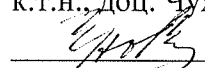


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

УДК 621.37:621.391

«Допущено до захисту»

В.о. завідувача кафедри
комп'ютерної інженерії у медицині
та телекомунікаціях
к.т.н., доц. Чухов В.В.

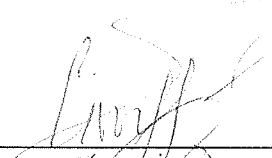

« 15 » 12 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Дослідження оптичного кутоміра

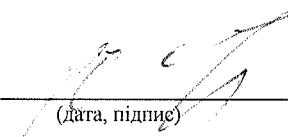
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр.ТРм-21-1


(дата, підпис)

Сітніков І.В.

Керівник роботи
к.т.н., доц.


(дата, підпис)

Ципоренко В.Г.

Житомир
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему Дослідження оптичного кутоміра

Виконав:
студент 2 курсу, групи ТРм-21-1
спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Сітніков І.В.

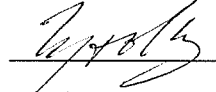
Керівник Ципоренко В.Г.

Рецензент Коломієць Р.О.

Житомир
2022

«Затверджено»

В.о. завідувача кафедри
комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях

 В.В. Чухов
«12» 12 2022 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Сітнікова І.В.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження оптичного кутоміра

затверджено наказом по університету від «12» жовтня 2022 р. № 460/С

2. Мета дослідження визначення оптимальних шляхів побудови та використання оптичного кутоміра

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.
Принцип вимірювання кута - оптичний, диспазон вимірювання - даль радіана

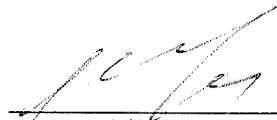
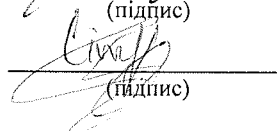
4. Основні задачі дослідження 1) провести аналіз літературних джерел. 2) провести розробку математичної моделі. 3) провести дослідження

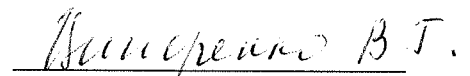
5. Термін подання роботи до захисту 12 грудня 2022 р.

6. Дата видачі завдання «12» жовтня 2022 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

(підпис)


(прізвище, ініціали)
Сітніков І.В.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дана робота присвячена розробці приладу вимірювання кута повороту вала, що знаходиться під навантаженням. Особливістю роботи приладу мвимірювання кута полягає у безконтактному способі проведення вимірювань. Безконтактний спосіб здійснюється за рахунок використання оптичних методів.

В роботі проведено моделювання та дослідження оптичного кутоміра.

ANNOTATION

This work is devoted to the development of a device for measuring the angle of rotation of the shaft under load. A feature of the angle measuring device is the non-contact method of measurement. The contactless method is carried out through the use of optical methods.

The modeling and research of optical protractor is carried out in the work.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота складається із трьох розділів, які викладено на 58 сторінках і які містять 2 таблиці, 30 рисунків та 20 посилань на літературні джерела.

Ключові слова: кутомір, оптична система, вал під навантаженням.

Перший розділ містить аналіз літературних джерел. Цей аналіз дозволяє оцінити стан розвитку галузі, де застосовується прилад, що розробляється. Приведено аналіз принципів побудови існуючих приладів.

Другий розділ містить розробку моделі, яка дозволить провести дослідження характеристик приладу, що досліджується.

Третій розділ містить результати дослідження характеристик оптичного кутоміра. Це дослідження проводяться на основі моделі, що розроблена в другому розділі.

ЗМІСТ

	ВСТУП	7
1	Огляд та аналіз відомих методів та засобів вимірювання кутів	8
1.1	Огляд публікацій, в яких започатковано вирішення проблеми вимірювання кута повороту вала	9
2	Теоретичні дослідження властивостей оптичного кутоміра	33
2.1	Розробка математичної моделі роботи оптичного кутоміра	33
3	Дослідження параметрів оптичного кутоміра	43
	ВИСНОВКИ	56
	Перелік використаних літературних джерел	57

ВСТУП

Промислове обладнання різного призначення в багатьох випадках містить вали, які використовуються для передачі потужності від джерела енергії до частин, що виконують якусь роботу. При використанні обладнання відбувається зношування його частин і тому потребується діагностика їх стану. Одним із варіантів проведення такої діагностики є навантаження вала та проведення вимірювання його реакції на навантаження. В тому числі провертання вала на певний кут. Для виконання цієї задачі використовуються контактні методи на основі тензодатчиків, однак вони вимагають багато часу для проведення такої діагностики. Тому існує велика зацікавленість у розробці та впровадженню приладів діагностики, що дозволять зменшити час діагностики.

Дослідженню приладу, що здійснює безконтактне вимірювання величини кута провертання вала при навантаженні і присвячена ця робота.

Об'єктом дослідження виступає оптичний прилад вимірювання кута.

Предметом дослідження є вивчення характеристик оптичного приладу вимірювання кута.

Мета дослідження – визначення оптимальних шляхів побудови та використання оптичного кутоміра.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні роботи:

1. Провести аналіз літературних джерел та визначити основні методи вимірювання кута та їх переваги та недоліки.
2. Провести розробку математичної моделі роботи оптичного приладу вимірювання кута.
3. Провести дослідження характеристик оптичного кутоміра.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ

ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

Важливим методом діагностики для виробників обладнання для морських суден та електроенергетики є визначення крутного моменту на обертовому валу. В даний час існує потреба в більш ефективному і недорогому методі вимірювання крутних переміщень валу, що використовується для передачі потужності від парової турбіни до електрогенератора. Коли потужність передається турбіною, з'єднувальний вал повинен зазнати крутильного скручування на кут, пропорційний переданому крутному моменту. Вимірювання результуючого кута скручування є складним діагностичним завданням, оскільки зміни деформацій зсуву валу дуже малі і відбуваються з швидкими темпами.

Вимірювання деформації та крутного моменту в таких випадках, безумовно, не є новою розробкою. Одна з сучасних практик діагностичного тестування на кручення включає поділ валу та постійну установку вбудованого перетворювача для з'єднання двох частин.

Це вимагає зупинки турбіни та розбирання інших частин машини, щоб блок діагностики кручення міг бути встановлений на валу. Цей час простою накопичується через періодичне технічне обслуговування та заміну зношених і брудних деталей, що, суперечить потребам у підвищенні продуктивності.

Все ж таки робочі завдання необхідні, щоб допомогти підтримувати точну роботу датчика та передачі переданих сигналів крутного моменту (наприклад, має бути збережене відповідне співвідношення сигнал/шум). Витрати та неефективність використання датчиків крутного моменту встановили потребу в системі, здатній видавати сигнал, пропорційний крутному моменту, що передається валом, уникаючи проблем, пов'язаних із наявними методами діагностики в мережі.

1.1 Огляд публікацій, в яких започатковано вирішення проблеми вимірювання кута повороту вала

Двома основними функціями безконтактного датчика крутного моменту є

- виявлення кутових викривлень у валу, підданому дії статичного або динамічного крутильного навантаження,
- перетворення пружної реакції в електричний сигнал.

Ці електричні сигнали можуть бути просторово передані на віддалений приймач-демодулятор (RD). Схема RD повинна бути розроблена так, щоб реагувати на невеликі зміни переданого сигналу, які відповідно змінюються при крутильних зміщеннях валу.

Основна ідея полягає в тому, щоб уникнути контакту між валом і блоком діагностики кручення, на відміну від представлених на ринку датчиків крутного моменту, які безпосередньо контактують з валом. Проте сучасні прилади ефективно вимірюють крутильні переміщення в нерухомих і нестационарних валах.

Розглянемо детально опис роботи пристроїв, що використовуються в даний час.

Нині представлені на ринку механізми діагностики кручення можна розділити на дві великі категорії:

- датчики крутного моменту обертового вала;
- датчики моменту обертання.

Перший класифікується як пристрій, який розміщується безпосередньо послідовно з валом, тоді як другий можна розглядати як систему, підвішену на валу.

Типи, які відповідають першій групі, підрозділяються на чотири групи:

- класична конструкція контактних кілець;
- тип поворотного трансформатора;
- крутильний змінний диференціальний трансформатор (TVDT);
- тип оптичного контактного кільця.

Пристрої категорії другої групи відносять до систем вимірювання моменту зсуву фаз.

Механізми діагностики кручення типу I

Перший з лінійних датчиків крутного моменту обертового валу, який буде обговорюватися, — це той, що виробляється Lebow products [1] і показано на рисунку 1.1. Ця конструкція має класичну конструкцію контактної кільця і діє наступним чином.

Тензометричний міст складається з чотирьох датчиків, з'єднаних з чотирма срібними пружинами, встановленими на обертовому валу. Графітові щітки притискаються до контактних кілець і забезпечують електричний шлях для збудження вхідного моста та вихідного сигналу (для збудження тензометричного моста можна використовувати змінну або постійну напругу). При обертанні в сильному магнітному полі система контактних кілець буде генерувати невеликі сторонні напруги, які посилюються схемою зчитування. Через рівень сигналу в мілівольтах, що створюється мостом тензодатчика, кільця та щітки необхідно періодично очищати, щоб підтримувати задовільне співвідношення сигнал/шум сигналу реакції моста.

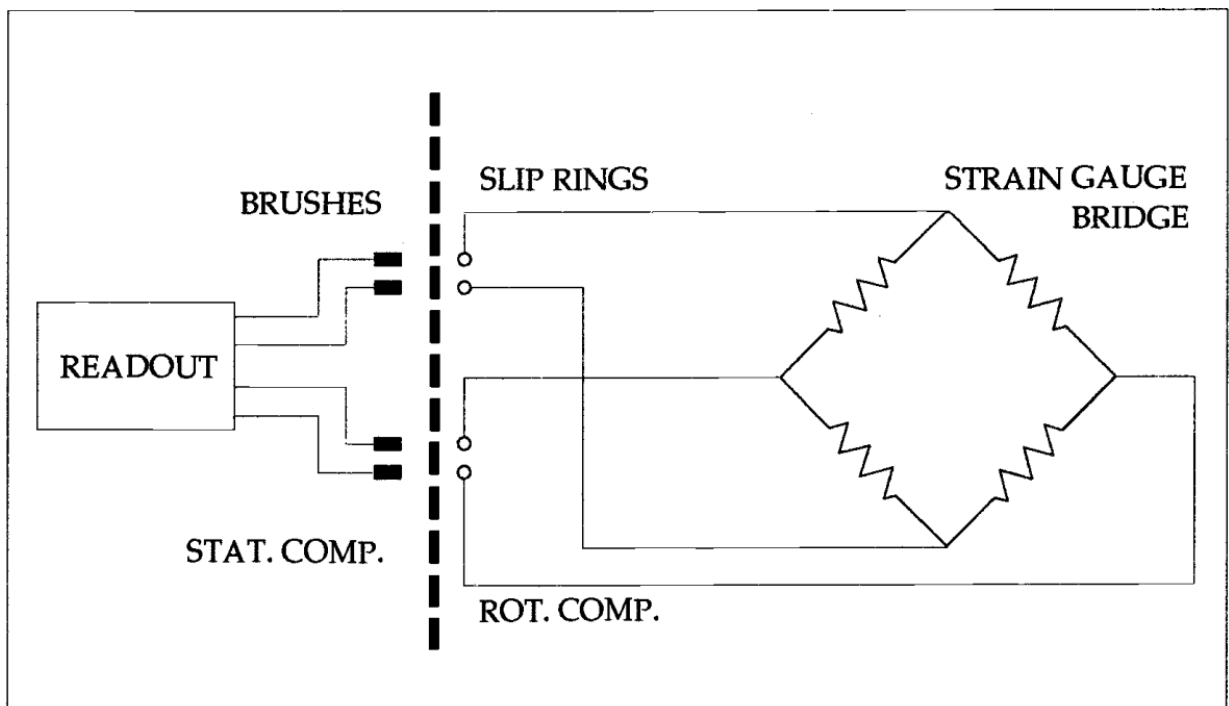


Рисунок 1.1 Система діагностики крутного моменту обертового валу контактних кілець від Lebow

Другий із лінійних датчиків крутного моменту обертового валу, який розглянемо, також виробляється Lebow® [1] і показано на рисунку 1.2. Ця конструкція налаштована як поворотний трансформаторний тип. Загалом, поворотні трансформатори відрізняються від звичайних трансформаторів лише тим, що первинна або вторинна обмотка може вільно обертатися. Для передачі збудження змінного струму використовується один трансформатор напруги на тензометричний міст, а другий трансформатор передає вихідний сигнал на неповоротну частину перетворювача крутного моменту.

Таким чином, на місці чотирьох контактних кілець приходять два трансформатори, і не потрібен прямий контакт між обертовими та нерухомими елементами перетворювача. Lebow описує трансформатори як пару концентрично намотаних котушок з однією котушкою, що обертається всередині або біля нерухомої котушки. Магнітні лінії потоку утворюються шляхом подачі змінної в часі напруги до однієї з цих котушок. Між обмотками знаходиться сердечник з високою проникністю, який концентрує магнітний потік і покращує зв'язок між котушками. У цьому сердечнику є зазор, щоб забезпечити проходження опорного елемента для внутрішньої обертової котушки; ця конкретна геометрія дозволяє трансформатору демонструвати високий коефіцієнт зв'язку. Корпорація Eaton [2] пропонує придбати відповідний несучий інструмент для використання з датчиком крутного моменту поворотного трансформатора, який забезпечує збудження змінного струму в діапазоні 3 кГц (наприклад, Lebow модель 7540).

