя, які призводять до значних втрат з великими розмірами мережі.

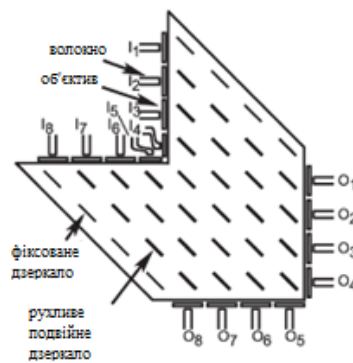


Рисунок 2.8 – 8×8 архітектура з'єднання масивів [19]

Спрощений підхід до проектування системи, яка заснована на виборі значень деяких змінних конструкції відповідно до міркуваннями системної інженерії, а саме для того спираючись на математичне рішення оптимізації проблеми. Замість того, щоб шукати набір параметрів, які мінімізують L і Δ , сконцентруватися на кількох змінних на кожному етапі.

Перший ступінь – це установка верхньої межі для двох уявлень функції L і Δ . Тоді ми обмежимо змінну простору X в наборі $\{x\} = X * \subset X$, кожен елемент x якого задовольняє:

$$\begin{cases} L(x) \leq L_M \\ \Delta(x) \leq \Delta_M \end{cases} \quad (2.10)$$

L_M та Δ_M є максимально допустимими вставками і диференціальними втратами. Довжина кроку p є дуже важливим параметром бо втрата енергії сильно залежить від такої величини. Є дві причини, за якими малі значення p повинні бути краще. Перше відноситься до втрати, яка сильно зростає зі збільшенням відстані у вільному просторі покриті оптичними променями. Останнє відноситься до витрати через фізичних розмірів перемикачів матриці. З огляду на мережу $N \times N$, коли p маленька, дзеркала дуже близько, а матриця займає невелику поверхню підкладки. Геометричні міркування і процес виробництва, проте, накладає нижню межу до довжини кроку, яка також залежить від дзеркала радіус R . Значення p , яке часто приймається в технічній літературі становить $3R + 800$ мкм.

Ефект за рахунок мінімізації найширшого розміру пучка може проникати всередину комутаційної матриці. Це еквівалентно для мінімізації дальньої відстані від променя талії уздовж доріжки. Результат досягається за рахунок поміщення талії променя в середину. Якщо $2F$ – це довжина найдовшого шляху при перемикачній матриці, потім встановлюємо $dw = F$. Таким чином, для найдовшого шляху, максимальна втрата дивергенції wJ відбуватиметься в дзеркалі ON-штату, найбільш близькому до колімуючого об'єктиву, або у напрямку до входу, або у напрямку до вихідної сторони. Для всіх інших більш коротких шляхів максимальний розмір пучка завжди буде дорівнює J і розташований на вхідному колімуючих об'єктиві.

Зменшимо наш набір змінних для проектування тільки до двох змінних: радіус дзеркала R і розмір талії променя w_0 . З огляду на архітектуру мережі, відносно легко визначити всі можливі (R, w_0) пари, що задовольняють умовам (2.10). Для цієї мети створили програмний засіб, який здатний змоделювати цю архітектуру і вивчити всі можливі рішення, шляхом вичерпного пошуку.

$$f_0 = Z_0 \sqrt{\frac{w_g^2}{w_0^2}}, \quad (2.11)$$

$$d_0 = \frac{f_0}{1 + \frac{f_0^2}{Z_0}}. \quad (2.12)$$

На рисунках 2.9 і 2.10 представлені цифрові результати отримані при наступних припущеннях:

- дзеркала мають ідеальну плоску поверхню, яка не змінює кривизну та входять до світлових променів;
- дзеркала не мають кутових зсувів;
- дзеркала мають відбивну здатність 97 %, еквівалентну відображенню, втрата k близько 0,132 дБ;
- вхідні і вихідні волокна ідентичні, мають радіус сердечника $w_g = 5$ мкм.

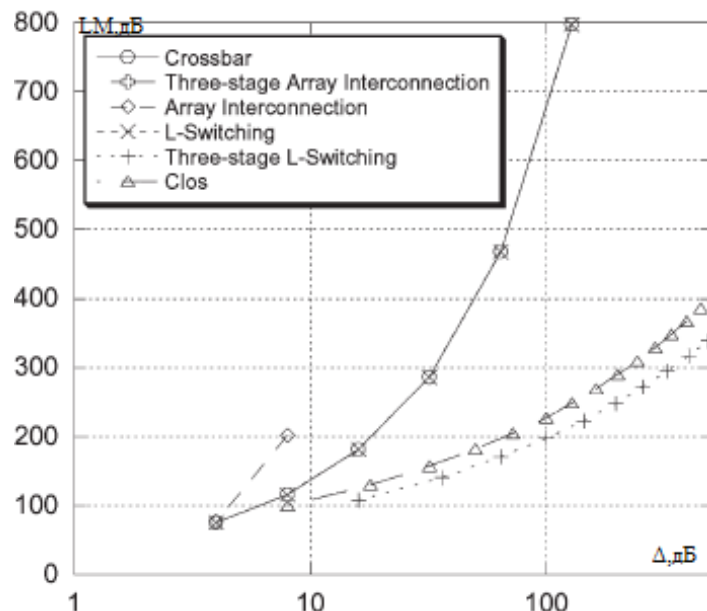


Рисунок 2.9 – Радіус дзеркала, необхідний для гарантії $L_M = 3$ дБ і $\Delta = 1$ дБ для різної архітектури 2D MEMS-комутації [20]

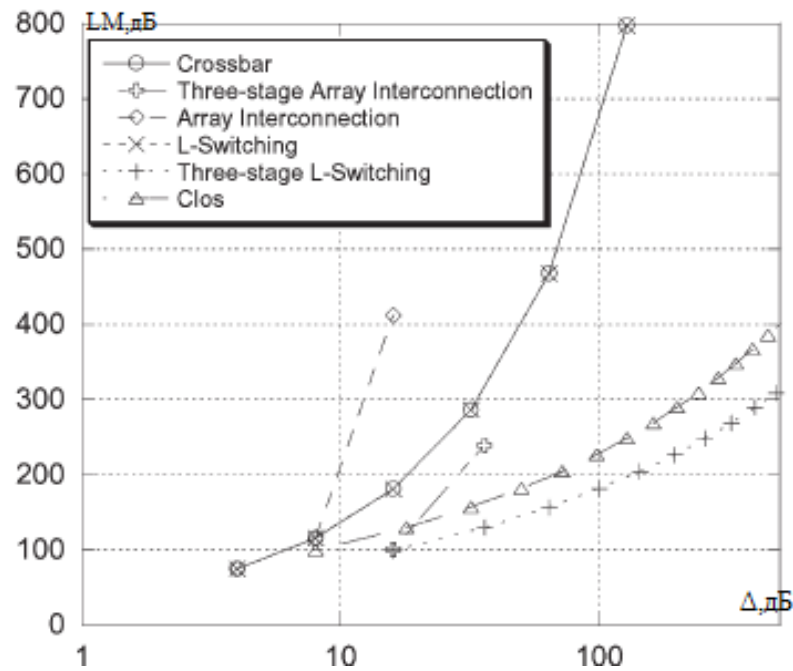


Рисунок 2.10 – Радіус дзеркала, необхідний для гарантії $L_M = 6$ дБ і $\Delta = 2$ дБ для різної архітектури 2D MEMS-комутації [20]

Результати отримані з розслабленою верхньою межею $L_M = 6$ дБ і $\Delta = 2$ дБ не сильно відрізняються. Порівняння на рисунках 2.9 і 2.10 показало, що ці вищі граничні значення допускають зменшення радіусу дзеркала тільки для трьох архітектур з шести. Це мережа, з'єднання з масивом (тобто тепер здійснимо до розміру 16×16) і триступеневий взаємозв'язок між масивами.

2.4 Узгодження в перемикачах

На рисунку 2.11 показаний ряд можливостей простого макета для дзеркального обертання, оптичного перемикача поперечного з'єднання. У кожному разі передбачається, що дзеркальні площини складаються або з лінійного масиву одновісним дзеркалом, або з двомірною масиву дзеркал, у міру необхідності. Діапазон і напрямок кута повороту кожного дзеркала

змінюється в залежності від його положення в масиві. Центральне дзеркало повинно повертатися як під позитивним, так і під негативним кутом.

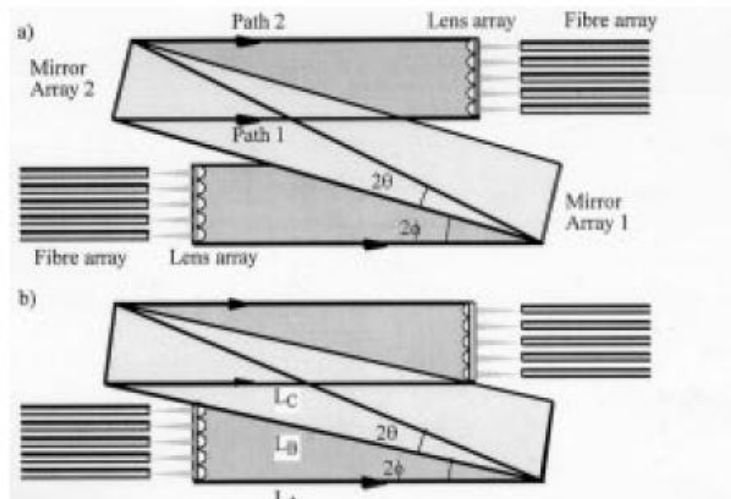


Рисунок 2.11 – Компонування для дзеркального обертання вільного простору

На рис. 2.11, а обмежений кут повороту на увазі, що дзеркальний масив 2 повинен віднімати кут на найнижчому елементі дзеркального масиву 1, так що шляхи 1 і 2 можна вибрати і те, і інше. Це обмеження має на увазі мінімальний поділ між дзеркальними масивами, але залишає кут нахилу в межах кожного масиву. Очевидно, що є перевага в скороченні як показано на рис. 2.11, б, так що промені, що поширюються між дзеркала просто очищають лінзи. Якщо це зроблено, кут падіння на кожному дзеркалі зменшується.

Однак є кілька переваг невеликого кута нахилу. Тому що промені вражають дзеркала при майже нормальному падінні, потрібні дзеркала поменше. Зовсім від поляризації ефекти мінімізовані, як і астигматичні ефекти, викликані кривизною дзеркала. Всі дзеркала розташовані в однакових точках вздовж кожного шляху, і зміна довжини шляху під час перемикання невелика в кінцевому підсумку.