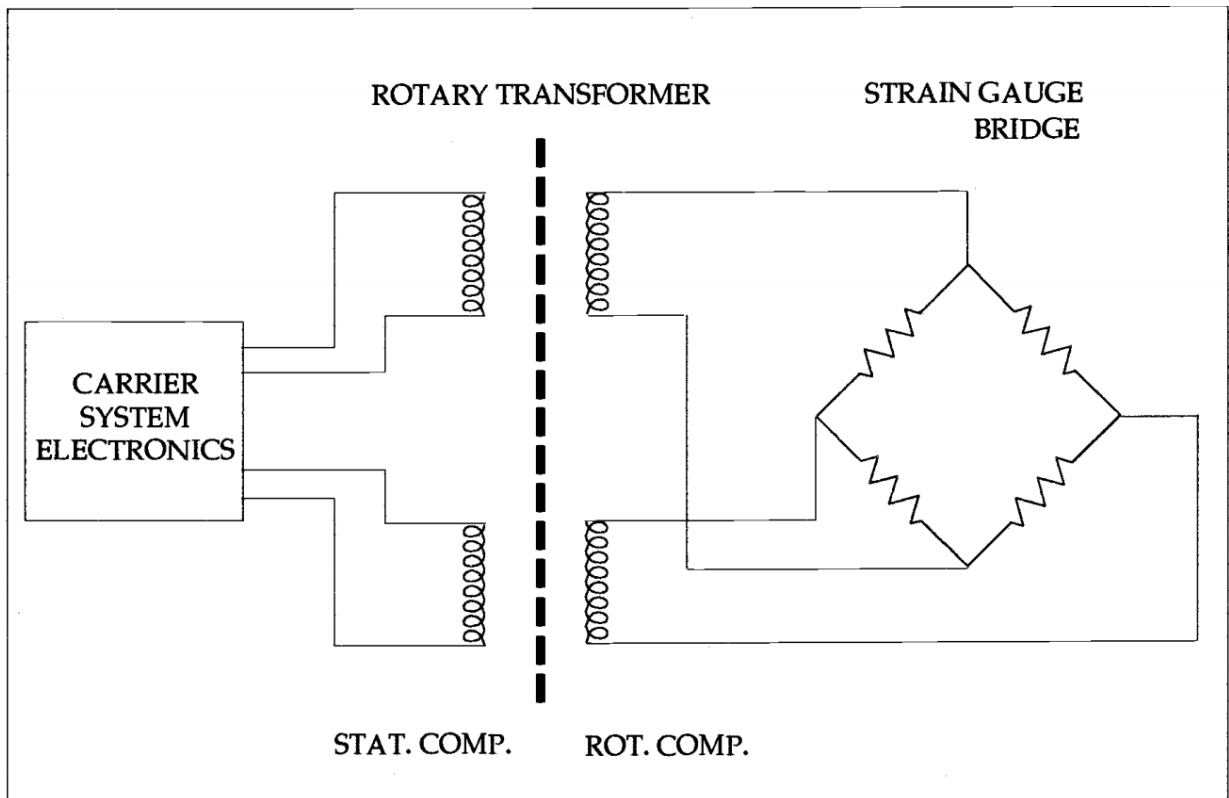


Рисунок 1.2 - Система датчиків крутного моменту обертового валу поворотного трансформатора Lebow's

Третім типом досліджуваного датчика крутного моменту був крутильний змінний диференціальний трансформатор (TVDT). Ця конструкція проілюстрована на рисунку 1.3. Конструкція TVDT вимірює кутове відхилення вала під дією крутного моменту за допомогою магнітного поля.

До вала, виготовленого з немагнітного матеріалу, прикріплено три трубчасті частини з магнітного матеріалу (A,B,C) із зазорами під кутом 45° до осі вала. Крутний момент, прикладений до кінців вала, призведе до того, що один із зазорів закриється, а інший відкриється; ця дія призводить до того, що магнітний опір у кожному зазорі відповідно збільшується та зменшується. В [2] стверджується, що змінна напруга, прикладена до первинної котушки, обов'язково індукує напругу у вторинній котушці. Таким чином, як вал закручується, один вторинна котушка покаже збільшення напруги, а інша пропорційне зменшення. Ці вторинні напруги передаються в коло, яке поєднує сигнали разом, щоб отримати сигнал з полярністю, яка вказує напрямок крутного моменту, і з величиною, пропорційною крутному

моменту. Корпорація Eaton [2] стверджує, що для подачі живлення та формування сигналу в системі такого роду необхідний спеціально розроблений несучий інструмент.

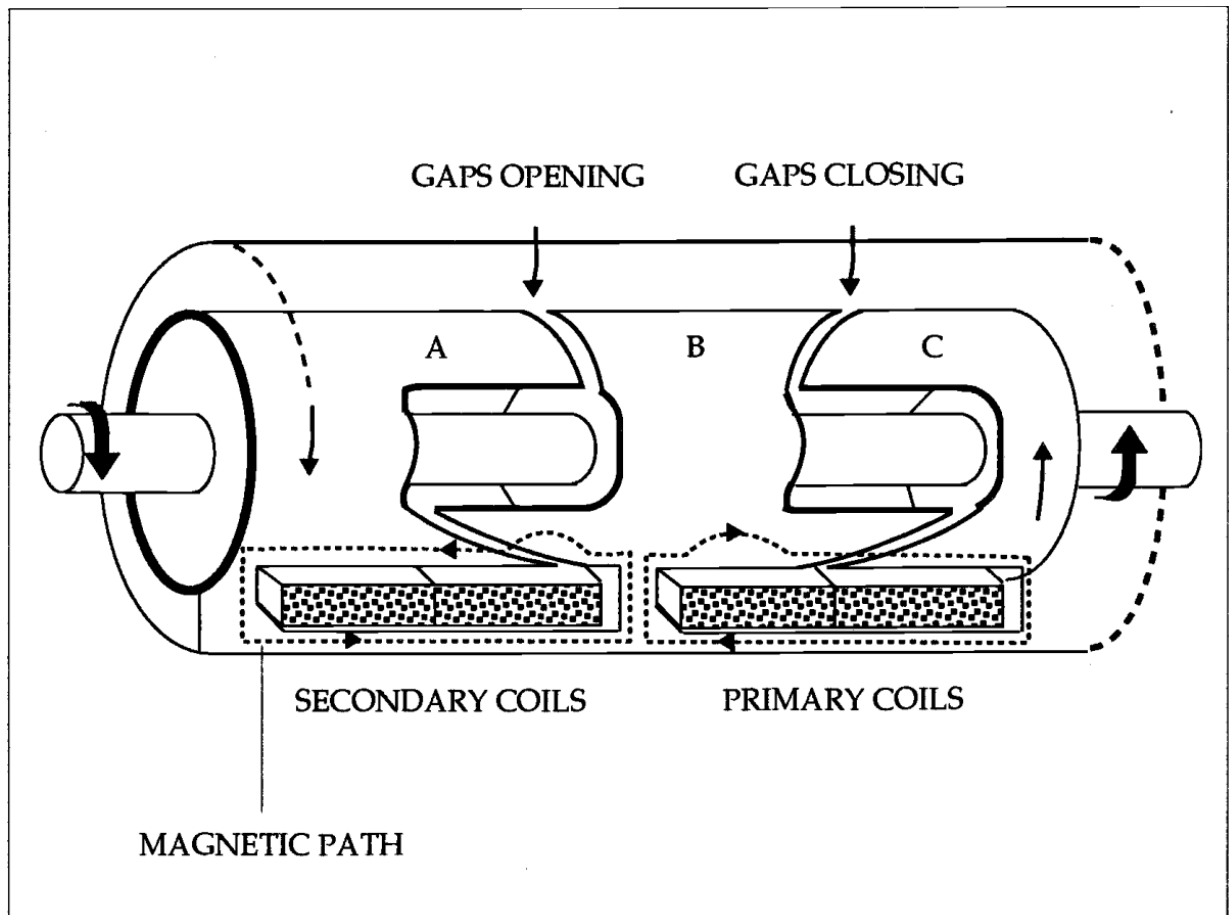


Рисунок оп1.3 Т сійонний змінний диференціальний трансформатор» від Lebow.

Четвертий і останній із рядних датчиків кручення обертового валу є оптичним контактним кільцем. Такий пристрій виготовляється компанією Litton Fiber Optic Products [3] і показано на рисунку 1.4. Волоконно-оптичні поворотні з'єднання Litton's - це волоконно-оптичні контактні кільця, здатні передавати дані сигналу деформації між обертовими та нерухомими компонентами. На відміну від звичайних моніторів крутного моменту, цей тип пристрою являє собою автономну капсулу, яка включає кулькові підшипники та один метр волоконно-оптичного кабелю на кожному кінці капсули. Класичні схеми контактних кілець повинні бути гібридизовані з волоконно-оптичним поворотним з'єднанням, оскільки для живлення

внутрішніх фотоелектронних ланцюгів потрібен електричний струм. Робоча довжина хвилі цього пристрою лежить в діапазоні від 0,83 до 1,30 мкм.

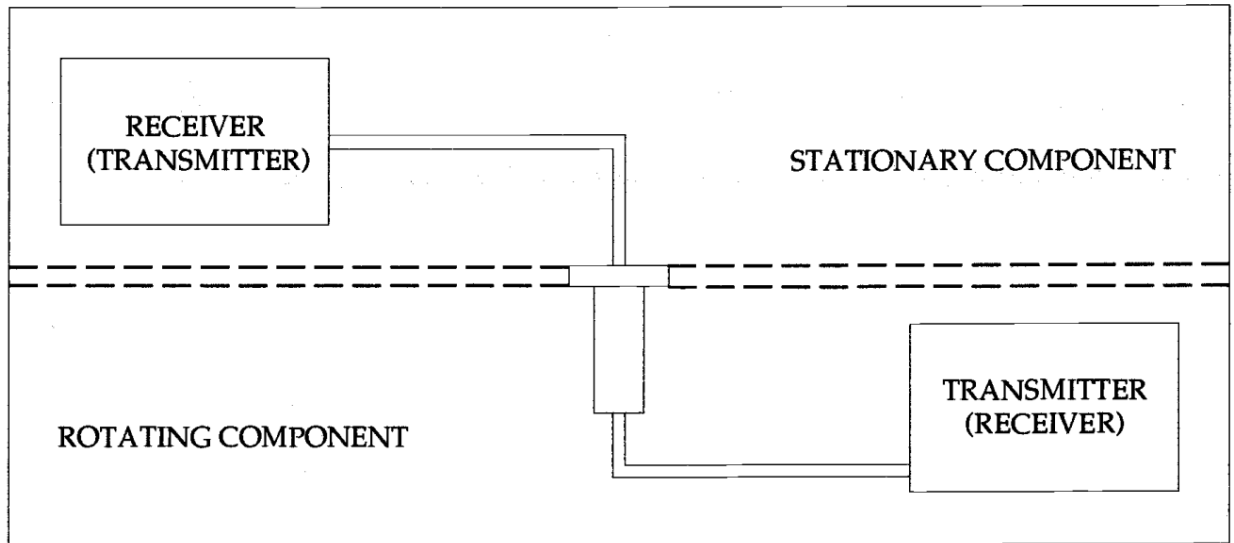


Рисунок 1.4 Волоконно-оптична система діагностики кручення ротаційного з'єднання (ковзне кільце) Litton's.

Механізми діагностики кручення типу II

Механізм діагностики кручення типу (II), що представляє інтерес, виробляється компанією Ono Sokki Co., Ltd. [3] і називається системою виявлення різниці фаз (PDDS). Головний компонент, який використовується для опису принципу роботи цієї системи, називається валом передачі крутного моменту і показано на рисунку 1.5.

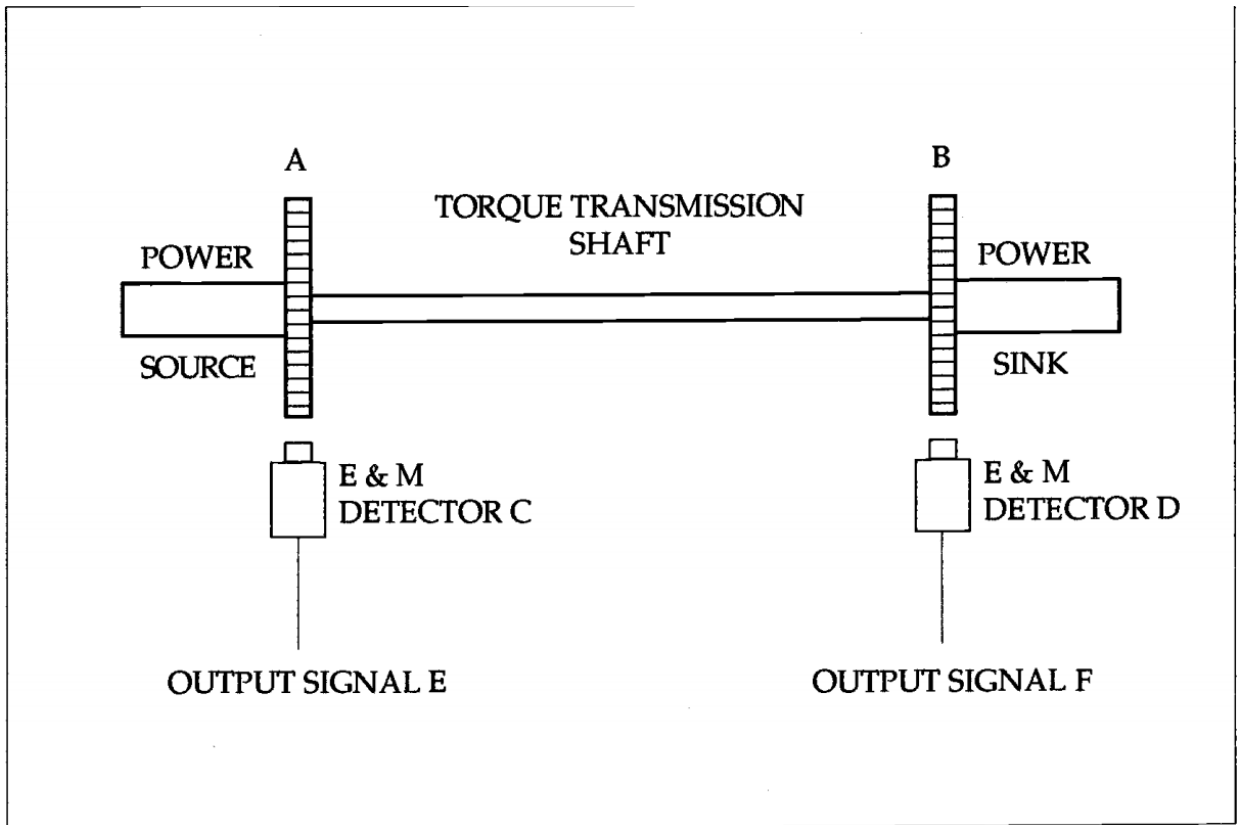


Рисунок 1.5 Вал передачі крутного моменту PDDS з електромагнітними датчиками

Механізм PDDS працює подібно до звичайних тензодатчикових діагностичних блоків, оскільки крутильне зміщення або накручування перетворюються на пропорційний електричний сигнал. Використовуються два магнітних датчика імпульсного типу, по одному на обох кінцях валу передачі крутного моменту. Як показано на рисунку 1.5, ряд рівномірно розташованих розривів (подібних до зубців шестерні) розташовано на обох кінцях валу і позначено шестернями А і В. Безпосередньо під цими шестернями знаходиться пара електромагнітних детекторів, які позначені С і Д. Коли вал, зображений на рисунку 1.5, піддається крутильному навантаженню, він повертається на кут, пропорційний величині прикладеного крутного моменту, так що зуби шестерень А і В будуть зміщені у відносному положенні на величину, рівну куту повороту валу. Оскільки датчики С і Д генерують змінну напругу з формами сигналу, які відстежують обертання шестерень А і В, різниця фаз між вихідними сигналами буде змінюватися пропорційно кута поворота. Іншими словами, обертання вала

генерує фазовий зсув між синусоїдальними виходами кожного з електромагнітних датчиків. Таким чином, прикладений крутний момент на валу можна визначити шляхом вимірювання різниці фаз між двома сигналами відповіді змінного струму, які генеруються датчиками E і F.

Одноканальна телеметрична система F-2003

Одноканальна телеметрична система F-2003, розроблена Binsfeld Engineering Inc. [3], призначена для вимірювання обертового моменту на обертовому валу, уникаючи проблем, пов'язаних із традиційним Лінійними методами діагностики, що розглянуті вище. Згідно з описом [3] система F-2003 працює по наступному принципу.

Чутливий до скручування тензодатчик прикріплений безпосередньо до обертового валу за допомогою типового ціанакрилатного клею. Після деформації еластоелектрична реакція датчика виявляється та обробляється передавачем F-1001, що працює від батарейок.

Цей передавач надійно прив'язаний до валу і під'єднаний за допомогою пари коротких проводів. У міру того, як вал зазнає змін крутильних навантажень, опір тензодатчика змінюється, у результаті чого генерується сигнал напруги. Ця еластоелектрична реакція перетворюється схемою передавача в радіочастоти в діапазоні від 88 до 100 МГц. Ця смуга частот потім передається на віддалену приймальну антену, розташовану в ізолюваному місці. Ця антена підключена коаксіальним кабелем до демодулятора приймача Binsfeld F2003. Пристрій RD має вбудований FM-приймач, який перетворює радіосигнал в аудіочастотну характеристику.

Оператор має можливість увімкнути динамік, щоб можна було спостерігати звукову мелодію, що відповідає змінам крутного моменту; збільшення відгуку динаміка відображає позитивний крутний момент, а зниження тону відповідає негативному крутному моменту. Схема демодулятора (ED) перетворює аудіосигнал у напругу постійного струму, відповідну для виведення на реєстратор діаграм, CR. Отримана копія є записом вимірювання крутного моменту валу в реальному часі. Таким чином, система діагностики F-2003 працює за принципом телеметрії і може

використовуватися на обертових валах діаметром від 1 до 22 дюймів. На рисунку 1.6 наведено схему, яка узагальнює принцип роботи цієї системи.

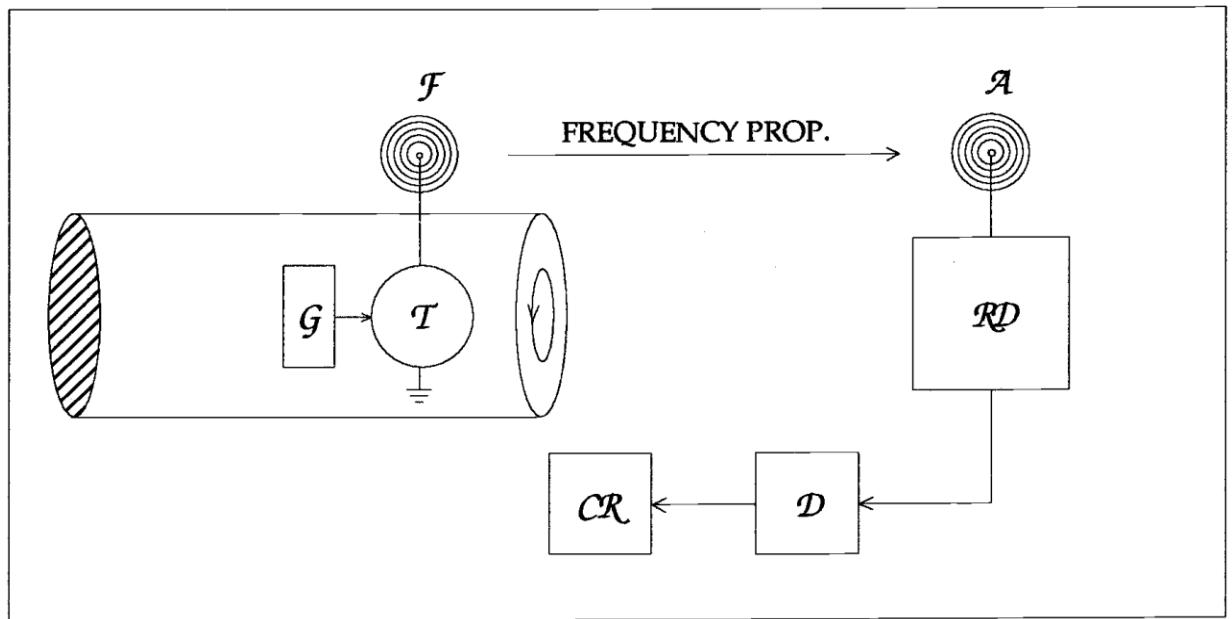


Рисунок 1.6 Основний принцип роботи телеметричної системи F-2003.

Точність перетворених на обертання сигналів реакції, які генеруються такими пристроями, з часом зменшуються, оскільки рухомі частини накопичують бруд і зношуються.

Прості графіки технічного обслуговування цих систем неодмінно призводять до простою установки, оскільки зазвичай потрібно розбирання валу. Телеметрична система F-2003 усуває проблему передачі еластоелектричних сигналів відповіді датчика через механічний інтерфейс, точність якого погіршується через забруднення та знос. Але ця система також вимагає спеціальних електронних приладів. Крім того, явища затухання через коаксіальні лінії послаблюють еластоелектричні сигнали відповіді, які генеруються тензодатчиками.

Інший можливий підхід — оптичне вимірювання та передача інформації про обертальні переміщення. Розглянемо оптичну систему, яка може вимірювати варіації кута повороту вала, навантаженого на обертання, шляхом передачі на світлочутливу налаштовану мережу.

Оптична система дозволяє:

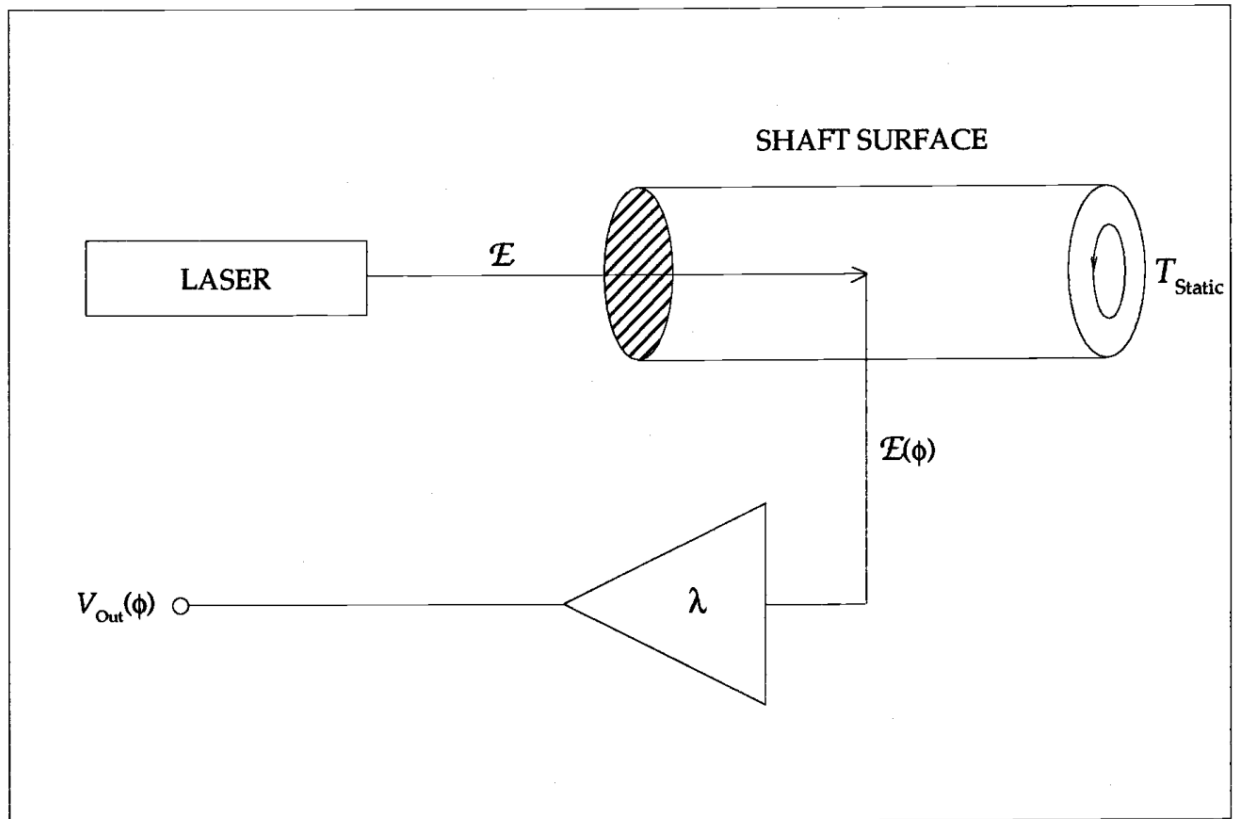
- Використовувати лазерний промінь малої потужності постійно і багаторазово відстежувати зміни кута повороту валу, підданому дії статичного крутного моменту;
- передавати світло лазера на недорогу електронну схему, здатну реагувати на невеликі зміни в кількості оптичного випромінювання енергія, поглинена датчиком, така що $E = E(\phi)$;
- отримати емпіричний вираз, що пов'язує кут повороту валу як функцію реакції світлочутливого кола, так що:

$$\phi = \phi(V_{out}), \quad (1.1)$$

де ϕ – кут обертання валу, навантаженого на кручення,

а V_{out} – відповідна вихідна напруга ланцюга.

Іншими словами, запропонована схема повинна мати вихідну характеристику, яка змінюється за напругою в залежності від кількості лазерного випромінювання, що поглинається фотосенсором в мережі; у свою чергу, енергія, що поглинається датчиком, буде залежати від ϕ . Рисунок 1.7 ілюструє процес механічного/оптичного/електронного перетворення запропонованої системи.



Рису1.7 3 нок апропонований процес механічного в оптоелектронне перетворення

Прикладом двоканальної системи може бути система, опис якої наведено в [17]

Джерелом оптичного випромінювання, що використовується в двоканальному кутомірі, виступає оптична пара. Приведений вище оптичний пристрій вимірювання кута призначено для вирішення наступних завдань:

- Здійснювати визначення нахилу поверхонь у просторі;
- Здійснювати оцінку механічного зміщення поверхонь. Може використовуватись з метою вимірювання кількості рідини в ємності, тиску рідини та газу в ємності;
- Оцінка ваги тіл. Використовується в електронних вагах, наприклад, при виготовленні ліків, тощо;
- Оцінка товщини твердих тіл та відстаней між твердими тілами.

Кутомір дозволяє визначати напрямок руху поверхні та відсутність руху і відхилення. При цьому при відсутності відхилення поверхні сформований сигнал(напруга) має значення нуль.

В якості основи для побудови пристрою вимірювання кутового положення використана інфрачервона оптична пара ST188. Ця оптична пара придатна для вимірювання відстані в межах від 4 до 30 мм. Здатність перетворювати оптичною парою має вигляд, який наведено на рисунку 1.8. Аналіз наведеної на рисунку характеристики показує, що вона має як ділянки, де характеристика має зростаючий характер, так і ділянки – де спадаючий. Ділянка із зростаючим характером характеристики має більш лінійну форму та більший діапазон значень [20, 21].

В [21] приведено результати експериментального дослідження макету кутоміра, яке показало, що при використанні оптичної пари ST188 з напругою живлення 5В отримуємо вихідну напругу в діапазоні $\Delta U=5В$. при цьому діапазон довжин, що вимірюються складає 8 мм.

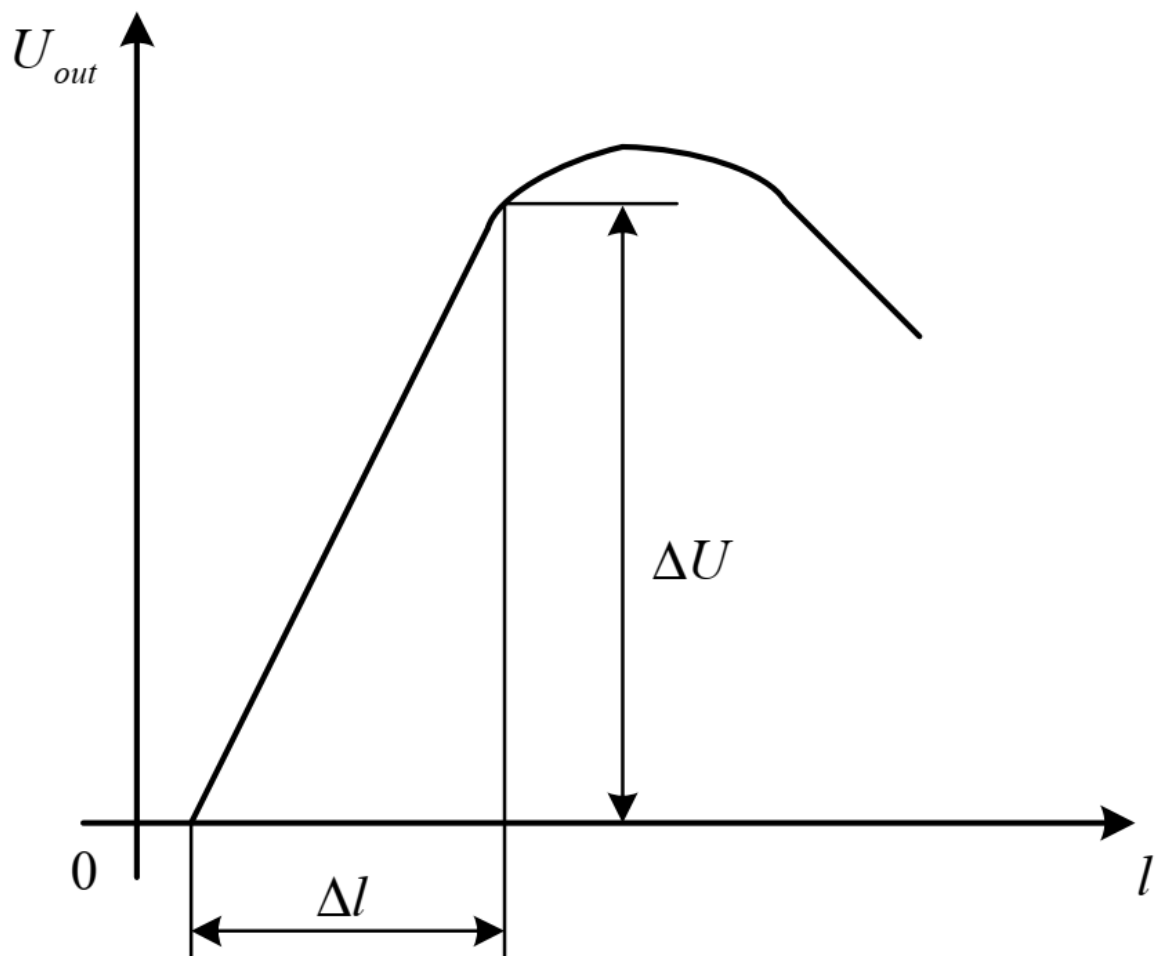


Рисунок 1.8 – Характеристика перетворення оптопари ST188

Аналіз рисунку, що наведено на рисунку 1.8 показує, що діапазон зміни напруги ΔU визначає діапазон вимірювання довжини Δl . Аналіз характеристики, рисунок 1.8, показує, що неможливо визначити знак зміни характеристики, тобто чи відбувається збільшення або зменшення значення кута. Для вирішення проблеми визначення знаку використовують форму залежності, яка характерна для пеленгаторів і яка наведена на рисунку 1.9. Кут нахилу характеристики відносно осей може змінюватися.