Дзеркала розташовані на регулярному полі, так що габаритна ширина дзеркального масиву дорівнює $W = NP$. Якщо припустити, що можуть бути використані наближення з малим кутом, ширина дзеркального масиву може бути пов'язана з відстанню L і кутом за допомогою:

$$W = 2L\theta. \quad (2.13)$$

Загальний оптичний шлях ξ між об'єктивами, потім:

$$\xi = 3L = 3NP/2\theta. \quad (2.14)$$

Кількість дзеркал N в масиві потім може бути пов'язано з θ , ξ та P :

$$N = 2\theta\xi/3P. \quad (2.15)$$

Рівняння (2.15) має на увазі, що кількість портів може бути максимальним, для заданого кута повороту шляхом мінімізації співвідношення, тому балки повинні мати найменший діаметр, який може підтримуватися на відстані між об'єктивами. Параметри променя можуть бути знайдені з урахуванням поширення гауссових балок, рішення циліндричного хвильового рівняння яке є реалістичною моделлю для багатьох обмежених брусів. Електричне поле гауссовського оптичного променя є функцією його осьової координати і радіальної координати:

$$E(r, z) = A_0 \exp\{-r^2/w^2\} \exp\{-jk_0 r^2/2R\}. \quad (2.16)$$

Тут термін $\exp\{-r^2/w^2\}$ описує радіальну амплітуду варіації $\exp\{-jk_0 r^2/2R\}$, в той час як радіальна варіація в фазі. Параметр w є радіус,

при якому амплітуда падає по максимуму. Параметр R є характеристикою радіуса, що описує кривизну фронту фази, константа поширення k_0 , задана

$$k_0 = 2\pi/\lambda, \quad (2.17)$$

де λ – оптична довжина хвилі.

Значення варіюються в w і R залежності від відстані відповідно до:

$$w^2 = w_0^2 \{1 + (z/z_0)^2\}, \quad (2.18)$$

$$R = z \{1 + (z_0/z)^2\}. \quad (2.18)$$

Параметром w_0 є мінімальний радіус променя, який розташований в $z=0$. Аналогічно z_0 , характерне відстань вимірюється в напрямок поширення, заданий:

$$z_0 = k_0 w_0^2 / 2. \quad (2.19)$$

Знайти параметри гауссовського променя, що має найменша кінцева ширина для певної відстані поширення, зміна ширини променя як:

$$w^2 = w_0^2 + 4z^2 / (k_0^2 w_0^2). \quad (2.20)$$

Диференціюючи (2.20), ми отримуємо:

$$2w dw / dw_0 = 2w_0 + 8z^2 / (k_0^2 w_0^3). \quad (2.21)$$

Як мінімум, права сторона (2.20) повинна дорівнювати нулю, щоб:

$$w_0 = \sqrt{\frac{2z}{k_0}} = \sqrt{\lambda z / \pi}. \quad (2.22)$$

Рівняння (2.22) показує, що оптимальний радіус талії масштабується як квадратний корінь необхідної відстані поширення. Для цього значення, кінцевий радіус пучка:

$$w = w_0 \sqrt{2}. \quad (2.23)$$

Щоб проілюструвати ці точки графічно, на рисунку 2.12 порівнюються варіація w з z трьома різними гауссіанцями, щоб спробувати визначити оптимальний розмір талії для фіксованого відстані поширення, припустимо, 1 м. Передбачається довжина хвилі 1,5 м. Промінь А (з радіусом талії $w_0 = 0,5$ мм) для початку найвужчий, але занадто швидко розширюється. Промінь С (з $w_0 = 0,85$ мм) занадто широкий, хоча і повільний. Промінь Б (з $w_0 = 0,625$ мм) має проміжну талію і розбіжність, і знаходиться найближче до оптимального на відстані 1 м.

Вплив варіацій оптичного шляху. Неідеальний випадок, коли поділ між об'єктивами змінюється від проектного значення (для наприклад, шляхом вибору іншого з'єднання порту з портом у дзеркал). Це може бути змодельоване збільшенням на відстані. На рисунку 2.13 видна зміна радіуса променя з положенням 40 мм.

Ці два варіанти однозначно схожі, однак радіус променя на другій лінзі трохи більше через збільшення оптичного шляху. Динамічне моделювання може показати ефект осьового розширення пропускну здатності, масштабується, так що припустиме розширення для довжини жвавого шляху прямо пропорційно.

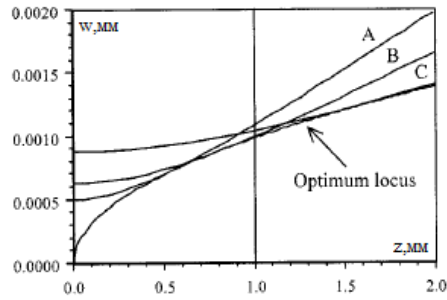


Рисунок 2.12 – Варіація w з z для трьох різних гауссових променів [21]

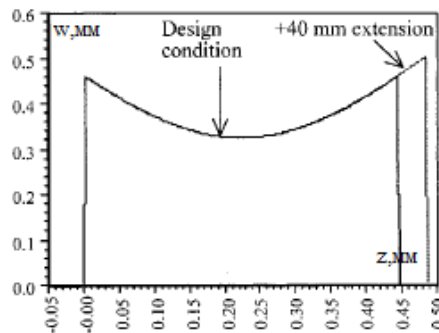


Рисунок 2.13 – Варіювання радіусу променя з положенням [21]

На рисунку 2.14 показана варіація s . Ефективність знижується дуже повільно, сотафізична ефективність досягнута навіть тоді, коли наближається до початкового дзеркального поділу. Отже, поперечне з'єднання матиме високу однорідність порту.

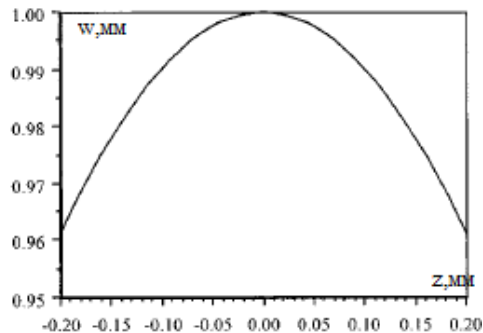


Рисунок 2.14 – Зміна пропускної здатності з осьовим подовженням [22]

Вплив кривизни дзеркала. Так як дзеркала плоскі, вони не впливають на поширення променя. Однак, використання багаточислової конструкції може привести до кривизни дзеркал через внутрішню напругу або теплового розширення. Тому розглядаємо другий неідеальний випадок, коли перше дзеркало сферически зігнуто.

На рисунку 2.15 показана зміна радіуса променя з положенням, для різної кривизни дзеркал $c=1/2f$ в діапазоні від -2 до $+2m$. Це відповідає радіусе кривизни в діапазон ≥ 50 см. Ефект опуклої кривизни (негативний c і f) відхилити промінь, зробивши його занадто великим, щоб пройти через вихідну лінзу без загасання. Однак, якщо кривизна занадто велика, ефект фокусування занадто великий, а промінь розходитьсся знову до того, як він досягне вихідного об'єктива.

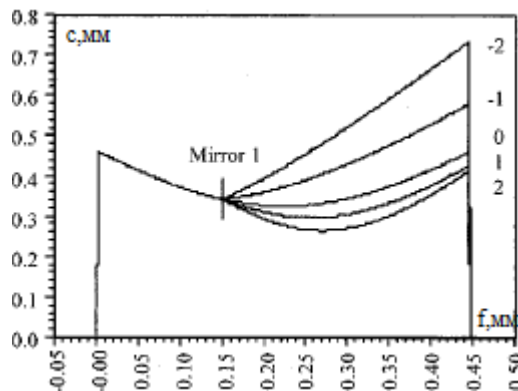


Рисунок 2.15 – Варіація радіусу променя з положенням для різної кривизни

Після цього він знову буде занадто великим, щоб пройти без загасання. На рисунку 2.16 показан відповідний результат, коли зігнуто тільки друге дзеркало. Схожий результат отриман, але зменшений оптичний шлях між другим дзеркалом і вихідною лінзою, дозволяє діаметр пучка більшої кривизни.

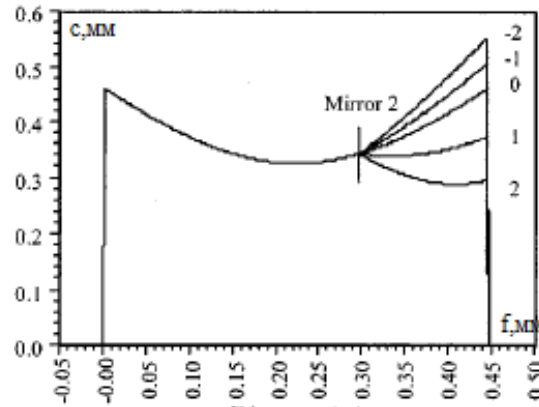


Рисунок 2.16 – Варіація радіусу променя з положенням для різної кривизни нанесених на дзеркала 1 і 2 [22]

За допомогою подальшого чисельного моделювання можна показати, що вплив кривизни дзеркала на пропускну здатність знову масштабується, і що чутливість до кривизни точно пропорційна до довжини оптичного тракту.

2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі було розглянуто дзеркала в двомірному масиві, які використовуються в якості двомірного джерела світла. Менший розмір дзеркала є одним з обов'язкових вимог для створення системи зберігання даних з розумною ємністю для мобільних пристроїв; інші вимоги включають в себе більш низьку споживану потужність, більш низьке керуючу напругу, точність кута відхилення, надійність і т.д..

Отримані результати показали, що деякі архітектури мають характеристики більш підходящі, ніж інші, для використання в здійсненні матриці перемикачів MEMS з великою кількістю портів.

Було розглянуто дизайн компактного дзеркального обертання оптичного поперечного з'єднання. Використовуючи простий аналіз, можна

визначити оптимальний гауссовський промінь для поширення на певній відстані. Цей промінь має найменший можливий максимальний діаметр.

Застосування правил поширення гауссовського пучка на основі цифрового моделювання до розгорнутої моделі оптичної системи, перевірені аналітичні висновки, також розглянуто ряд відхилень від ідеалу, і показані, як додаткові втрати, викликані недосконалістю, масштабування з довжиною оптичного шляху.

Було розглянуто, що чутливість дзеркальної кривизни збільшується лінійно з довжиною шляху, так що великі перемикачі повинні мати більш плоскі дзеркала. Цей результат підкреслює важливість оптимізованого гауссовського шляху, який мінімізує шлях довжини.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПОВОРОТНОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Виготовлення компонентів, дизайн та оптичні характеристики

Виробництво включає в себе простий процес, що складається з декількох етапів:

- нанесення рисунка нерухомих і рухомих деталей на склеєний кремній
- підкладка ізолятора (BSOI) за допомогою оптичної літографії і глибокого реактивного іонного травлення;
- нанесення рисунка на товсті подушечки фоторезиста, що зв'язує фіксовані і рухомі частини;
- травлення оксиду, що лежить в основі;
- сушка сублімації для видалення промивною водою без жертвних колапс шарів;
- обертання рухомих частин поза площиною шляхом плавлення фоторезиста;
- покриття бризками з Cr/Au для забезпечення електричного контакту і поліпшення відбивної здатності.

На рис. 3.1 показаний вид готового мікродзеркала, сформованого в матеріалі BSOI зі сполученим елементом, товщина шару 3,5 мкм і товщина оксиду міжслойного шару 2 мкм. Саме дзеркало являє собою прямокутний елемент, який вимірює 496×456 мкм, який підвішений на вимірювальному стрижні крутильного стержня 5×324 мкм. Дзеркало підтримується рамкою, яка повертається з площини під дією поверхневого натягу, що виник під час кроку самозборки і зафіксований під кутом 45 °С.