Наведена на рисунку 1.9 характеристика дозволяє отримувати не лише значення кута, але і напрямок його зміни (вверх чи вниз відносно якоїсь нульової точки). В пеленгаторах в якості нульової точки вибирається перпендикуляр до лінії, що з'єднує дві антени пеленгатора, як це показано на рисунку 1.10.

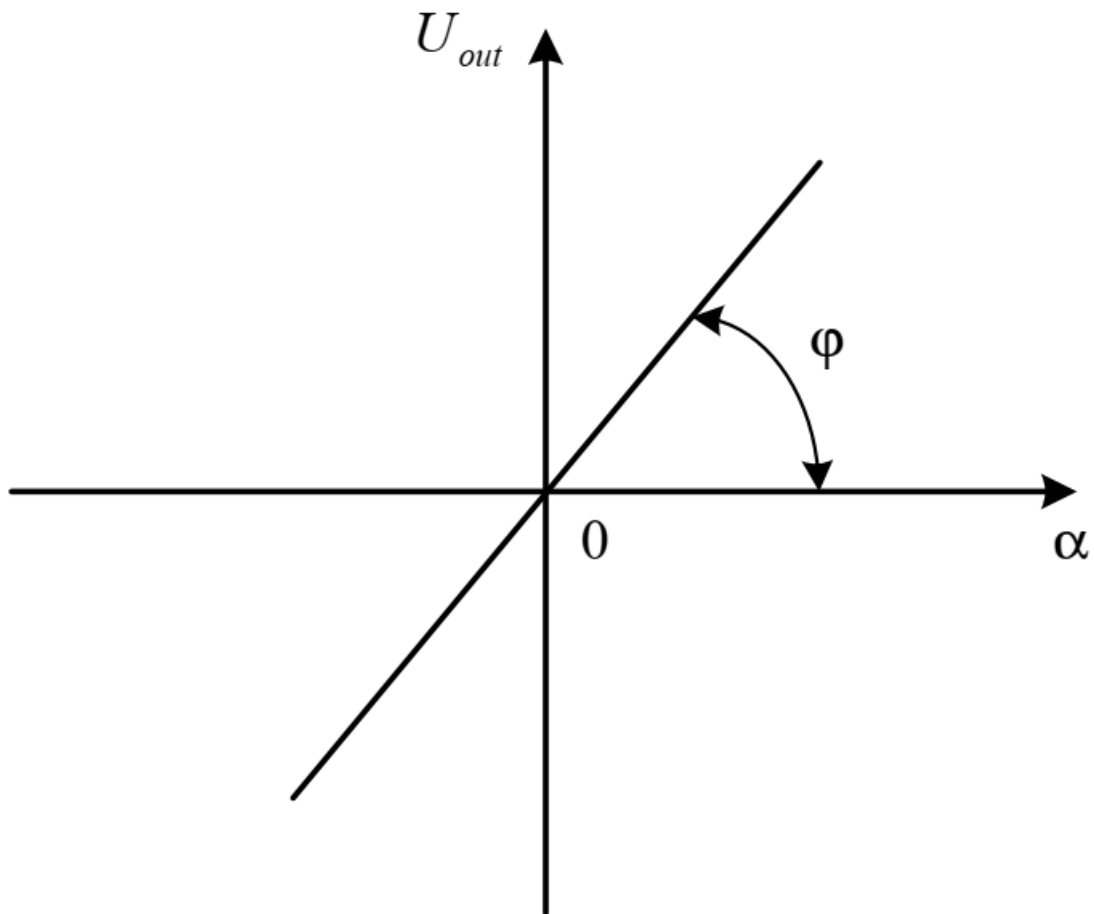


Рисунок 1.9 – Характеристика перетворення кутоміра

Можливі декілька варіантів побудови кутоміра:

- Кутомір із нерухомою оптичною системою. В цьому варіанті оптична система нерухома відносно заданої осі, тоді як рухомою є площина, положення якої визначається. Цей варіант приведений на рисунку 1.10, а.
- Кутомір із рухомою оптичною системою. Варіант побудови показано на рисунку 1.10 б.

Для отримання характеристики виду, що наведений на рисунку 1.10, із характеристики, що наведена на рисунку 1.9 необхідно виконати наступні дії:

- Зміщення характеристики вниз;
- Зміщення характеристики вліво.

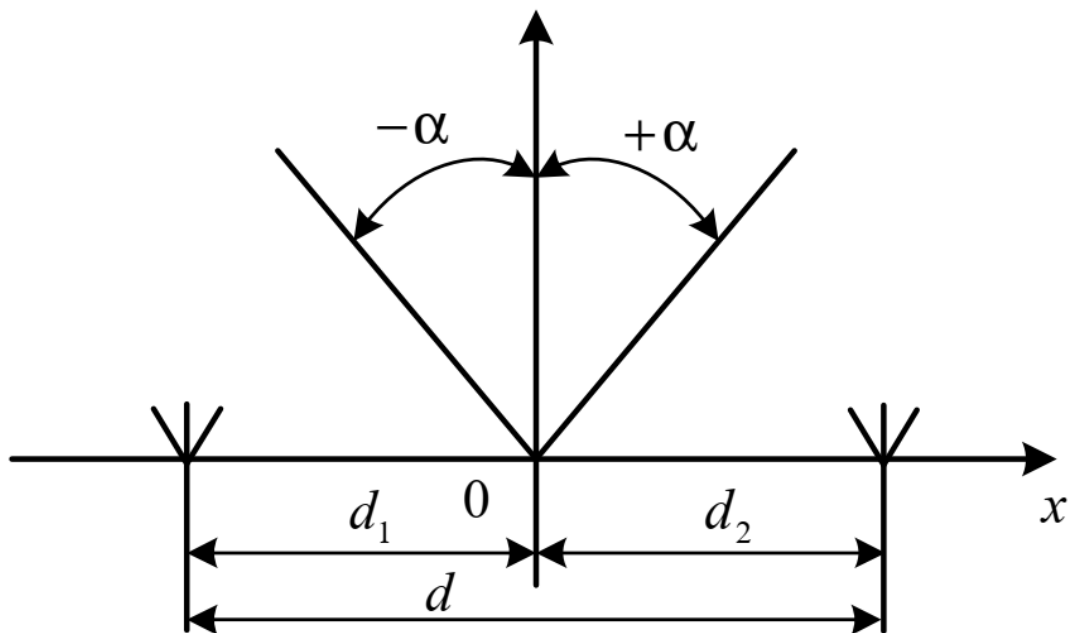
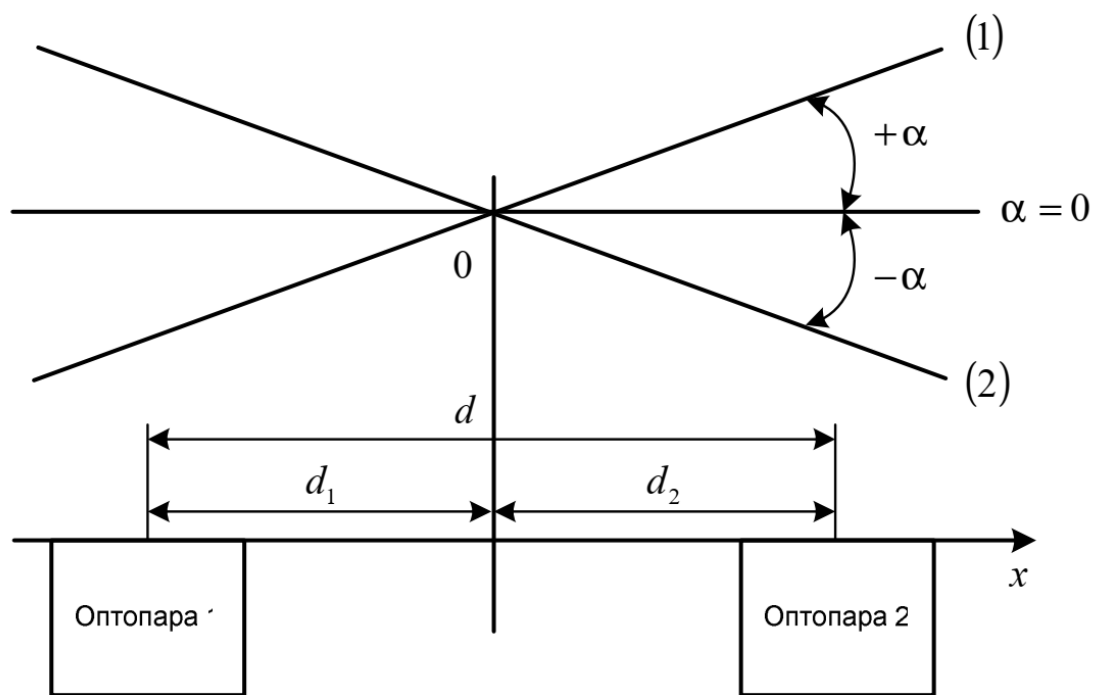
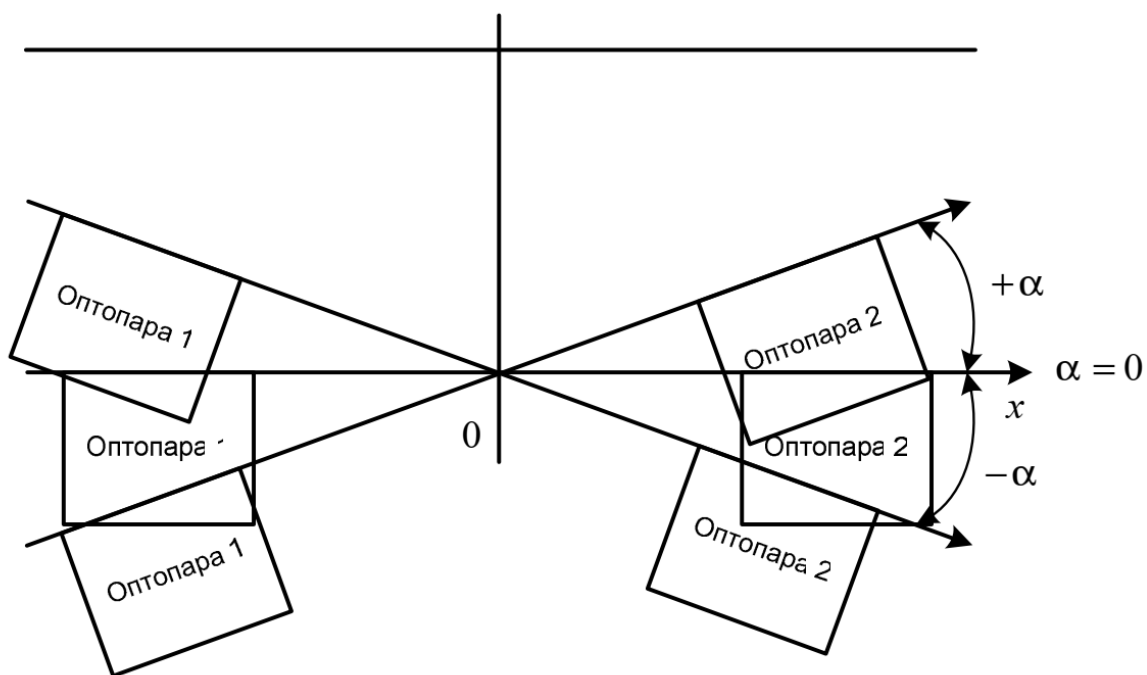


Рисунок 1.10 – Антенна система радіопеленгатора



а)



б)

Рисунок 1.11 – Принципи роботи кутоміра

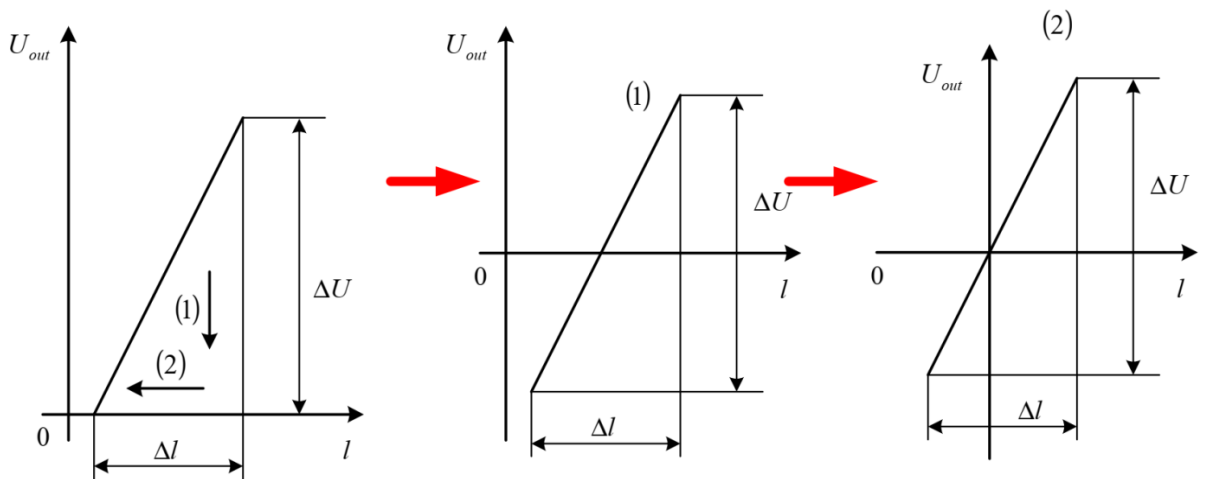


Рисунок 1.12 – Алгоритм перетворення характеристики кутоміра

Перша дія може бути виконана на основі виконання операції, що описується виразом:

$$U_{\Sigma}(l) = U_{out}(l) - U_{set}, \quad (1.2)$$

де $U_{out}(l)$ – напруга на виході оптичної пари;

U_{set} – напруга зміщення.

Рівняння виду (1.2) можливо спростити, якщо його перетворити до наступного виду:

$$U_{\Sigma}(l) = U_{out}(l) + (-U_{set}),$$

Замість операції віднімання буде виконуватись операція додавання, але напруга зміщення буде мати знак «мінус», як це показано на рисунку 1.13.

У випадку необхідності побудови пристрою вимрювання лінійного переміщення необхідно використовувати властивість зміщення нуля по вертикалі, тобто можливості зміни напруги у заданих границях. Для визначення напрямку переміщення можливо використати властивість зміни знаку вказаної вище напруги.