Живлення подушок обертання було сформовано у фоторезисте Shipley AZ4562 розміром 32×230 мкм, товщиною 12 мкм. Плавлення здійснюється в конвекційної печі в 160 °С. Рухома половина – кутовий вертикальний привід

переноситься дзеркалом, в той час як фіксована половина надається на землі, прикріпленою до субстрату. Є 29 рухомих електродних пальців і 28 нерухомих. Електричний контакт забезпечується розпиленням металізації, яка складалася з 100 Å Cr і 500 Å Au металу.

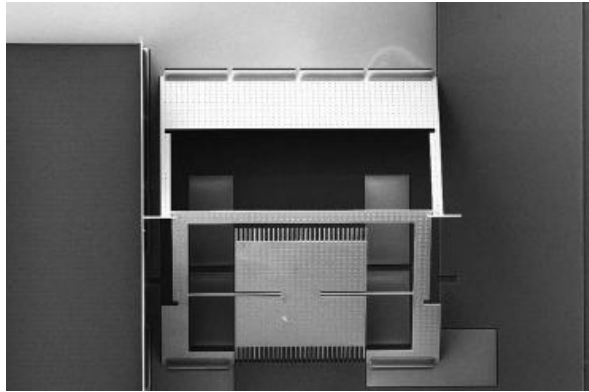


Рисунок 3.1. – Вид скануючого мікродзеркала

На рисунку 3.2 показаний вид готового мікродзеркала на основі двох скануючих мікродзеркал 45° і одного 90° нерухомого дзеркала. Періодично змінюючи кут нахилу будь-якого з них або обидва скануючих дзеркала, пристрій може модулювати сигнал про інцидент і, отже, передати дані назад на світло.

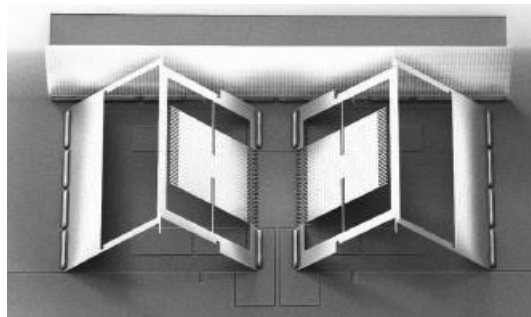


Рисунок 3.2 – Вид готового мікродзеркала на основі двох скануючих мікродзеркал

Оптичні характеристики були виміряні відображенням лазера. На рисунку 3.3 показана варіація кут пік-пік сканування, скануючого дзеркала з диском з різною частотою, з різною напругою приводу.

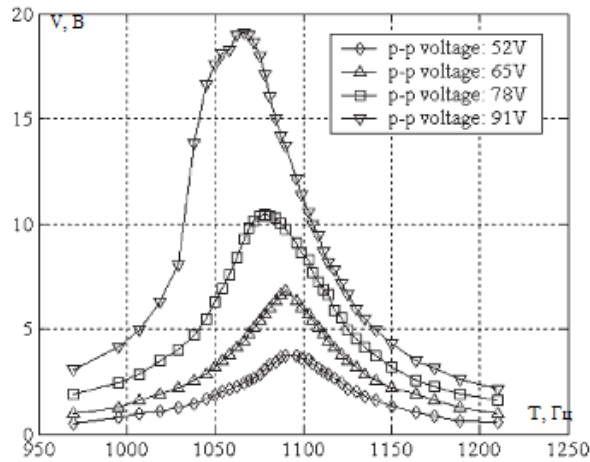


Рисунок 3.3 – Зміна кута сканування з частотою при різній напрузі

Ці дані виділяють один з аспектів нелінійної динамічної поведінки, в цілому система резона, частота явно зменшується в міру того, як напруга збільшується (рис. 3.4). Така нелінійна реакція спостерігається в інших пристроях з кутовими вертикальними приводами.

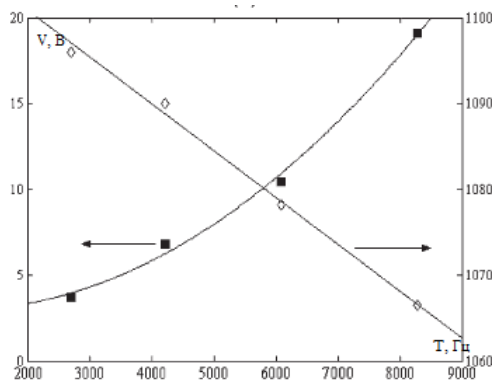


Рисунок 3.4 – Зміна кута сканування і електрична резонансна частота з квадратною напругою

Коли два скануючих дзеркала використовуються як складові частини ССР, модульований сигнал знову значно варіюється в залежності від керуючої напруги. На рисунку 3.5 показана реакція активної ПЗС, отримана за допомогою квадратної хвилі 26 В_{р-р} на частоті 20 Гц.

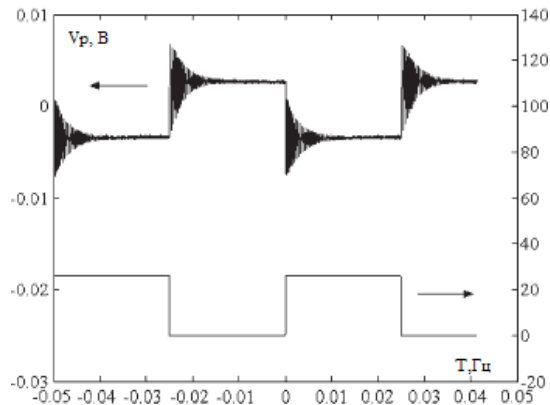


Рисунок 3.5 – Зміна в часі ретрорефлекторного сигналу, отриманого квадратними хвилями напруги: 26 В

На рисунку 3.6 показана реакція на більш високу керуючу напругу 48 В. Незважаючи на те, що сигнал є ефективно модульованим, в обох випадках, перехідні коливання при включенні і вимикання зовсім інші.

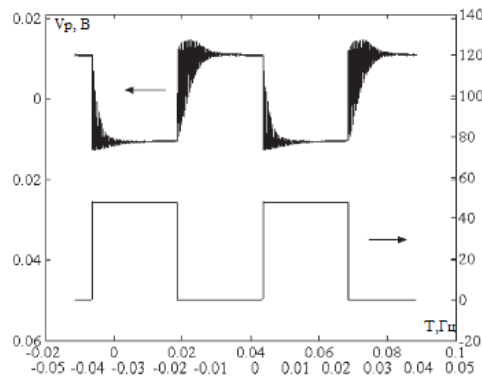


Рисунок 3.6 – Зміна в часі ретрорефлекторного сигналу, отриманого квадратними хвилями напруги: 48 В

3.2 Відгук скануючого дзеркала

На рисунках 3.7 – 3.9 показана передбачена реакція включення одного дзеркала, яке було отримано за допомогою значень наступних коефіцієнтів: $c_0 = 0,21 \cdot 10^{-13}$, $c_1 = 4,79 \cdot 10^{-13}$ і $c_2 = 43,31 \cdot 10^{-13}$ для різних прикладених напружень. Передбачається, що частота приводу до 1067 Гц. тому що крутний момент пропорційний квадрату напруги, період результуючого коливання $1/(2f) = 0,46$ мс.

На рисунку 3.7 показана реакція при низькій доданій нарузі. Величина коливань спочатку збільшується, потім трохи зменшується, і, нарешті, стабілізується, як і очікувалося від лінійного пристрою.

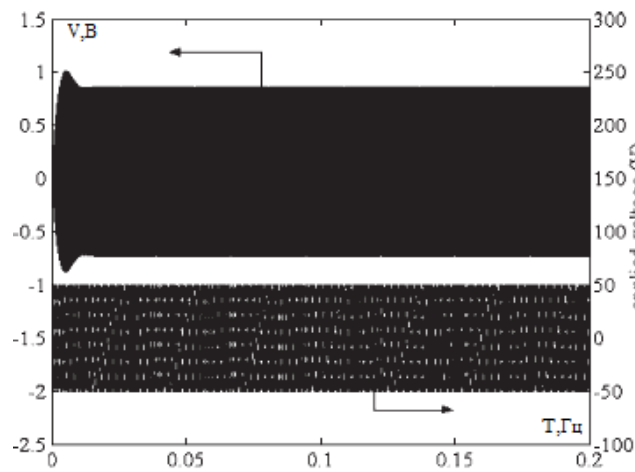


Рисунок 3.7 – Чисельно змодельована зміна кута дзеркала з часом, 50 Vp-p

При більш високій нарузі амплітуда коливань збільшується протягом більш тривалого часу і стабілізується, як показано на рисунку 3.8.

При дуже високій нарузі амплітуда коливань збільшується разом з часом, як показано на рисунку 3.9, і врешті-решт стає нескінченною. Цей результат показує нелінійний відгук, тому що електричний коефіцієнт крутного моменту виражається в комбінації обох кутів і часу.

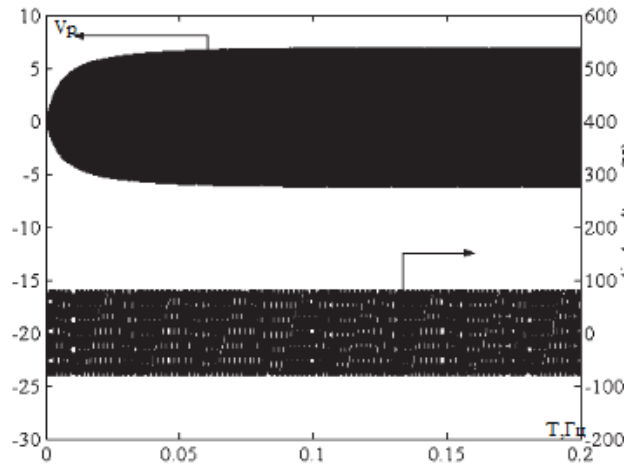


Рисунок 3.8 – Чисельно змодельована зміна кута дзеркала з часом, 80 V_p -р

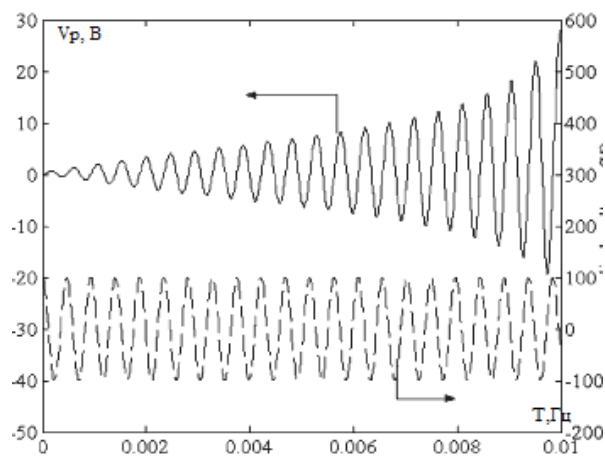


Рисунок 3.9 – Чисельно змодельована зміна кута дзеркала з часом, 100 V_p -р

Нелінійний відгук можна також побачити з докладного опису форми коливання. На рисунках 3.10 – 3.12 показана стаціонарна реакція отримана з різними доданими напруженнями. При низькій нарузі первісна форма коливання, яка симетрична з періодом 0,46 мс, все ще зберігається після довгого часу, так як зображено на рисунку 3.10. Цей період збігається з обертовим моментом.