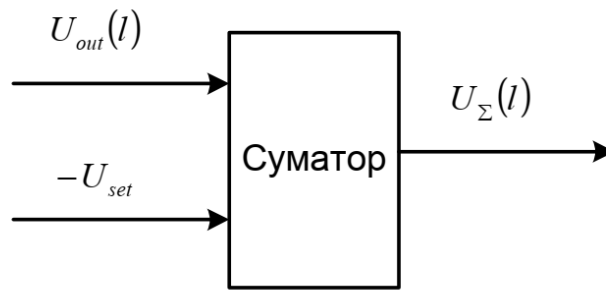


Рисунок 1.13 – Принцип першого етапу отримання потрібної характеристики перетворення

Також оптичний кутомір можливо використовувати у трубопроводах із гнучкими стінками з метою визначення тиску або його зміни. Збільшення чи зменшення тиску в трубопроводі призводить до зміни геометричних розмірів самого трубопроводу і, відповідно, до зміни відстані від трубопроводу до оптичної пари. Оптична пара відреагує зміною напруги на виході.

Максимальне та мінімальне значення кутів, що здатен вимірювати кутомір, визначається відстанями Δl , як це слідує із рисунка 1.14:

1. Максимальні значення відстані між точками О та розташуванням оптичної пари, які позначено $x_{\max}$, визначається Δl ;

2. Аналіз показує, що значення вихідної напруги оптичної пари $\Delta U^{(1)}(x)$ обумовлене координатами оптичної пари на осі x : $x_1 < x_2 \Rightarrow \Delta U^1(x_1) < \Delta U^1(x_2)$.

Із останнього виразу можливо зробити висновок про те, що розміщення оптичної пари в точці x_1 вона буде мати менший кут огляду ніж при розміщенні в точці x_2 .

В практичній реалізації другого етапу використовувався принцип роботи амплітудного пеленгатора в режимі знаходження різницевого сигналу. Це призвело до того, що пристрій містить два однакових канали, які працюють ідентично каналам першого етапу. Схема пристрою наведена на рисунку 1.15.

Сигнали, отримані в цих каналах подаються на диференційний підсилювач. Канали мають бути ідентичними по характеристикам та мають працювати в однакових кліматичних та інших умовах.

Сигнали із виходів суматорів описуються наступними рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} U_{\Sigma}^{(1)}(l) &= U_{out}^{(1)}(l) + (-U_{set}^{(1)}) \\ U_{\Sigma}^{(2)}(l) &= U_{out}^{(2)}(l) + (-U_{set}^{(2)}) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Наявність можливості подачі різних напруг зміщення $U_{set}^{(1)}, U_{set}^{(2)}$ дозволяє компенсувати не ідентичність характеристик каналів, оптичних пар та інших складових пристрою.

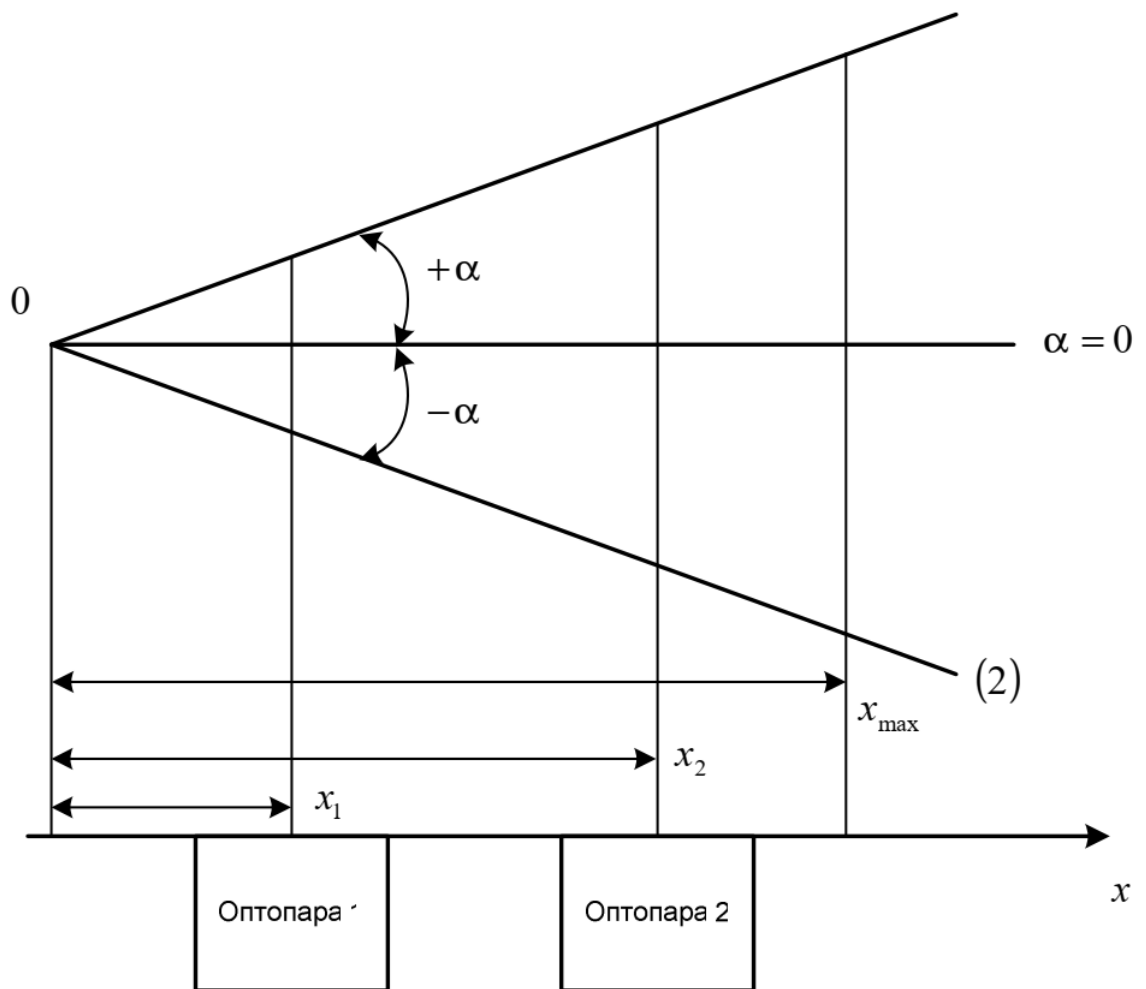


Рисунок 1.14 – Визначення мінімальних та максимальних значень кутів

Напруги, що описані в (1.3), подаються на вхід диференційного підсилювача. Вихідний сигнал цього підсилювача можливо описати виразом:

$$U_{out}(l) = U_{\Sigma}^{(1)}(l) - U_{\Sigma}^{(2)}(l), \quad (1.4)$$

Проведемо аналіз рівняння (1.4) для умови повороту поверхні, що контролюється та різних напрямків обертання.

Розглянемо варіант при якому оертання поверхні здійснюється проти годинникової стрілки, як це показано на рисунку 1.11, а. в цьому випадку дистанція від оптичної пари 1 до поверхні становиться меншою, тоді як до оптичної пари 2 – більшою. Враховуючи тей факт, що вісь обертання поверхні знаходиться між оптичними парами. То можливо вважати, що амплітуди з виходів оптичних пар матимуть однаковий модуль. Однак ці амплітуди будуть відрізнятися за знаком, як це показано на рисунку 1.16.

Таким чином враховуючи вираз (1.4), отримуємо:

$$U_{out}(l) = U_{\Sigma}^{(1)}(l) - U_{\Sigma}^{(2)}(l) = -U_1 - U_2 = [|U_1| = |U_2| = U] = -U - U = -2U, \quad (1.5)$$

У варіанті руху в протилежному напрямку, тобто за годинниковою стрілкою, як це показано на рисунку 1.17 відбувається збільшення відстані до оптичної пари 1, а до оптичної пари 2, відповідно, - зменшення.

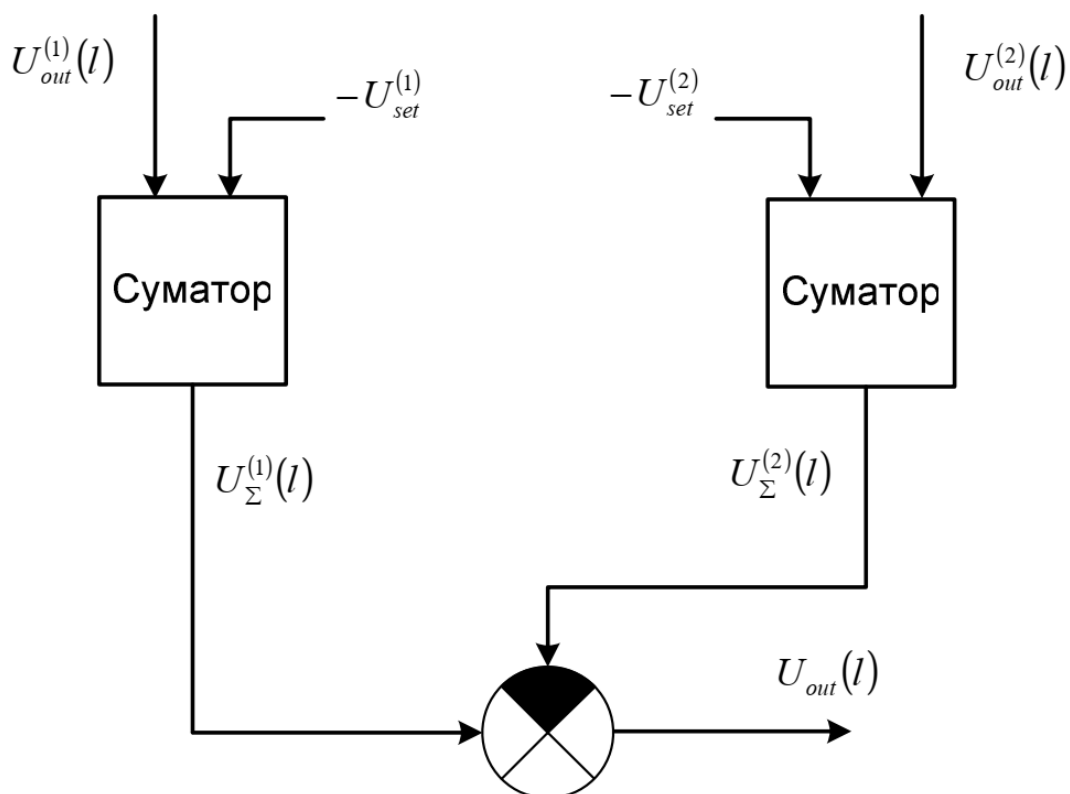


Рисунок 1.15 – Реалізація другого етапу отримання потрібної характеристики перетворення

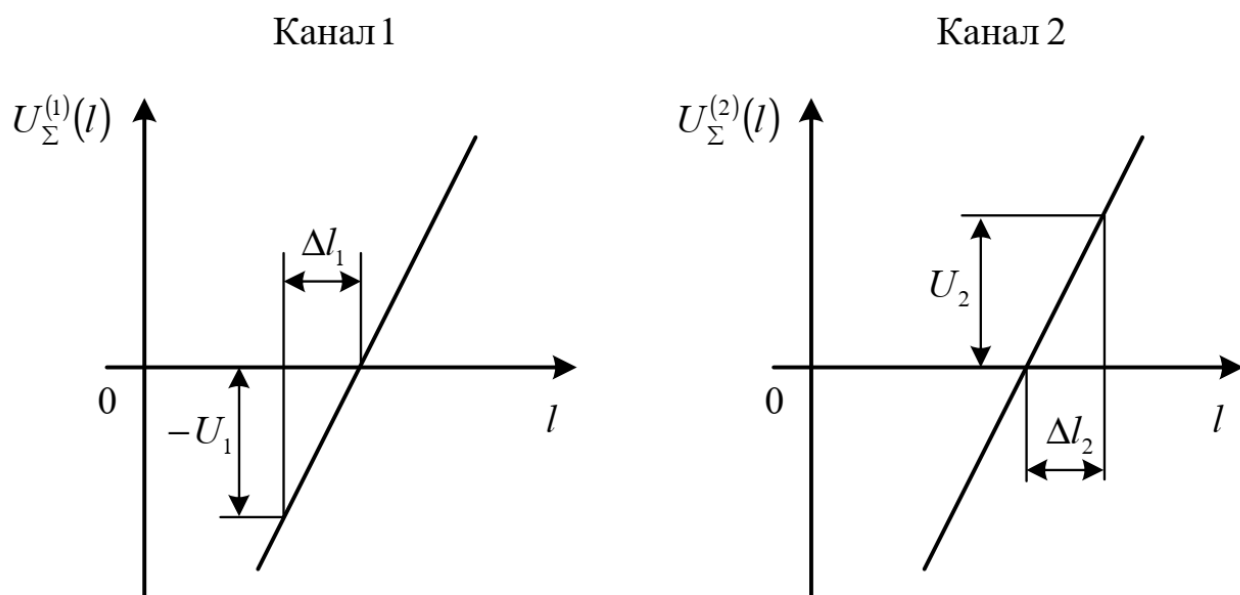


Рисунок 1.16 – Зміна вихідної напруги каналів

Аналогічно, враховуючи (1.4), можливо отримати:

$$U_{out}(l) = U_{\Sigma}^{(1)}(l) - U_{\Sigma}^{(2)}(l) = U_1 - (-U_2) = [|U_1| = |U_2| = U] = U + U = 2U. \quad (1.6)$$

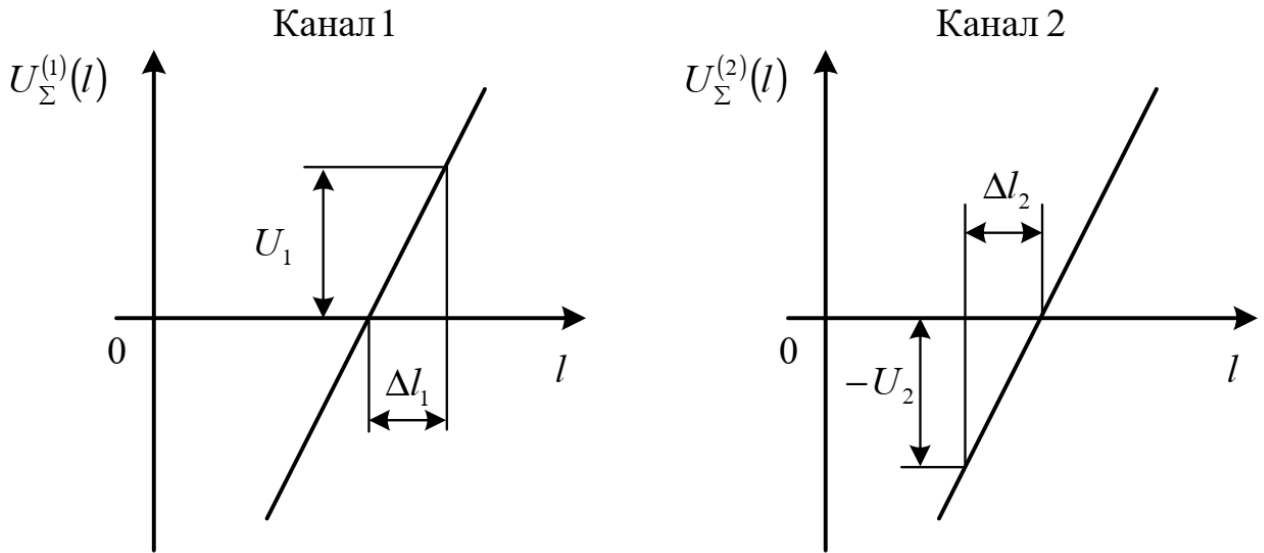


Рисунок 1.17 –Зміна вихідної напруги каналів

Проводячи порівняння рівнянь (1.5) та (1.6), можливо зробити висновок, про їх ідентичність і відміну, яка полягає у знаці. Для виконання такої умови необхідно, щоб виконувалась умова $d_1 = d_2 = 0,5d$. Ця умова може виконуватись лише в тому випадку коли обертання здійснюється через вісь, що проходить посередині між оптичними парами.