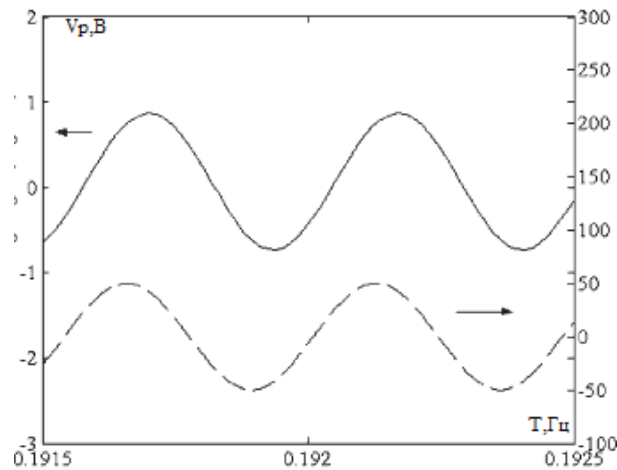


Рисунок 3.10 – Детально змодельовані криві коливань, отримані з прикладеною напругою $50 V_{p-p}$

На рисунку 3.11 показана форма при більш високій напрузі. У цьому випадку період збільшується на $0,47$ мс і на симетричній формі реакція починає зникати.

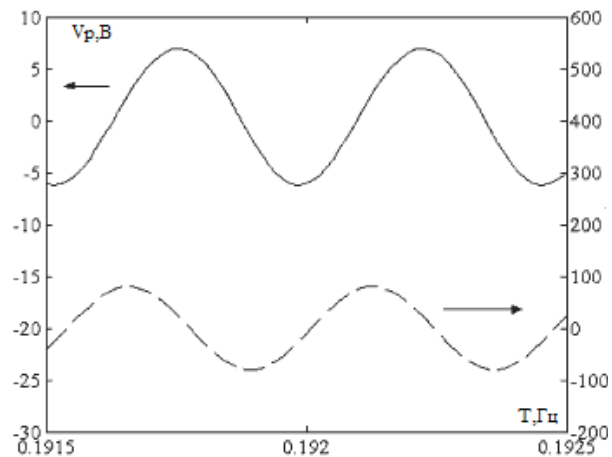


Рисунок 3.11 – Детально змодельовані криві коливань, отримані з прикладеною напругою $80 V_{p-p}$

У дуже високій напрузі, періодичний відгук через 10 мс показує несиметричну і нестабільну форму, з періодом $0,49$ мс, як показано на

рисунку 3.12. Нелінійну поведінку кутового вертикально-гребенчатого приводу, таким чином, змінює обидва періоди коливань і гармонійний зміст.

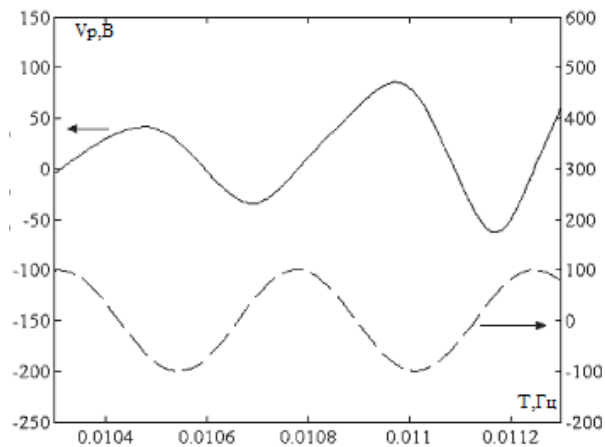


Рисунок 3.12 – Детально змодельовані криві коливань, отримані з прикладеною напругою $100 V_{p-p}$

Частотна характеристика дзеркала може бути оцінена за наступними параметрами обчислення стабілізованої амплітуди від тимчасової реакції, отриманих на різних частотах приводу. Порівнюючи їх чисельні прогнози з реальними даними, можна визначити зміну ємності.

На рисунках 3.13 і 3.14 показаний найменший встановлений квадратний результат, а в Таблиці I – коефіцієнти, отримані за допомогою наборів даних, відповідних для напруг 52 В і 92 В.

На рисунку 3.13 показана модель передбачення, отримана з апроксимації першого порядку для моменту затягування. Незважаючи на те, що графік правильно показує зміщення резонансної частоти з напругою, абсолютні кути не дуже добре збігаються. Більш того, в модельованому тренді неможливо дивитися спотворення поблизу резонансної частоти, показане в експериментальному результаті для самої високої напруги.

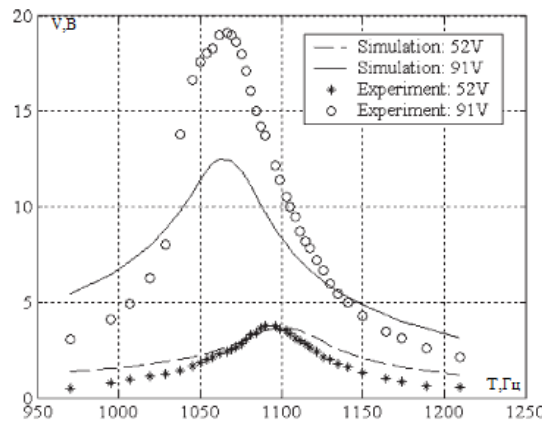


Рисунок 3.13 – Чисельно змодельоване співвідношення між частотою і кутом, отримане використовуючи тільки коефіцієнти c_0 і c_1

На рисунку 3.14 показаний результат, отриманий за допомогою апроксимації другого порядку. Результат тепер набагато ближче до експерименту.

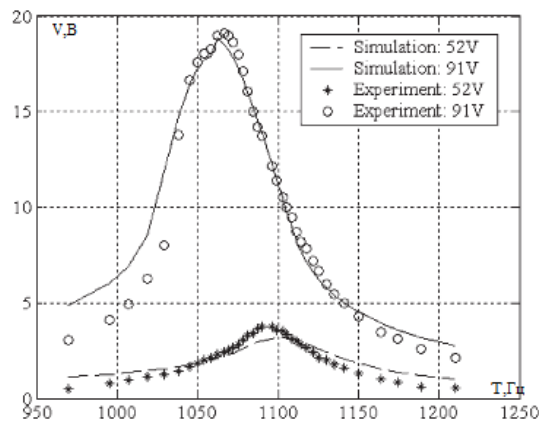


Рисунок 3.14 – Чисельно змодельоване співвідношення між частотою і кутом, отримане використовуючи тільки коефіцієнти c_0 , c_1 і c_2

Також видна реакція при високій напрузі, наближення до більш високого порядку в θ не потрібно, як видно зі значення R_2 в таблиці I. Тому момент спрацьовування дзеркала може бути виражений як:

$$T(\theta) = 1/2\partial C/\partial\theta V^2 = (0,11 + 2,39\theta + 21,7\theta^2) \times 10^{-13}V^2. \quad (3.1)$$

Дане рішення забезпечує гарну відповідність нелінійної поведінки, спостерігається при високій напрузі до 97 %, в той час як при низькій напрузі передбачений результат підходить до 83 %. Ця різниця може призвести до похибки вимірювання. На рисунку 3.15 показаний прогнозований пік прогин для двох інших прикладених напруг 65 і 78 В, отриманий за допомогою (3.1).

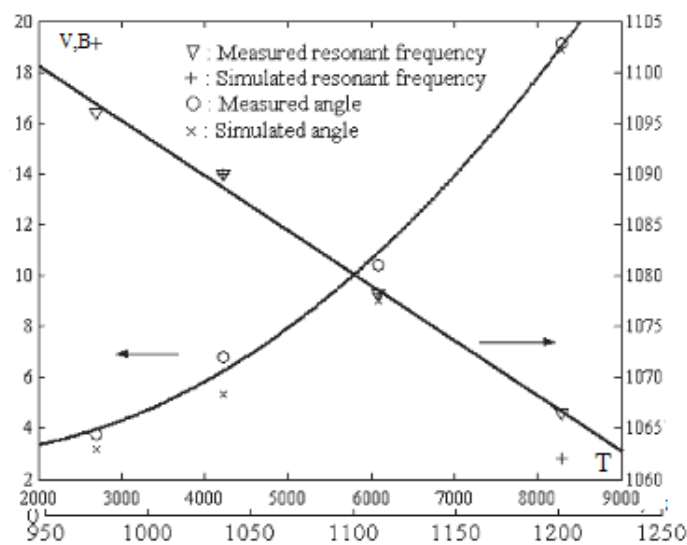


Рисунок 3.15 – Порівняння прогнозованого пікового відхилення і електричного резонансу частоти з вимірними даними

Модельовані результати знову добре узгоджуються з експериментом. Хоча розмір термінів більш високого порядку здається дивним, пояснення полягає в тому, що ефект від інтердігації електродної системи в значній мірі втрачається в положення рухомого електрода, і, як наслідок, система показує деяку сильну нелінійність диска з паралельними пластинами.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти послідовної зміни потужності ємнісного опору

Приблизна оцінка ємності	c_0 ($\times 10^{-13}$)	c_1 ($\times 10^{-13}$)	c_2 ($\times 10^{-13}$)	c_3 ($\times 10^{-13}$)	R^2 (52V)	R^2 (91V)
1-й порядок	0,25	5,35			0,700	0,591
2-й порядок	0,21	4,79	43,3		0,826	0,969
3-й порядок	0,21	4,79	43,3	0,02	0,826	0,969

3.3 Висновки до третього розділу

Модель динамічного відгуку електростатичного мікродзеркала, приводиться в дію кутовим вертикальним гребінчастим приводом, була запропонована на основі чисельного рішення нелінійних рівнянь руху крутильного осцилятора. Проведено порівняння моделі з експериментальними даними, отриманими на самозбірних мікродзеркалах. На основі рішення було показано, що крутний момент, створюваний кутовим вертикальним приводом, залежить, щонайменше, від другого порядку кута повороту, що призводить до деформації форми резонансної кривої при високій напрузі. Чисельне рішення також показує зрушення резонансної частоти з напругою, і модель може точно передбачити резонансну частоту при довільному входній напрузі. Однак більш прості моделі зміни ємності не забезпечують достатньої точності.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ДЗЕРКАЛА І УПРАВЛІННЯ

4.1 Роль внутрішньовиробничого моніторингу та управління технологічним процесом

Кінцева мета внутрішньовиробничого моніторингу та контролю – забезпечити високу якість продукції, високу надійність і повну автономність у процесі. Досягнення цієї мети вирішило б проблеми моніторингу та контролю якості, які гарантують, що результати процесу відповідають заданим значенням. Однак досягнення – непросте завдання, оскільки більшість процесів мають характеристики вкрай нелінійної, невизначеної і складної системи, як показано на рисунку 4.1. Це може бути пов'язано з тим, що під час роботи відбуваються складні фізичні явища, і вхідні змінні, котрі керують процесами, взаємодіють один з одним. Крім того, продуктивність діючого обладнання поступово погіршується через зміни зовнішнього середовища і змін в його механічній конструкції.

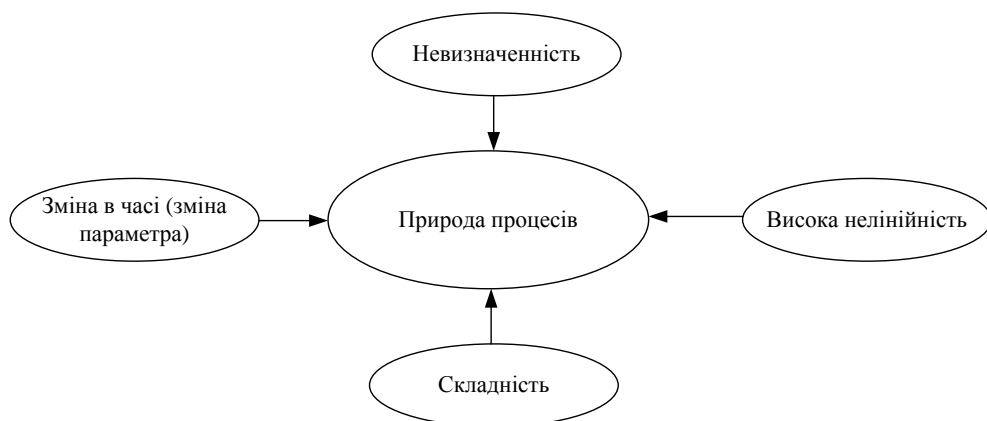


Рисунок 4.1 – Характеристики процесу

Коротше кажучи, процеси схильні до зовнішніх перешкод і шуму і часто залежать від параметрів варіації. Через ці характеристик якість продукції часто змінюється від випуску до випуску, що погіршує однорідність. Це призводить до погіршення якості продукції, якщо ефективний моніторинг і контроль процесів не виконуються належним чином. Іншими словами, щоб уникнути будь-яких подій, несприятливих для підтримки якості продукції, що випускається, для процесу необхідні функції моніторингу та управління.

Моніторинг стану процесу вимагає трьох основних етапів, які повинні виконуватися в режимі онлайн:

- процес безперервно контролюється датчиком або декількома датчиками;
- сигнали датчиків кондиціонують і попередньо обробляються;
- стан процесу ідентифікуються за допомогою розпізнавання образів.

Управління станом процесу зі зворотним зв'язком складається з наступних етапів:

- вимір стану процесу;
- генерація керуючого сигналу на основі динамічних характеристик процесу;
- коригування процесу, спостерігаючи підсумковий результат процесу і порівняння спостережуваного з бажаним.

Загальна процедура оцінки вихідних даних процесу при моніторингу змінних процесу і змінних стану машини показана на рисунку 4.2. Ця процедура вимагає ряду дій, які виконуються чутливим елементом, елементами інтерпретації сигналів і блоком оцінки якості. Датчики можуть складатися з безлічі датчиків різних типів, що мають різні принципи вимірювання, або з декількох датчиків одного типу. При використанні датчиків різних типів надійність вимірювання стає вельми важливою при синтезі інформації, необхідної для оцінки стану процесу або якості продукту.

Надійність датчиків може змінюватися відносно один одного. Це вимагає ретельної розробки метода синтеза.

Робочі значення повинні бути скориговані, щоб гарантувати бажану якість продукції або бажану змінну стану, коли параметри процесу можуть

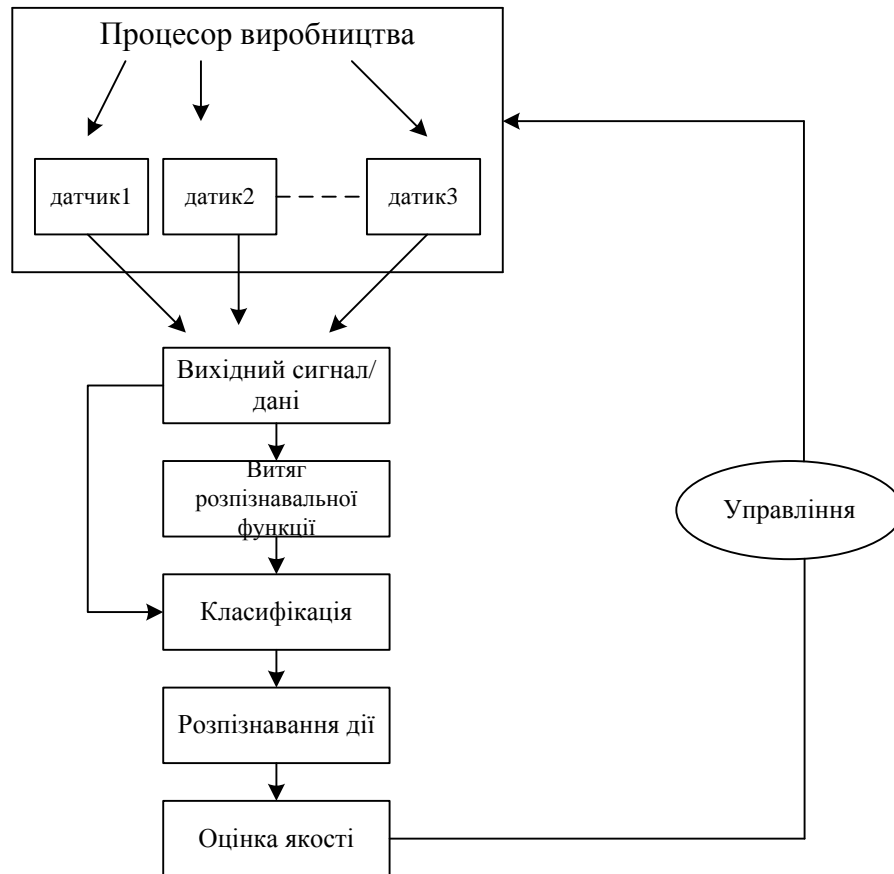


Рисунок 4.2 – Загальний порядок контролю якості

змінюватися і присутні зовнішні перешкоди, що зазвичай має місце в виробничих процесах. Коли справа доходить до контролю якості виведення, якість виводу має вимірюватися датчиком онлайн. Коли це відбувається, можуть бути два методи контролю якості в залежності від вимірності змінних: прямий метод і непрямий метод. Як показано в рисунках 4.3 і 4.4. Прямий метод (рис. 4.3), використовує змінні якості як вихідні дані керованої системи, тоді як непрямий метод (рис. 4.4), використовує деякі змінні стану процесу.

Ця ситуація в точності така ж, як і в разі контролю якості виведення. Прямий метод бажаний, оскільки він безпосередньо контролює якість виведення. Однак складність полягає в тому, що в більшості виробничих процесів піддається виміру дуже мало змінних якості. Непрямий метод використовує зворотний оцінку якості, щоб безпосередньо контролювати змінні стану процесу замість змінних якості.

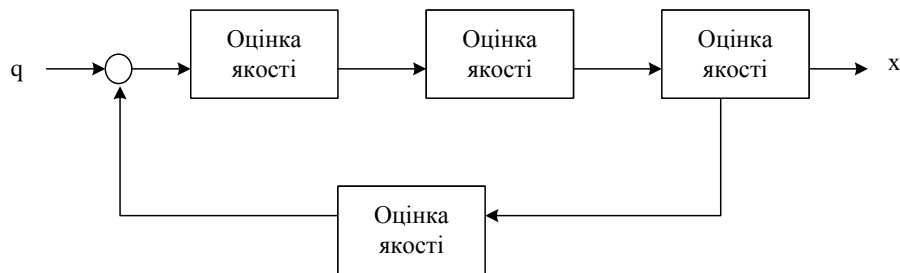


Рисунок 4.3 – Метод прямого контролю якості



Рисунок 4.4 – Метод непрямого контролю якості

Оцінка виводиться з:

$$\bar{q} = \bar{f}(\bar{x}), \quad (4.1)$$

і це може бути дано:

$$\bar{q} = \bar{f}^{-1}(\bar{x}). \quad (4.2)$$

Вектор \bar{q} складається зі змінних якості, що підлягають контролю, \bar{x} складається зі змінних стану процесу і \bar{f} являє собою функції, що зв'язують змінні якості зі змінними стану процесу. Він просто перетворює змінні якості, що підлягають контролю, в відповідні змінні стану процесу. При проектуванні кошторисника необхідно враховувати кілька факторів, пов'язаних з визначенням відповідних змінних стану, вибором датчиків і побудовою функціоналу. Змінні стану повинні вимірюватися і вибиратися таким чином, щоб забезпечити чітку кореляцію зі змінними якості, тобто функція повинна визначатися однозначно і бути менш складною формою. Крім того, змінні стану повинні показувати високу чутливість до зміни змінних якості. Вибір датчиків повинен проводитися відповідно до вимог до контролю, такими як швидкість відгуку дозволу, лінійність і час дискретизації.

Принциповий вибір внутрішньовиробничого моніторингу може бути зроблений з точки зору контактних і безконтактних методів. Таблиця 4.1 показує загальне порівняння двох методів вимірювання.

Таблиця 4.1 – Порівняння контактних і безконтактних методів

Характерна риса	Контактний	Безконтактний
Резолюція	Не висока	Висока
Діапазон вимірювання	Широкий	Вузький
Робоча швидкість	Не висока	Висока
Калібрування	Легкий	Складний
Обробка сигналів	Легкий	Складний
Надійність	Висока	Відносно низька
Навантаження та контакти	Великий	Без навантаження
Монтажний простір	З обмеженням	Вільний

Перевагою контактного методу є його надійність в практичному використанні, в той час як безконтактний метод – наприклад, оптичний підхід – пропонує можливість дистанційного зондування і виконання вимірювань з високою роздільною здатністю без фізичного контакту.

Звичайно, вартість – важливий фактор при виборі. Однак необхідно враховувати результат використання передових методів цих методів у порівнянні з традиційними методами. Тимчасова затримка вимірювання є важливим фактором при практичному використанні через нестабільність процесу управління. Точка виявлення повинна бути якомога ближче до явища.

4.2 Ідеальні датчики для оптичних вимірювань в процесі роботи

Ідеальний оптичний датчик для вимірювання в процесі включатиме такі вимоги:

а) загальні характеристики;

- 1) довге життя і стабільність в характеристиках;
- 2) міцна і проста конструкція і простота використання (калібрування, обслуговування, огляд і т.д.);
- 3) нечутливий до умов навколишнього середовища;
- 4) проста обробка сигналу;
- 5) недорого;

б) багатоточкові вимірювання: внутріпроцесний метод в значній мірі досягається за рахунок одноточного виявлення, і те, що відбувається явище репрезентативно оцінюється тільки за допомогою цього виміру (отже, виміряні значення зазвичай відрізняються при зміні точок виявлення, щоб уникнути таких помилок, необхідно розробити багатоточкові вимірні датчики);

в) розвиток техніки обробки сигналів (розроблені досі сенсори не використовувалися в повній мірі, методика обробки декількох сигналів повинна бути розроблена як з точки зору апаратного, так і програмного забезпечення);

г) інтелектуальний датчик: необхідні датчики і перетворювачі повинні бути компактними, міцними і нечутливими до умов навколишнього середовища, крім тих, які вони повинні вимірювати.