Відстань між передавальною частиною оптичної пари та приймальною називається база. Значення величини бази суттєво впливає на роботу кутоміра. Так при збільшенні бази відбувається збільшення величини амплітуди напруги на виході диференційного підсилювача, таді як зменшення – навпаки.

Характеристики, що наведена на рисунку 1.9 відображає роботу кутоміра, схема якого наведена на рисунку 1.8.

Збільшення або зменшення характеристики здійснюється а допомогою використання масштабного перетворювача. Результати роботи кутоміра показуються на індикаторному пристрої.

Із врахуванням всього наведеного вище структурна схема пристрою вимірювання кута, наведена на рисунку 1.19.

Масштабний перетворювач реалізований на підсилювачі з потрібною формою амплітудної характеристики.

В якості пристрою відображення можливе використання вольтметра або мілівольтметра.

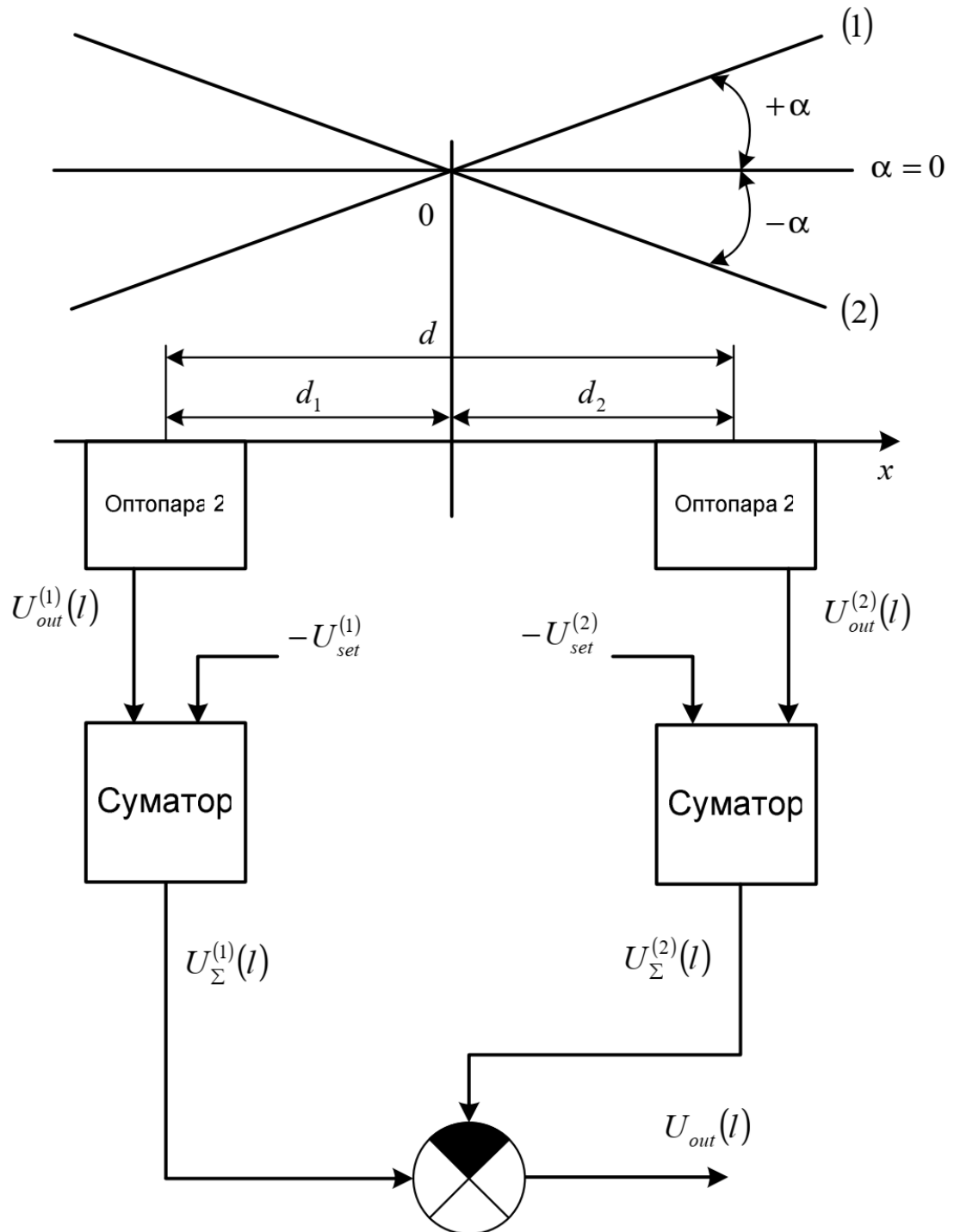


Рисунок 1.18 – Принцип формування характеристики перетворення кутоміра

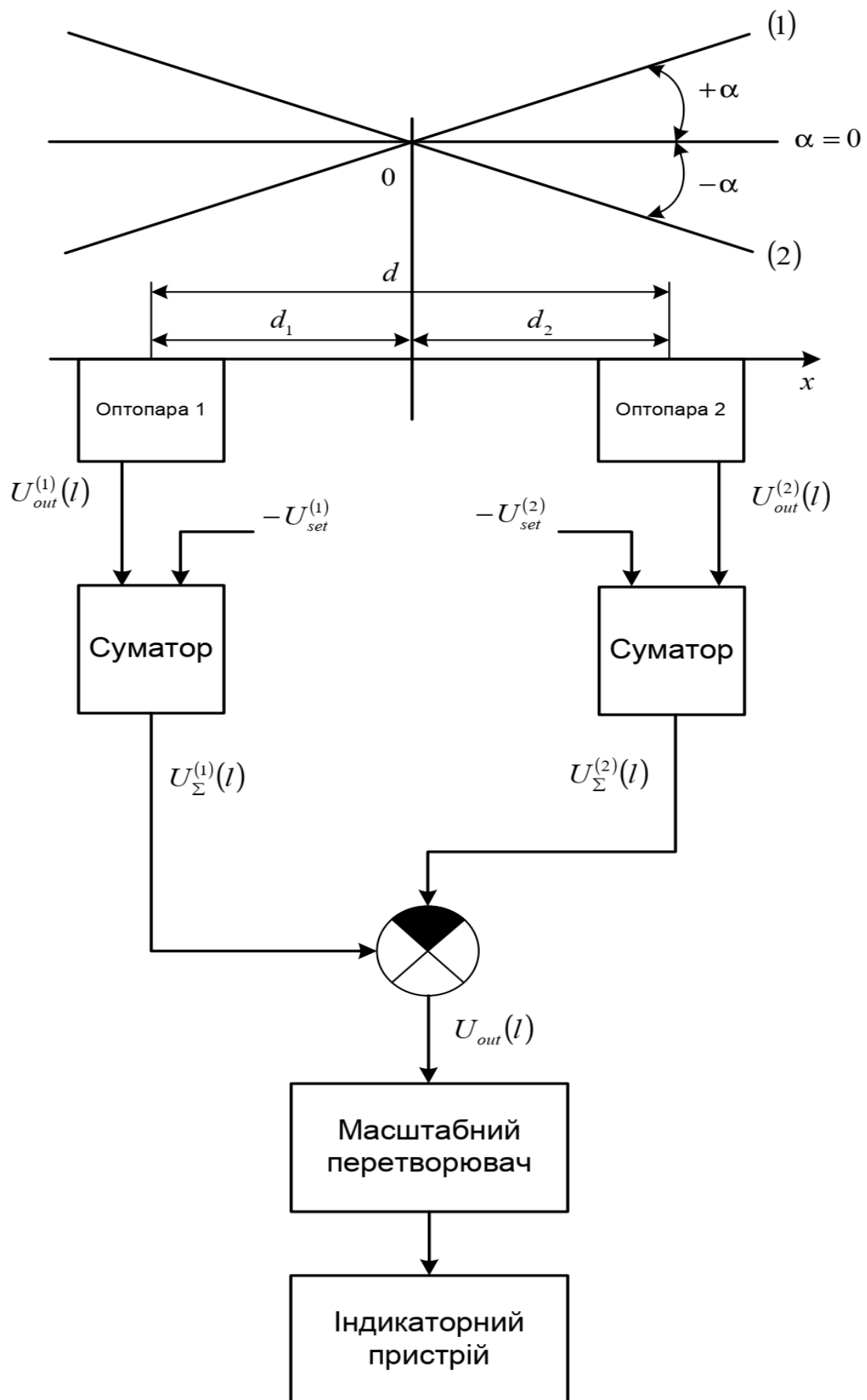


Рисунок 1.19 – Структурна схема кутоміра

Висновки до розділу: розділ містить опис принципів роботи та склад систем, що здатні величину кута обертання вала. Дослідження характеристик систем, наведених вище, показує, що існуючі системи мають великий недолік, який полягає в тому, що під час експлуатації відбувається забруднення складових, що призводить до похибок вимірювань та втрат часу на технічне обслуговування внаслідок необхідності очищення від бруду. Ці недоліки відсутні у випадку використання оптичної системи вимірювання кута.

Розділ 2

Теоретичні дослідження властивостей оптичного кутоміра

2.1 Розробка математичної моделі роботи оптичного кутоміра

Для того, щоб описати, як за допомогою лазерного випромінювання можливо виміряти кут повороту валу, навантаженому на кручення, важливо зрозуміти, як змінюються лінійні зміщення відбитого оптичного променя пропорційно кута обертання вала.

По-перше, механічна реакція вала на крутильне навантаження повинна бути пружною.

По-друге, необхідно отримати засоби, щоб змусити лазерне світло відстежувати кутові спотворення, викликані станом чистого зсуву. Досягнення цього процесу призведе до розробки емпіричного виразу, що пов'язує кут повороту вала зі зміщенням оптичного променя, що повертається. Передбачається, що зміщення оптичного променя буде лінійним для малих значень .

Крутильне навантаження суцільного кругового валу

В якості теоретичної основи використаємо співвідношення, описані Гіром і Тимошенко [13]. У наступному аналізі та всіх подальших експериментальних роботах буде вважатися, що всі зразки валу залишаться в межах своїх меж пружності під час та після зняття крутильних навантажень. Розглянемо суцільний круглий пружний вал на рисунку 2.1, який використовується для передачі крутного моменту T . Зокрема, представляє інтерес проаналізувати вплив пружного скручування, викликаного напруженнями зсуву між випробувальними площинами P_1 і P_2 . Нехай величина довжини вала між цими двома площинами дорівнює $x = 7,62$ см (3 дюйми). Цей додатковий сегмент був обраний, оскільки він є фактичною відкритою довжиною, що спостерігається в більшості систем. При розробці запропонованої оптичної системи будуть проаналізовані деформації скручування в цій області.

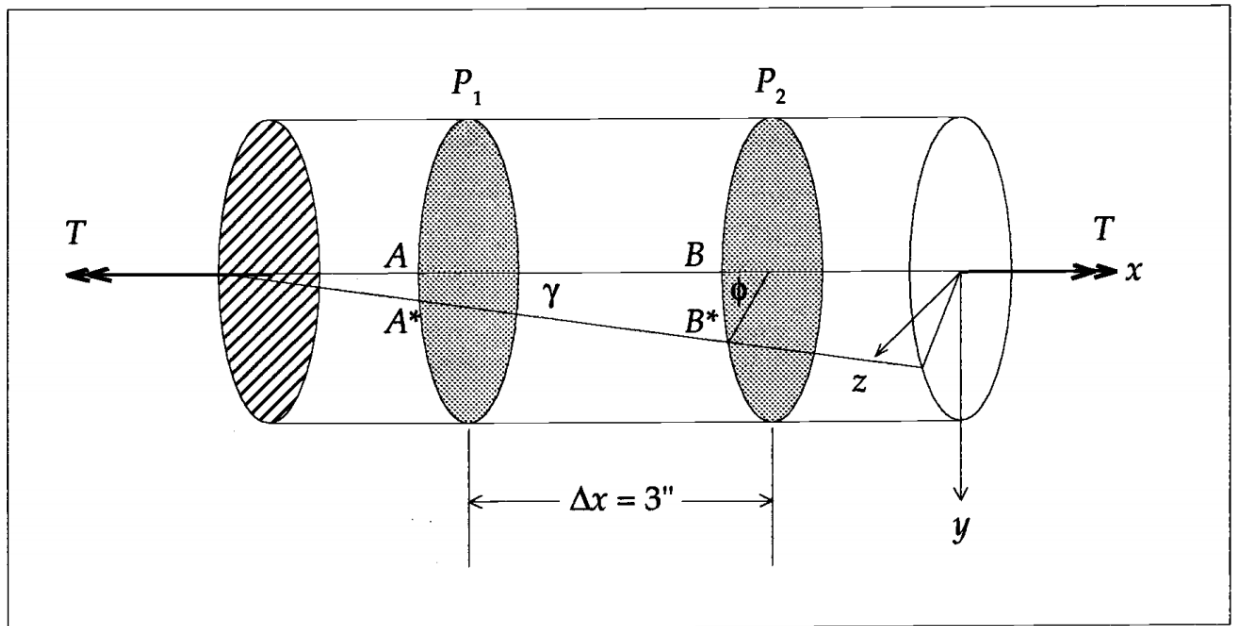


Рисунок 2.1- Крутильне навантаження суцільного круглого пружного валу та пружна реакція.

Припускаючи, що вал на рисунку 2.1 піддається чистому зсуву і що реакція матеріалу відповідає закону Гука, деформацію зсуву у можна розрахувати за аналітичним виразом:

$$\gamma = \frac{Tr}{Gj}, \quad (2.1)$$

де T – прикладений крутний момент, який створює стан чистого зсуву,

I – полярний момент інерції,

r – радіус вала,

G – модуль зсуву.