Щоб задовольнити цим вимогам такі типи датчиків є інтегровані апаратні / програмні системи, які не тільки вимірюють кілька важливих фізичних властивостей, але також мають і інтерпретують відповідні дані з точки зору встановлених критеріїв і пріоритетів для онлайн-вимірювання і управління складними процесами. Звичайна сенсорна система складається з сенсорного пристрою, перетворювача сигналів, елемента передачі сигналу, приймача і окремого вихідного елемента, підключеного до комп'ютера через інтерфейс. Однак інтелектуальна сенсорна система повинна бути інтегрована в єдиний інтегрований датчик з наступних причин:

- повинен бути отриманий високий вихідний сигнал і чутливість, щоб виключити різні впливи в реальних робочих умовах;
- очікується, що загальна продуктивність буде високою, якщо будуть відрегульовані продуктивність і точність кожного елемента;
- вхідні / вихідні клеми і лінії передачі повинні бути по можливості виключені для компактної сенсорної системи;
- для збільшення вхідної інформації може бути реалізована паралельна обробка даних.

4.3 Технологія управління

Успішні опто-мехатронні системи також багато в чому залежать від технологій управління. Наприклад, у високотехнологічній системі точного

позиціонування з оптичним сенсорним пристроєм на точність позиціонування легко впливають перешкоди, такі як зміна температури, зміна тиску, коливання повітря і т.д.. Адекватна компенсація цих впливів зазвичай здійснюється з використанням підходу технології управління.

На рисунку 4.5 показана базова блок-схема управління мехатронних системами з обуренням $D(s)$, що впливає на установку. Вихід $Y(s)$ і встановлена помилка $E(s)$ представлені як

$$Y(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)} U(s) + \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)} D(s), \quad (4.3)$$

$$E(s) = \frac{1}{1+G_1(s)G_2(s)} U(s) - \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)} D(s), \quad (4.4)$$

де $U(s)$ – бажане значення;

$G_1(s)$ – передавальна функція контролера;

$G_2(s)$ – передавальна функція об'єкта.

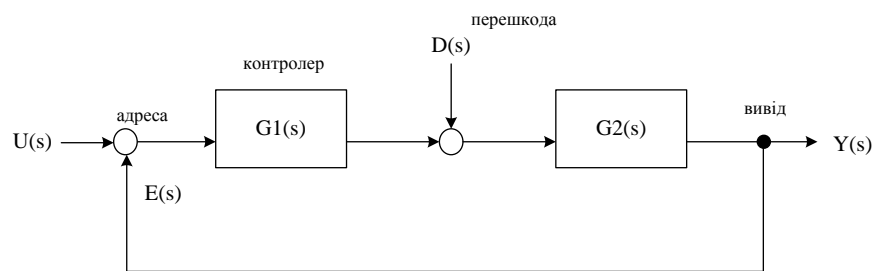


Рисунок 4.5 – Базова блок-схема управління

Цілі контролю наступні.

Зберігати систему в стабільному стані. Характеристичне рівняння у формулі. (4.3) дається виразом:

$$1 + G_1(s)G_2(s) = 0, \quad (4.5)$$

яке є поліноміальною функцією перетворення Лапласа s . Стійкою умовою є призначення всіх полюсів в рівнянні. (4.5) в лівій півплощині (негативною) системи координат.

Дотримуватись вихідних даних $Y(s)$ точно до бажаного значення $U(s)$, тобто, щоб виключити сталу помилку $E(s)$, звідси слідує що:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} \rightarrow 1, \quad (4.6)$$

або:

$$E(s) \rightarrow 0. \quad (4.7)$$

Щоб задовольнити цю вимогу, $G_I(s)$, коефіцієнт посилення регулятора, повинен бути якомога більшим.

Усунути наслідки занепокоєння. Звідси слідує що:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} \rightarrow 0, \quad (4.9)$$

де коефіцієнт посилення регулятора $G_I(s)$ також повинен бути якомога більшим.

Підтримувати надійність системи навіть при наявності змін параметрів або порушень.

Ці вимоги не завжди виконуються одночасно, тому багато підходи до компенсації реалізовані як в класичних, так і в сучасних технологіях управління.

Щоб забезпечити високопродуктивне сервоуправління з точністю до нанометра, прямий зв'язок і компенсація збурень спостерігачем ефективно і

успішно реалізовані в одноосній системі позиціонування. Схема експериментальної установки зображена на рисунку 4.6. Команда з комп'ютера приводить в дію серводвигун постійного струму, який обертає вал гвинта. Результируюча осьова сила переміщує стіл на відповідний зсув, яке вимірюється лазерним вимірювальним пристроєм з дозволом 2,5 нм. Різниця між фактичним переміщенням і бажаної позиції потім реєструється комп'ютером і подається на серводвигун. У цій системі зміна крутного моменту є одним з критичних чинників, що впливають на точність позиціонування. Кут повороту двигуна і кутова швидкість регулюються відповідно в режимі пропорційного управління і в режимі пропорційно-інтегрального управління. Переважна динаміка замкнутого контуру цієї системи апроксимується системою запізнювання другого порядку з часом відгуку і коефіцієнтом демпфірування. У поточному режимі управління неминучі помилки реакції через затримку відповіді і порушення навантаження, що впливає на точність позиціонування.

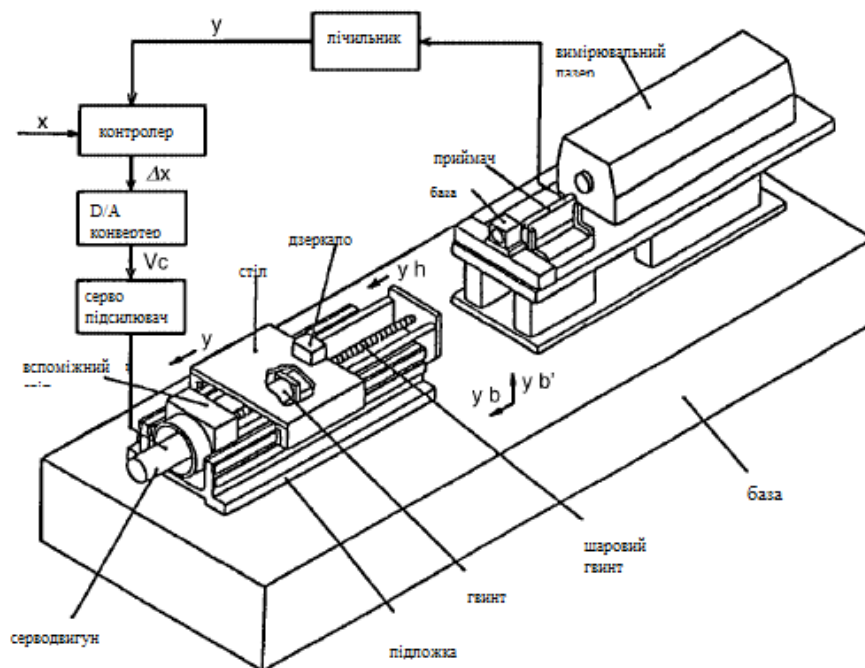


Рисунок 4.6 – Пристрій експериментального позиціонування

Щоб уникнути цих незручностей, в вихідну схему управління додані попереджувальні компенсації прискорення і швидкості. Приріст компенсації прямого зв'язку встановлений для компенсації прискорення і для компенсації швидкості, що робить систему позиціонування більш швидкої і точною.

Помилка відповіді може бути зменшена до менш ніж однієї десятої первісної суми. Потім систематичні помилки через обурення моменту компенсуються шляхом додавання спостерігача обурення в контур управління.

Використовуючи сигнали про кутову швидкість двигуна і струм двигуна, спостерігач оцінює прикладений момент навантаження. Оцінений обертає потім віднімаються з поточного посилення двигуна для досягнення компенсацій крутного моменту.

Компенсація спостерігачем перешкод дозволяє досягти точного контролю.

Задана функціональна схема системи керування зображена на рисунку 4.7, де СД – сельсин-давач, СП – сельсин-приймач, ПП – попередній підсилювач, МП – магнітний підсилювач; ВД – виконавчий двигун, Р – редуктор, $U_{ДН}$ – вихідна напруга давача неузгодженостей, $U_{ПП}$ – напруга на виході ПП; $U_{МН}$ – напруга на виході МП, $\alpha_{ВД}$ – кут повороту ротору виконавчого двигуна, α_P – кут повороту виконавчої осі об'єкта управління.

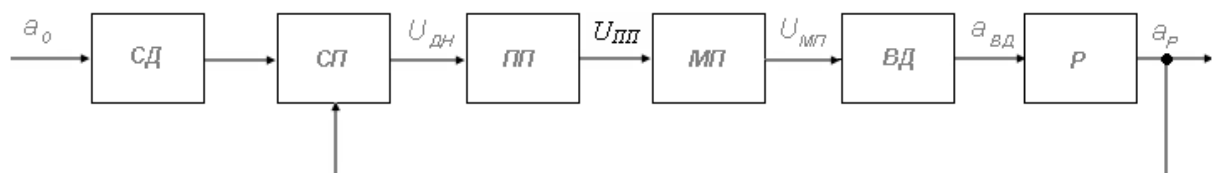


Рисунок 4.7 – Функціональна схема системи керування

Диференціальне рівняння, що описує роботу ДН:

$$U_{дн} = K_{дн}(a_0 - a_p), \quad (4.9)$$

де $U_{дн}$ – вихідна напруга давача неузгодженостей;
 $K_{дн}$ – коефіцієнт підсилення давача неузгодженостей;
 a_0 – заданий кут повороту об'єкта управління;
 a_p – кут повороту виконавчої осі суб'єкта.

$$W_{дн}(s) = K_{дн}, \quad (4.10)$$

$$W_{дн}(s) = 3,5.$$

Попередній підсилювач:

$$U_{пп} = K_{пп} U_{дн}, \quad (4.11)$$

де $U_{пп}$ – напруга на виході ПП;
 $K_{пп}$ – коефіцієнт посилення попереднього підсилювача напруги

$$W_{пп}(s) = K_{пп}. \quad (4.12)$$

Магнітний підсилювач:

$$T_{мп} \frac{dU_{мп}}{dt} + U_{мп} = K_{мп} U_{пп}, \quad (4.13)$$

де $T_{мп}$ – стала часу МП;

$U_{МП}$ – напруга на виході МП;

$K_{МП}$ – коефіцієнт посилення магнітного підсилювача напруги.

$$W_{МП}(s) = \frac{K_{МП}}{T_{МП}s+1}, \quad (4.14)$$

$$W_{МП}(s) = \frac{6}{0,06 \cdot s + 1}.$$

Виконавчий двигун:

$$T_2^2 \frac{d^3 a_{ВД}}{dt^3} + T_1 \frac{d^2 a_{ВД}}{dt^2} + \frac{da_{ВД}}{dt} = K_{ВД} U_{МП}, \quad (4.15)$$

де T_1, T_2 – сталі часу виконавчого двигуна;

$a_{ВД}$ – кут повороту ротора виконавчого двигуна.

$$W_{ВД}(s) = \frac{K_{ВД}}{T_2^2 s^3 + T_1 s^2 + s}, \quad (4.16)$$

$$W_{ВД}(s) = \frac{3}{0,0004s^3 + 0,1s^2 + s}.$$

Редуктор:

$$a_P = K_P a_{ВД}, \quad (4.17)$$

де K_P – коефіцієнт передачі редуктора.

$$W_P(s) = K_P, \quad (4.18)$$

$$W_P(s) = 0,002.$$

Структурна схема нескоригованої системи зображена на рисунку 4.8.

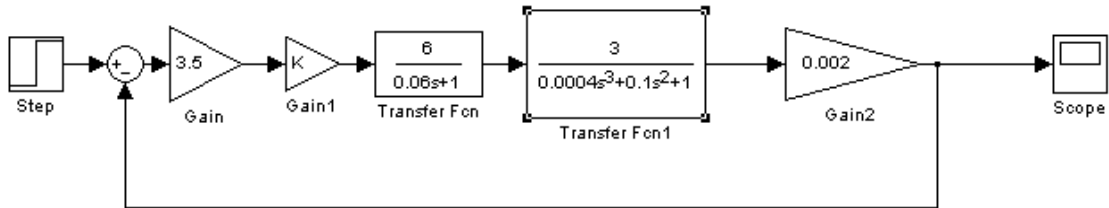


Рисунок 4.8 – Структурна схема нескоригованої системи

Розрахунок передавальних функцій розімкнутої та замкнутої системи керування. Передавальна функція розімкнутої системи:

$$W_{роз}(s) = W_{ДН}(s) \cdot W_{ПП}(s) \cdot W_{МП}(s) \cdot W_{ВД}(s) \cdot W_P(s), \quad (4.19)$$

$$W_{роз}(s) = \frac{0,007K_{ПП}}{(0,06s + 1)(0,0004s^3 + 0,1s^2 + s)}$$

$$W_{роз}(s) = \frac{0,007K_{ПП}}{0,000024s^4 + 0,6s^3 + 0,16s^2 + s}$$

Передавальна функція замкнутої системи:

$$W_{замк}(s) = \frac{W_{ДН}(s) \cdot W_{ПП}(s) \cdot W_{МП}(s) \cdot W_{ВД}(s) \cdot W_P(s)}{1 + W_{ДН}(s) \cdot W_{ПП}(s) \cdot W_{МП}(s) \cdot W_{ВД}(s) \cdot W_{ВД}(s)}, \quad (4.20)$$

$$W_{замк}(s) = \frac{0,007K_{ПП}}{0,000024s^4 + 0,064s^3 + 0,16s^2 + s + 0,007K_{ПП}}$$

Оцінка стійкості розімкненої системи за коренями характеристичного рівняння. За передаточною функцією розімкненої системи (4.19) складемо характеристичне рівняння:

$$0,000024s^4 + 0,0064s^3 + 0,16s^2 + s = 0. \quad (4.21)$$

Всі коефіцієнти характеристичного рівняння одного знаку (додатні), отже необхідна умова стійкості виконується, але так як система 4-го порядку необхідно знайти корні рівняння:

$$(0,06s + 1)(0,0004s^2 + 0,1s + 1)s = 0, \quad (4.22)$$

$$\begin{cases} 0,06s + 1 = 0 \\ 0,0004s^2 + 0,1s + 1 = 0, \\ s = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} s_1 = -16,6 \\ s_2 = -1,125 \\ s_3 = -238,75 \\ s_4 = 0 \end{cases}$$

Так як немає жодного додатнього кореня характеристичного рівняння, то розімкнена система стійка.

Оцінка стійкості замкнутої системи за критерієм Гурвіца. За передаточною функцією замкнутої системи (4.19) складемо характеристичне рівняння:

$$0,000024s^4 + 0,0064s^3 + 0,16s^2 + s + 2,1 = 0. \quad (4.23)$$

Так як усі коефіцієнти характеристичного рівняння одного знаку, то необхідна умова стійкості виконується. Для перевірки достатньої умови побудуємо головний визначник Гурвіца:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix}, \quad (4.24)$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 0,0064 & 1 & 0 & 0 \\ 0,000024 & 0,16 & 2,1 & 0 \\ 0 & 0,0064 & 1 & 0 \\ 0 & 0,000024 & 0,16 & 2,1 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 0,0064 & 1 & 0 \\ 0,000024 & 0,16 & 2,1 \\ 0 & 0,0064 & 1 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0,0064 & 1 \\ 0,000024 & 0,16 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_1 = 0,0064.$$

Підрахуємо значення визначників:

$$\Delta_1 = 0,0064,$$

$$\Delta_2 = 0,0064 \cdot 0,16 - 0,000024 \cdot 1 = 0,001,$$

$$\Delta_3 = 0,001 \cdot 1 = 0,001,$$

$$\Delta_4 = 2,1 \cdot 0,001 = 2,1.$$

За критерієм Гурвіца необхідною і достатньою умовою стійкості системи є: $a_0 > 0, \Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0, \Delta_3 > 0, \Delta_4 > 0$.

З отриманих значень бачимо, що замкнена система є стійкою.

Оцінка стійкості замкнутої системи за критерієм Михайлова. Запишемо характеристичний поліном замкнутої системи (2.6):

$$G(s) = 0,000024s^4 + 0,0064s^3 + 0,16s^2 + s + 2,1. \quad (4.25)$$

Знаходимо комплексний вираз підставивши $s = j\omega$ в вираз (4.25):

$$G(j\omega) = 0,000024\omega^4 - 0,0064j\omega^3 - 0,16\omega^2 + j\omega + 2,1. \quad (4.26)$$

Криву Михайлова побудуємо за допомогою програми Matlab (рис. 4.9).

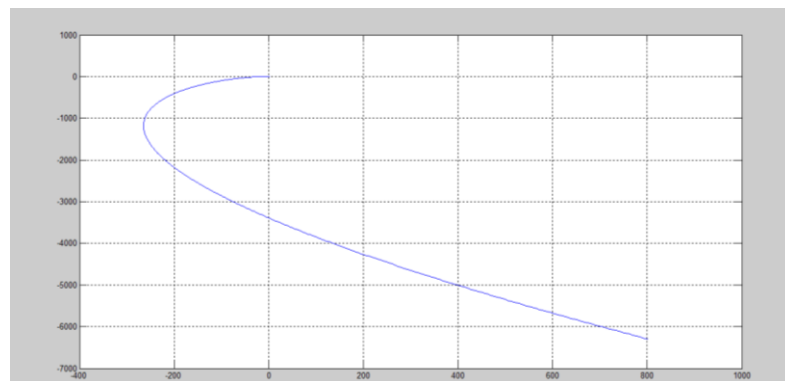


Рисунок 4.9 – Крива Михайлова

Так як на рисунку 4.9 складно однозначно сказати, чи стійка система, необхідно для більшої точності змінити діапазони осей координат (рис. 4.10).

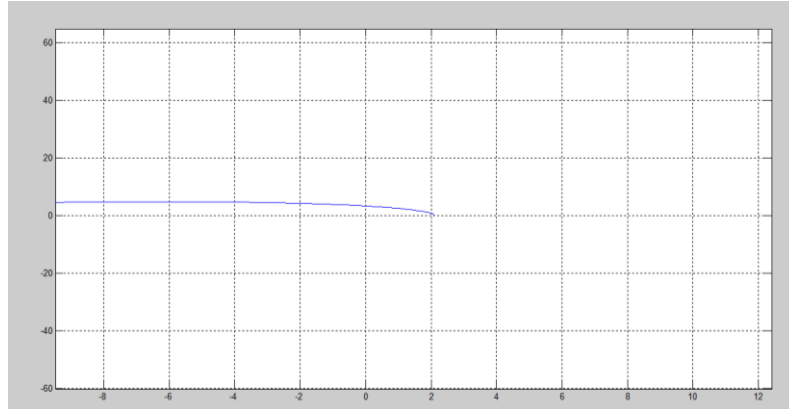


Рисунок 4.10 – Крива Михайлова при діапазоні

З графіків рис. 4.9 та рис. 4.10 видно, що крива Михайлова послідовно охоплює 4 квадранти, що дорівнює ступені характеристичного полінома, а також не перетинає початок координат, тому можна зробити висновок, що замкнута система стійка.

4.4 Виробнича санітарія в лабораторії

Роботи в лабораторії відносяться до робіт категорії 1а – легка фізична робота, яка виконується сидячи.

Оптимальні норми мікроклімату згідно з ДСН 3.3.6.042-99: в холодний період року – температура від 22 °С до 24 °С; відносна вологість від 40 % до 60 %; швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с. У теплий період року – температура від 23 °С до 25 °С; відносна вологість від 40 % до 60 %; швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с. Забезпечується за допомогою загальнообмінної вентиляції [40].

Шум та вібрація у робочому приміщенні. У приміщенні технічного відділу причинної шуму і вібрації являються апарати, прилади і устаткування: друкуючі пристрої, комп'ютери, вентилятори, кондиціонер та ін. При їхній

роботі рівень вібрації не вище 33 дБ, рівень шуму не повинен перевищувати 50 дБА, що є нормою для даного виду діяльності відповідно до НПАОП 0.00-1.28-2010 [40].

Заходи по забезпеченню встановлених норм: використання спеціальних шум-поглинаючих перегородок, застосування меблів, які сприяють зменшенню шуму і вібрації, установка апаратів і приладів на спеціальні амортизуючі підкладки.

Електробезпека. Для живлення устаткування (ПЕОМ, освітлювальні прилади) які є однофазними споживачами використовується трифазна мережа 380/220 В частотою 50 Гц з глухо заземленої нейтралі. Із цієї причини при роботі з електроприладами існує потенційна небезпека ураження людини електричним струмом, тому в правилах устрою електроустановок (згідно ПУЕ [41]) передбачені наступні заходи електробезпеки: конструктивні, схемно-конструктивні й експлуатаційні.

Конструктивні – вимоги що забезпечують захист від доторкання персоналу до струмоведучих частин. ПЕОМ мають ступінь захисту IP 44. Прилади освітлення IP-23.

Схемно-конструктивним заходом захисту є занулення електрообладнання у приміщенні. Для користувача ПЕОМ важливим є дотримання правил безпеки експлуатації електрообладнання. Так, заборонено доторкатися до дротів та з'єднань при наявності напруги в мережі, а також самостійно проводити ремонт електрообладнання. Усі питання щодо ремонту налагодження та інше, можуть виконувати тільки електрики та від повідні фахівці, які мають допуск до роботи із електрообладнанням певної категорії.

4.5 Висновки до четвертого розділу

Оптичний моніторинг і контроль в процесі виробництва є ключовими факторами для реальної автоматизації в промисловості. Досягнення цієї мети

передбачає розробку високоякісних методів моніторингу та управління, які гарантують, що вихідні дані системи відповідають специфікаціям цільових значень в режимі онлайн.

У цьому розділі були детально описані функції внутрішньовиробничого моніторингу та управління, вибору датчиків, техніки управління, об'єднання сенсорів і побудови оптичних систем для внутрішньовиробничого моніторингу та управління.

Проведені розрахунки системи керування, які показали, що система стійка.

ВИСНОВКИ

У атестаційній роботі магістра проведено дослідження оптичних перемикачів, виконані розрахунки різних параметрів перемикача та проведені моделювання позиціонування дзеркал та управління.