Оскільки модуль Юнга E і коефіцієнт Пуассона ν відомі, G можна обчислити за виразом:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (2.2)$$

Кут повороту в сегменті P_1P_2 визначається:

$$\phi = \frac{T\Delta x}{Gj}, \quad (2.3)$$

де ϕ - кут повороту між площинами P1 і P2.

Оптичний підхід до вимірювання

Той факт, що лазерний промінь повинен слідувати за змінами кута повороту вала, навантаженого на кручення, створив стимул для того, щоб джерело світла, що падає на площину P1, відбивало цей промінь у площину P2. Це повинно бути виконано таким чином, щоб проміжний відбитий оптичний промінь міг стежити за кутом зсуву сегмента Δx , оскільки виникає спотворення через скручування.

Кінцевою метою є використання кінцевого відбитого оптичного променя як носія інформації. Щоб змусити світло, створене лазером, вимірювати зміни кута повороту між площинами P1 і P2, спочатку необхідно отримати засоби для спрямування джерела світла, що падає на площину P1, на площину P2 у повторюваному та передбачуваному режимі.

Розглянемо вектор k , який позначає напрямок поширення лазерного променя. Дозволяючи цьому вектору перебувати в площині x-z валу вздовж негативної осі z (рисунок 2.1), можна записати:

$$k_1 = k e_z \cos \psi, \quad (2.4)$$

яка є рівнянням для вектора поширення хвилі k_1 , що знаходиться в площині x-z під кутом ψ з додатною віссю x.

Якщо промінь, що падає, спрямований на дзеркало в площині P₁, то k_1 буде відбиватися під кутом, що визначається кутовим положенням дзеркала відносно оптичного променя, що виступає. Рисунок 2.1 ілюструє відбиття падаючого променя дзеркалом M₁ з нормаллю поверхні n , орієнтованою під кутом $\psi = 45^\circ$ щодо осі x валу. Таким чином, результуючий відбитий

оптичний промінь може бути характеризується проміжним хвильовим вектором k_r під кутом 90° з k_1 .

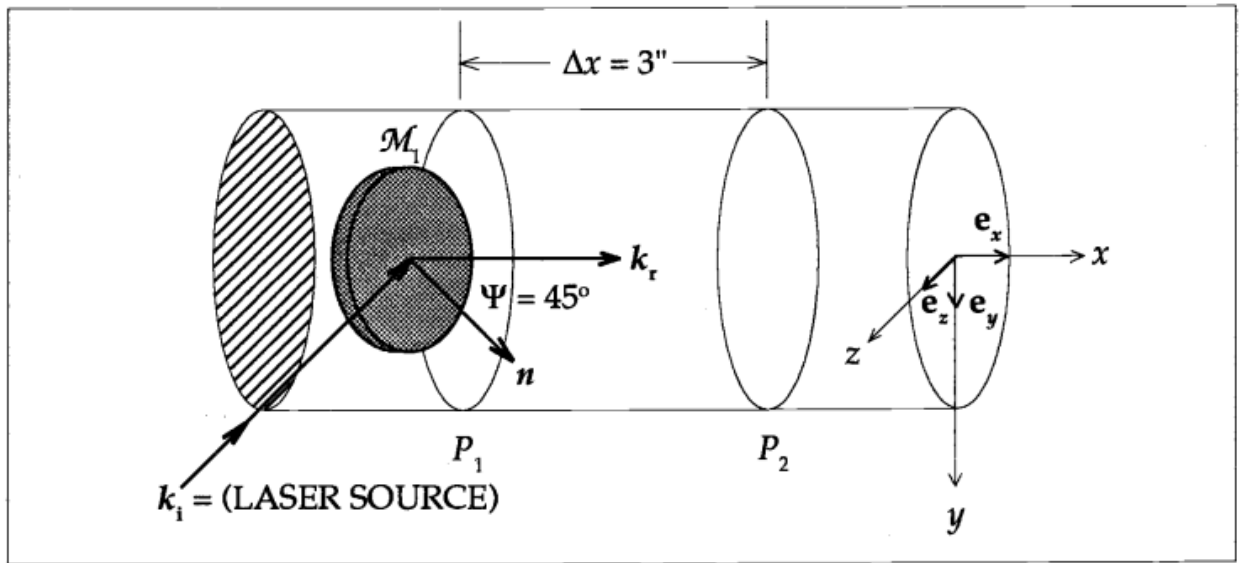


Рисунок 2.2 - Створення проміжного відбитого оптичного променя за допомогою дзеркала M_1

Вектор відбитого оптичного променя k_r перебуватиме в площині x - z вздовж додатної осі x (у напрямку до площини P_2). Тоді:

$$k_r = k e_x \sin \psi, \quad (2.5)$$

Тому друге дзеркало M_2 , розташоване в точці B на поверхні вала (рисунок 2.1), можна використовувати для відбиття k_r під кутом 90° у позитивному z -напрямку. Останній процес генерує остаточний відбитий оптичний промінь, величина і напрямок якого описується вектором k_f . Цей ефект проілюстровано на рисунку 2.2.

Після застосування крутного моменту M_2 обов'язково слідуватиме за точками $B - B^*$ через кут ϕ (тобто кут відбиття M_2 зміниться прямо пропорційно куту повороту ϕ , як його бачить вектор k_r). У точці B^* вектор k_f зміниться у напрямку, але не за величиною (тобто E залишається незмінною).

Цей новий вектор, що представляє деформований стан валу, буде позначено k_f^* .

На рисунку 2.2 показано, що кут між k_f і k_f^* дорівнює ϕ . Зверніть увагу на ілюстрацію, що дзеркало в точці А не змістилося. Насправді це не так; лише деформація в точці В була перебільшена, щоб проілюструвати, що зміни в лазерному світлі будуть відбиватися під кутом ϕ .

Інтенсивність кінцевого відбитого оптичного променя можна виразити як:

$$I_{reflect} = I^* \cos^2(\psi + \Delta\phi), \quad (2.6)$$

де I^* — максимальна відбита інтенсивність, коли $\psi = 90^\circ$ (тобто векторна нормаль n колінеарна до k_1).

Протягом цієї роботи ψ завжди дорівнюватиме 45° щодо будь-якого променя, щоб отримати ефект, показаний на малюнку 2.2. Змінна $\Delta\phi$ — радіальна дуга, викреслена ϕ з точки В у В*; довжина цієї дуги буде обмежена розмірами фотосенсора.

Для всіх практичних цілей буде вважатися, що ця довжина дуги досить мала, щоб її апроксимувати лінійним зміщенням, Δs . Точне значення Δs можна визначити за допомогою:

$$\Delta s = \int [1 + \phi'(x)]^{1/2} dx. \quad (2.7)$$

Інтеграл у (2.7) можна використати для обчислення довжини дуги шляху Δs , простеженого за кутом повороту, відображеного кінцевим оптичним променем, де $\phi'(x)$ являє собою першу похідну від $\phi(x)$. Отже, енергія оптичного випромінювання, що поглинається датчиком, буде змінити відповідно до $E = E(\Delta s)$.

Інтеграл у (2.7) аналітично не розв'язується. Замість цього Δs буде прирівнюватися до емпіричної функції, яка пов'язує лінійне зміщення

кінцевого відбитого оптичного променя як функцію кута обертання вала. Це числове наближення буде отримано з експериментальних даних.

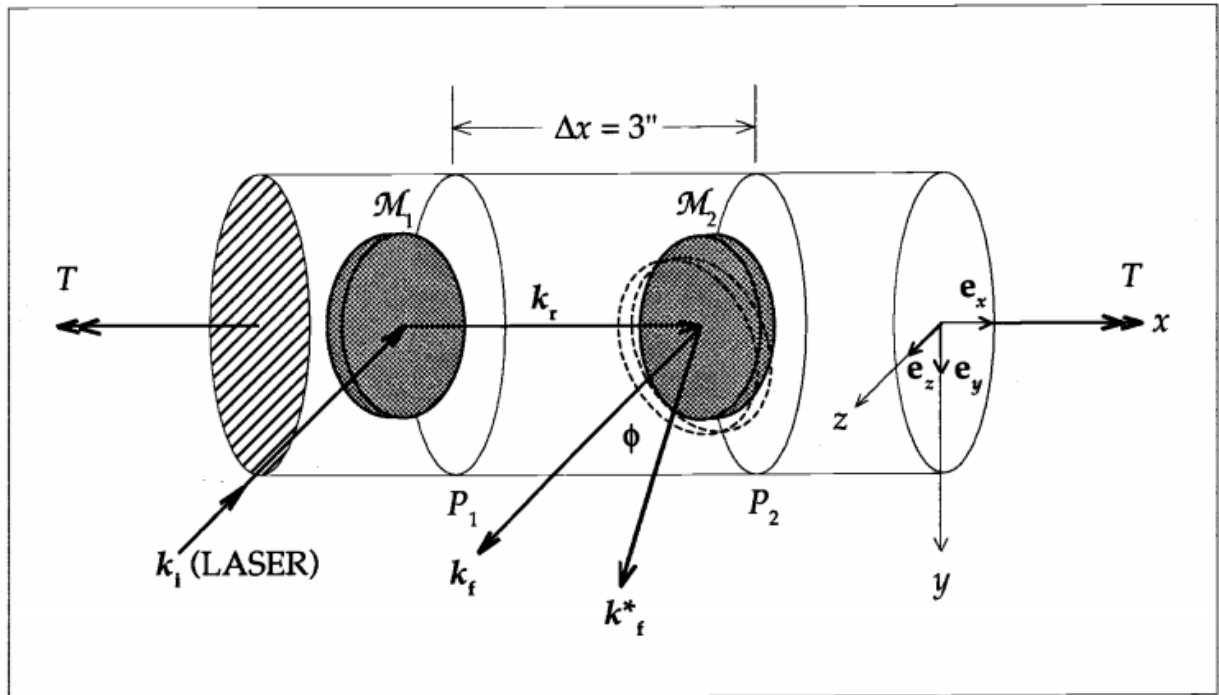


Рисунок 2.3 - Ілюстрація кінцевого відбитого оптичного променя, що лінійно зміщується Δs

Основна вимога до схеми фотодетектора полягає в тому, що вона повинна мати вихідну характеристику, яка змінюється за напругою в залежності від інтенсивності прийнятого лазерного випромінювання.

Лазерне випромінювання, яке міститься в кінцевому відбитому оптичному промені k_f^* , як показано на рисунку 2.3. Інтенсивність відбитого лазерного світла в будь-який момент часу може бути виражена як поверхнева густина освітлення, що поглинається фотопровідниковою коміркою. Оскільки зміни опору фотопровідного пристрою ґрунтуються на кількості оптичного випромінювання, що потрапляє на комірку, то цей тип елемента буде включено в конструкцію схеми. Стосовно співвідношення між опором R для власного напівпровідникового пристрою (тобто фоторезистора) та енергією оптичного випромінювання R_λ , що потрапляє на його активну поверхню, лінеаризована модель описує:

$$R_{\lambda} = R_0 E_{\lambda}^N. \quad (2.8)$$

де R_0 – опір фотопровідної комірки, коли E дорівнює 1 Вт·с.

Верхній індекс N є безрозмірним числом, яке представляє нахил прямої лінії на графіку залежності опору логарифма від щільності потоку; числове значення N можна обчислити за допомогою рівняння:

$$N = \frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right)}. \quad (2.9)$$

і де R_1 R_2 – значення опору фотопровідника, що виникають внаслідок енергій падаючого випромінювання E_1 і E_2 відповідно.

Промінь, що потрапляє на активну поверхню фотопровідника в положенні s_1 , буде означати, що комірка поглинає енергію випромінювання E_1 . Коли цей промінь відхиляється в положення 2 на активній поверхні, енергія буде E_2 , де $E_2 < E_1$. Жодна зі змінних, виражених у рівняннях (2.8) або (2.9), фактично не буде розрахована; але знання того, як застосувати рівняння (2.8) у розробці схеми, яка може перетворити зміну опору на зміну струму, є важливим. Усвідомлюючи надзвичайну чутливість фотопровідника CdS до довжин хвиль HeNe-лазеру (тобто $\lambda_{\text{HeNe}} = 632,8$ нм), буде використовуватися пристрій зі схемою фотодетекторного підсилення.

Якщо фоторезистивна реакція пристрою CdS повинна бути доповнена ланцюгом генерування напруги, то вихідна напруга відповідної конфігурації має ефективно реагувати на зміни кількості оптичного випромінювання, отриманого осередком CdS. Крім того, вирішальними є вихідна чутливість і величина реакції напруги. Розуміючи, що операційний підсилювач може забезпечити великий рівень підсилення напруги при правильному виборі вхідних резистивних петель, цей пристрій здатен задовольнити необхідні вимоги.

Розглянемо диференціальний підсилювач на основі операційного підсилювача 741, показаний на рисунку 2.4. Ця схема містить фоточутливий елемент на основі CdS як резистор зворотного зв'язку в неінвертуючому ланцюзі. Цей операційний підсилювач генеруватиме вихідну напругу, пропорційну диференціалу вхідного струму (Δi), щоб отримати вихідну напругу, яка пов'язана з освітленням.

Залежно від кількості лазерного світла, що падає на фотоелемент CdS, може виникнути велика невідповідність між посиленнями; оскільки незначні зміни падіння оптичного випромінювання можуть спричинити значні зміни резистивних значень фотоеlementу CdS, цей ефект невідповідності посилення посилення буде значно посилено. Для інвертуючого входу (-) посилення величина R_2/R_1 , тоді як посилення неінвертуючого входу (+) дає $1 + (R_2/R_3)$. У будь-якому випадку, резистори зворотного зв'язку R_2 і R_{are} .

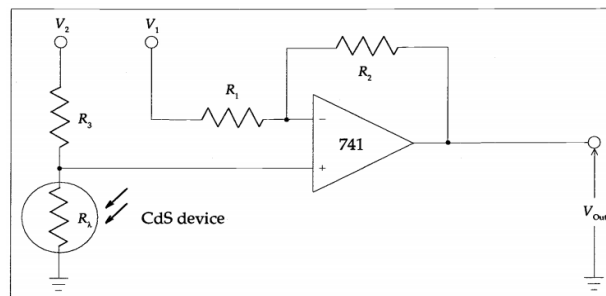


Рисунок 2.4 Диференціальний підсилювач з фотоеlementом CdS як резистором позитивного зворотного зв'язку

Вихідна напруга схеми операційного підсилювача, показаної на рисунку 2.1, виражається рівнянням:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_\lambda}{R_3 + R_\lambda} V_2. \quad (2.10)$$

де V_1 і V_2 - напруги зміщення до петлі інвертуючого та неінвертуючого резистора відповідно. Підставляючи рівняння (2.8) в (2.10), отримуємо:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_0 E^N}{R_3 + R_0 E^N} V_2 . \quad (2.11)$$

Аналіз виразу (2.11) дозволяє зробити наступні висновки:

- Напруга на виході підсилювача буде зростати зі зменшенням вхідного освітлення.
- Чутливість вихідної характеристики можна регулювати, змінюючи значення R_2 (тобто це вплине на посилення).
- Чутливість вихідної напруги до змін вхідного струму через неінвертуючий термінал дуже висока; це означає, що невеликі варіації R_λ сильно впливатимуть на величину V_{out} .