Був проведений аналіз сучасних конструкцій і характеристик оптичних перемикачей. Розглянуто конструкцію та застосування світловодів. У схемі перемикача з обертовим дзеркалом зв'язок між світловодами виникає, коли кут нахилу дзеркала щодо осі світловода дорівнює 45 градусів. Якщо кут дорівнює мінус 45 градусів, то виникає зв'язок між світловодами. Швидкість перемикання в такому пристрої визначається частотою обертання дзеркала і може досягати декількох кілогерц.

У другому розділі було розглянуто дзеркала в двомірному масиві, які використовуються в якості двомірного джерела світла. Менший розмір дзеркала є одним з обов'язкових вимог для створення системи зберігання даних з розумною ємністю для мобільних пристроїв; інші вимоги включають в себе більш низьку споживану потужність, більш низьке керуючу напругу, точність кута відхилення, надійність і т.д.

Отримані результати показали, що деякі архітектури мають характеристики більш підходящі, ніж інші, для використання в здійсненні матриці перемикання MEMS з великою кількістю портів.

Було розглянуто дизайн компактного дзеркального обертання оптичного поперечного з'єднання. Використовуючи простий аналіз, визначили оптимальний гауссовський промінь для поширення на певній відстані. Цей промінь має найменший можливий максимальний діаметр.

У третьому розділі було проведено порівняння моделі з експериментальними даними, отриманими на самозбірних мікродзеркалах. На основі рішення було показано, що крутний момент, створюваний кутовим вертикальним приводом, залежить, щонайменше, від другого порядку кута

повороту, що призводить до деформації форми резонансної кривої при високій напрузі. Чисельне рішення також показує зрушення резонансної частоти з напругою, і модель може точно передбачити резонансну частоту при довільному вхідній напрузі. Однак більш прості моделі зміни ємності не забезпечують достатньої точності.

У четвертому розділі були детально описані ролі внутрішньовиробничого моніторингу та управління, вибору датчиків, техніки управління, об'єднання сенсорів і побудови оптичних систем для внутрішньовиробничого моніторингу та управління. Проведені розрахунки керування приводом дзеркала.

Проведене дослідження оптичних перемикачів, розрахунки їх параметрів, моделювання роботи механізмів позиціонування та управління, за отриманими результатами, може дати можливість внесення коректив в ТП їх виготовлення та створює підґрунтя для підвищення технологічного забезпечення якості оптичних перемикачів зв'язкових світловодів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Пащенко А.В. Аналіз перемикачів оптоволоконного сигналу [Текст]. / А.В. Пащенко// Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» (ADED–2020) збірник студентських наукових статей (Випуск 1) – Харків: ХНУРЕ, 2020. С.: 226 – 230

2. ДСТУ 3008–15. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст]. – Введ. 2015–06–22. – К.: Держстандарт України, 2017. – 29 с.

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

4. Невлюдов И.Ш. Технологиии микросистемной техники / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин, Е.А. Чалая // НТЖ Технология приборостоения. – Х., 2014. – № 3.

5. Невлюдов И.Ш. Технологиии микросистемной техники (часть II) / И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин, Е.А. Чалая // НТЖ Технология приборостоения. – Х., 2015. – №2.

6. Nevliudov I. Modeling MEMS Membranes Characteristics / I.Nevliudov, V. Bortnikova, O. Chala and S. Maksymova // 2018 XXVI-th International Ukrainian-Polish Scientific and Technical Conference CAD in machinery design implementation and educational issues (CADMD), 2018. – P. 61 – 68.

7. Филипенко О.І. Моделирование зависимости відбивної здатності мікродзеркал оптоволоконних компонентів від їх геометричних параметрів / О.І. Филипенко, О.О. Чала, К.Л. Хрустальов // Доповіді БГУИР, 2018. – №5.
8. Малик Б.О. Підвищення ефективності роботи оптоволоконних ліній зв'язку в умовах впливу зовнішніх факторів оточуючого середовища / Б.О. Малик, О.В. Токарева, С.Б. Заморій// II Міжн. нук.-техн. конф. Виробництво & Мехатронні системи (M&MS-2018). – Харків, 2018. – 2018. – С. 111–115.
9. Filipenko O. The influence of geometric characteristis on a bandwidth of the photonic crystal waveguide / O. Filipenko O. Donskov and O. Chala, 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2015, pp. 93–94, (DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357279).
10. Белов Л. Переключатели сверхвысоких сигналов / Л. Белов // М.: Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 2006. – № 1. – 20–25 с.
11. Дмитриева С.А. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы / С.А. Дмитриева, Н.Н Слепова // М.: ООО Волоконно-оптическая техника, 2005. – 576 с.
12. Басиладзе Г.Д. Электро- и магнитооптические переключатели для волоконно-оптических сетей связи / Г.Д. Басиладзе, В.Н. Бержанский, А.И. Долгов // ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского, серия Физико-математические науки, 2012. –Т. 25 (64). – № 1. – С. 140-159.
13. Варадан В. ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2004. – 528 с
14. Федотов А.Б. Полые фотонно-кристаллические волокна для передачи мегаваттных фемтосекундных импульсов в солитонном режиме / А.Б. Федотов [и др.] // нанотехнологии, 2007. – Т. 2, № 3–4. – С. 134–139.
15. Jang, Y. H. Fabrication of electromagnetic micromirror array/ Y. H. Jang, Y. K. Kim // Proc. SPIE, 2001. – P. 395–402.

16. Kim J. MEMS applications in three-dimensional data storage systems / J. Kim, S. Lee // Proc. of the 2nd KIEE MEMS Symposium, 1(2), 1999. – P. 27–32.
17. Wu M. C. Free-space integrated optics realized by surface micromachining / M. C. Wu, L. Y. Lin, S. S Lee, C. R. King, // High Speed Electron. Sys., 8(2), 1997. – P. 283–297.
18. Ware A. New photonic-switching technology for all-optical networks / A. Ware // Lightwave, vol. 17, no. 3, 2000. – P. 92–98.
19. Yeow T.W. Goldenberg, SOI-based 2-DMEMS L-switching matrix for optical networking / T.W. Yeow, K. L. E. Law, J. Sel // Topics Quantum Electron, vol. 9, no. 2, 2003. – P. 603–613.
20. Shen G. T. Architectural design for multistage 2-D MEMS optical switches / G. T. Shen, H. Cheng, S. K. Bose, C. Lu, T. Y. Chai // J. Lightw. Technol., vol. 20, no. 2, 2002. – P. 178–187.
21. Saleh B. E. A. Fundamentals of Photonics / B. E. A. Saleh, M. C. Teich // NewYork: Wiley, 1991.
22. Aksyuk V. A. Micro machined optical switch / V. A. Aksyuk, D. J. Bishop, P. L. Gammel // U.S. Patent 5 923 798, 1999.
23. Dhuler M. D. Moveable microelectromechanical mirror structures / M. D. Dhuler, E. A. Hill, and A. B. Cowen // WIPO Patent 067 063, Nov. 9, 2000.
24. Lin L.Y. Fiber-optic free-space micromachined matrix switches / L.Y. Lin // U.S. Patent 6 215 921, Apr. 10, 2001.
25. Husain A. Micromachines optomechanical switching cell with parallel plate actuator and on-chip power monitoring / A.Husain, L. Fan // WIPO Patent 0 073 840, Dec. 7, 2000.
26. Lee S. S. Free-space fiberoptic switches based on MEMS vertical torsion mirrors / S. S. Lee, L.S. Huang, C.J. Kim, M. C. Wu // J. Lightwave Technol., vol. 17, 1999. – P. 7–13.

27. Neukermans A. P. Micromachined members coupled for relative rotation by torsion bars / A. P. Neukermans, T. G. Slater, P. Downing // U.S. Patent 6 044 705, Apr. 4, 2000.

28. Gasparyan A. Mechanical reliability of surface-micromachined self-assembling two-axis MEMS tilting mirrors / A. Gasparyan, V. A. Aksyuk, P. A. Busch, S. C. Arney // Proc. SPIE, vol. 4180, 2000. – P. 86–90.

29. Daneman M. J. Optical switch having equalized beam spreading in all connections / M. J. Daneman, M.H. Kiang, B. Behin, K. Y. Lam // WIPO Patent 0 165 300, Sept. 7, 2001.

30. Zhou L. Corner-cube retroreflectors based on structure-assisted assembly for free-space optical communication / L. Zhou, J. M. Kahn, K. S. J. Pister // J. Microelectromech. Syst., vol. 12, no. 3, 2003. – P. 233–242.

31. Milanovic V. High aspect ratio micromirrors with large static rotation and piston actuation / V. Milanovic, S. Kwon, L. P. Lee // IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, no. 8, 2004. – P. 1891–1893.

32. Hah D. Lowvoltage, large-scan angle MEMS analog micromirror arrays with hidden vertical comb-drive actuators / D. Hah, S. T. Huang, J. C. Tsai, H. Toshiyoshi, M. C. Wu // J. Microelectromech. Syst., vol. 13, no. 2, 2004. – P. 279–289.

33. Hong Y. K. Design, fabrication and test of self-assembled optical corner cube reflectors // Y. K. Hong, R. R. A. Syms, K. S. J. Pister, L. X. Zhou // J. Micromech. Microeng., vol. 15, no. 3, pp. 663–672, Mar. 2005.

34. Mentenhall W. Statistics for Engineering and the Sciences / W. Mentenhall, T. Sincich // 4th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995. – P. 566–567.

35. Cho, H. S. Neural network applications to manufacturing processes: monitoring and control / H. S. Cho, J. Wang, A. Kusiak // Eds Computational Intelligence in Manufacturing Handbook, in., CRC Press, Boca Raton, FL, 2001.

36. Kawashima, T. Sensor fusion system for model-based object tracking / T. Kawashima, T. Nagasaki, Y. Aoki // in Proc. 2nd Int. Sym. Measurement Control Robotics, Tsukuba, Japan, 1992. – P. 265–269.
37. Morimoto Y. Introduction to Opto-Mechatronics / Y. Morimoto // Kyoritsu Shuppan, Japan, 1996.
38. Shiraishi, M. Sensing and Control in Production and Manufacturing / M. Shiraishi // private lecture notes at Ibaraki University, 1994–1998. – P. 1–230.
39. Harrie A.C. Tilmans: MEMS components for wireless communication / A.C. Harrie // invited paper at XVI Conference on Solid State Transducers, Prague, Czech Republic, Sept, 2002.
40. НПАОП 0.00-1.28-10. Про затвердження правил охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин [Текст]. – Введ. 2010-04-10. – К.: Наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 2010. – 30 с.
41. ПУЕ-2011. Правила устрою електроустановок [Текст]. – Введ. 2006-10-06. – К.: Об'єднання енергетичних підприємств «галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2006. – 34 с.
42. Невлюдов І.Ш. Метод контролю функціональних поверхонь компонентів мікрооптоелектромеханічних систем (engl.) / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипченко, О.О. Чала, І.В. Боцман // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2020. – № 3(40). – С. 114-123.
43. Filipenko O. Investigation of the 2-D photonic crystal demultiplexer / O. Filipenko, O. Donskov // 2016 IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), Odessa, 2016. – P. 60–61. (DOI: 10.1109/CAOL.2016.7851375).