Аналіз рисунків 2.1 та 2.3 показує, що, стан нульового вхідного крутного моменту на вал означатиме, що кінцевий оптичний промінь, відбитий М, буде містити максимальну кількість енергії лазерного випромінювання, яку виявляє пристрій CdS.

У цьому випадку енергія, що поглинається детектором, буде представлена як E_1 , а схема на рисунку 2.4 буде відкалібрована таким чином, що $V = 0$ вольт.

У випадку коли вал зазнає крутильного навантаження, зміни кута повороту будуть зміщувати вектор k_f до тих пір, поки останній приріст світла не залишить фотопровідну поверхню R. У цей момент кількість енергії лазерного випромінювання, що поглинається пристроєм CdS, буде дорівнює мінімум, і представлений тут у вигляді $E_2 = 0$ Вт.

З рівняння (2.11) стан $E_2 = 0$ Вт означає, що

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_1 \quad \text{або} \quad V_{Max}.$$

Рисунок 2.5 ілюструє, як зміни кута закручування валу спричинять цю реакцію в схемі CdS/підсилювача. Важливо відзначити, що енергія променя

E не змінюється при скручуванні вала; символи E_1 і E_2 представляють два стани енергії, що поглинається осередком CdS.

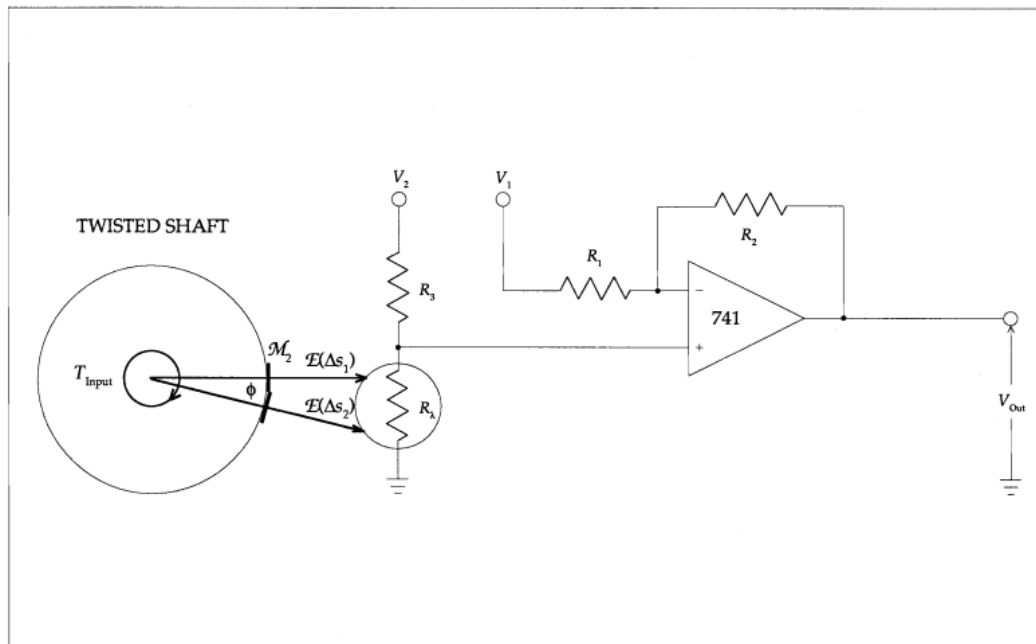


Рисунок 2.5 - Вихідна напруга підсилювача як функція оптичної енергії, що поглинається елементом CdS.

Висновки по розділу: Вирішено задачу створення та ефективної передачі відбитого оптичного променя, що виявляється фотопровідником. Залишається остаточне завдання: синтезувати схему, здатну давати вихідну реакцію, яка змінюється за напругою як функцію падіння отриманого оптичного випромінювання, так що $V_{out} = V_{out}(E)$. Враховуючи, що $E = E(\Delta s)$, відразу видно, що реакція напруги кола зміниться як функція зміщення променя Δs .

Розділ 3

Дослідження параметрів оптичного кутоміра

Особливістю будови оптичного кутоміра, є наявність механічних, оптичних та електронних компонентів, взаємодія яких дозволяє виконати поставлену задачу.

Для ефективної реалізації системи, представленої на рисунку 2.5 та забезпечення відтворюваності експериментальних результатів були застосовані наступні стратегії:

- Деформації скручування кожного зразка були обмежені лінійно-пружною областю матеріалу.
- Для перетворення нерівностей остаточного відбитого оптичного променя в одновимірне лінійне зображення використовувалася система лінз.
- Відкрита активна поверхня датчика CdS була сконфігурована у вигляді рівностороннього трикутника; ширина променя зображення лінії, що наштотується, була збільшена до ширини щонайменше в 1,5 рази більше, ніж ширина трикутної основи.

За допомогою виконання пунктів, наведених вище, була реалізована лінійна реакція підсилювача на кут повороту вала. Було перевірено, що, оскільки R_λ постійно поглинає меншу кількість енергії лазерного випромінювання, що міститься в лінійному зображенні, утворюється лінійна тенденція напруги в схемі підсилювача. Пристрій CdS, реалізований як R_λ , має діапазон опорів цього приладу характеризується $250 \text{ Ом} < R_\lambda < 12 \text{ кОм}$, обмеженими $100 < I < 0,1 \text{ Кд}$.

Потужність лазера складає 1 мВт. Оптичний промінь, що повертається дзеркалом M_2 , відбивається паралельно лазерному джерелу. Відстань між паралельними променями становила $\Delta x = 3$ дюйми (тобто відстань між тестовими площинами P_1 і P_2). Цей ефект був викликаний тим, щоб гарантувати, що остаточний відбитий оптичний промінь слідує за кутом

повороту валу пропорційно. Незалежно від діаметра вала, відстань від отвору лазера до 432 мм (приблизно 17 дюймів).

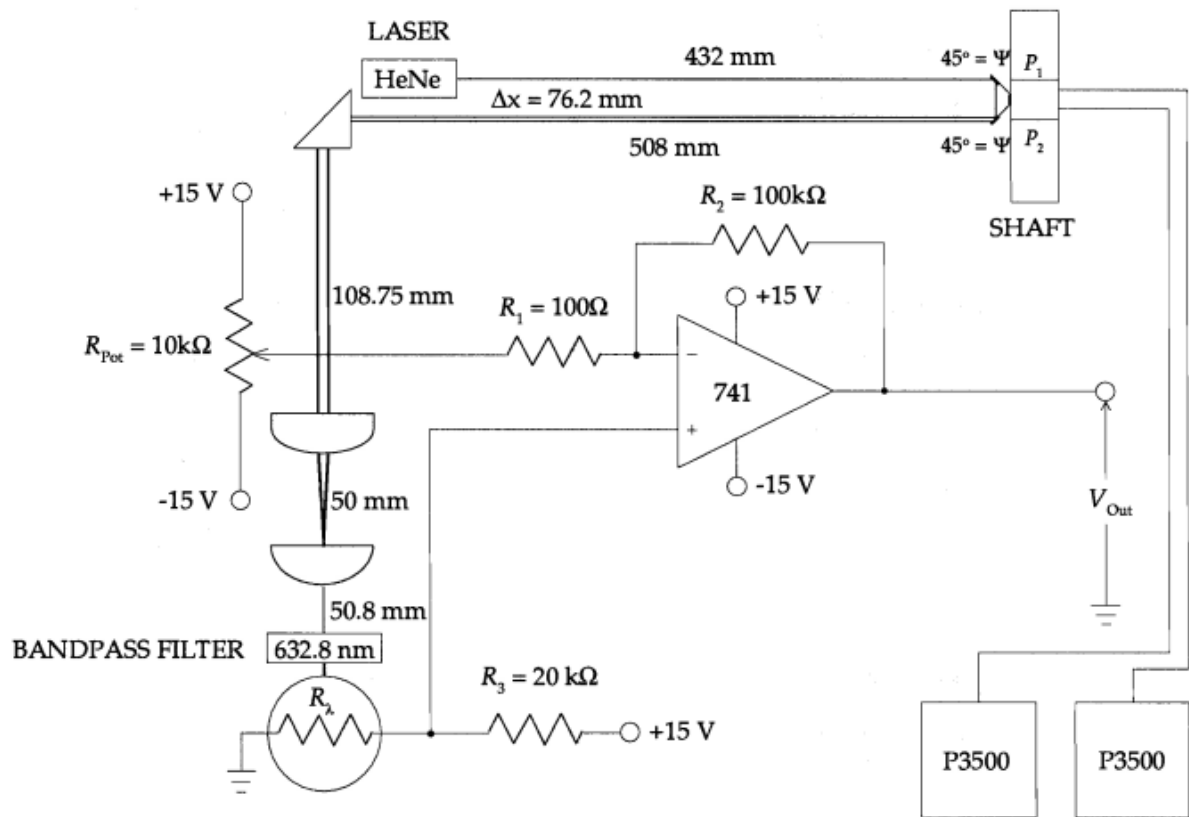


Рисунок 3.1 - Схема проведення дослідів

Схема проведення дослідів наведена на рисунку 3.1.

Проведення дослідження було здійснено наступним чином: оптична частина була змодельована в пакеті прикладних програм 3DOptix, а роботу електронної частини в Multisim.

Модель електричної частини наведена на рисунку 3.2

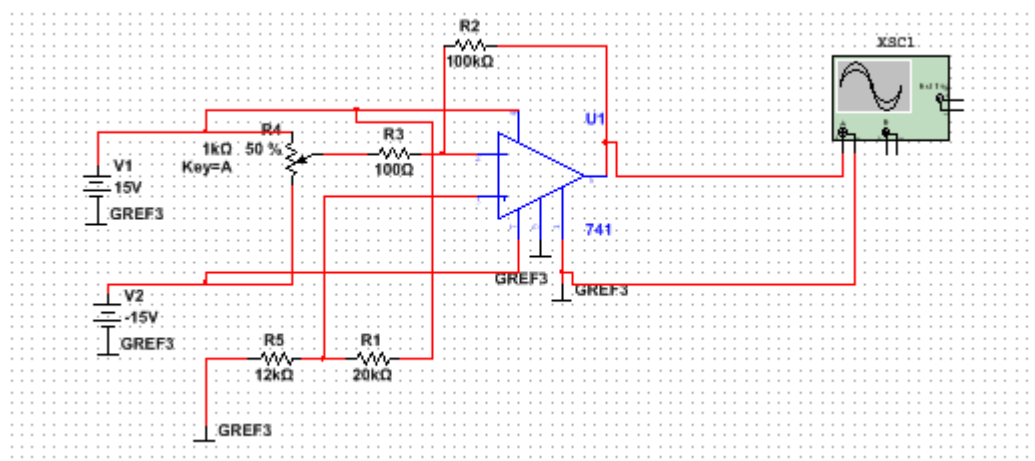


Рисунок 3.2 – Модель електричної частини оптичного кутоміра

Модель оптичної частини наведена на рисунку 3.3.

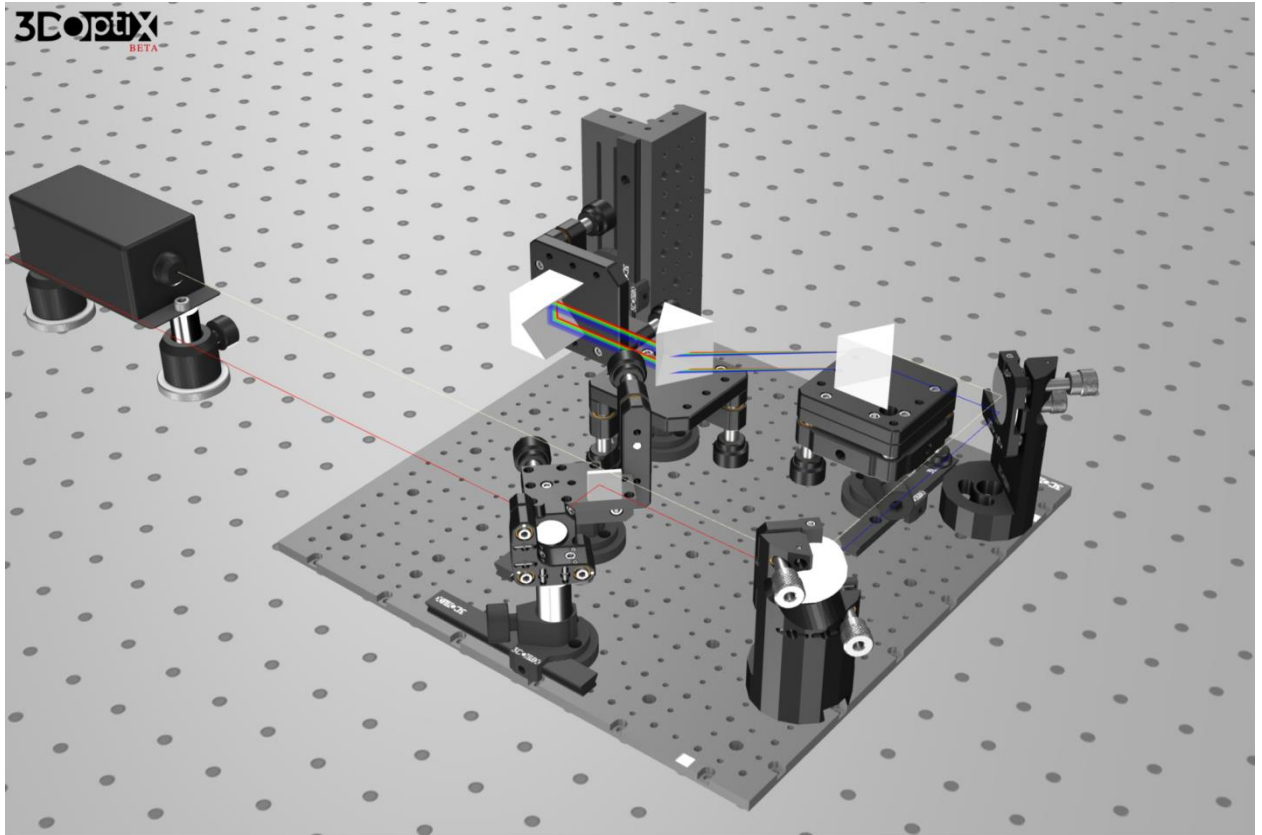


Рисунок 3.3 – Модель оптичної частини кутоміра

В моделі використана прямокутна призма $312,5 \text{ мм}^2$ ($0,484 \text{ дюйма}^2$) для відбиття оптичного променя під кутом 90° вниз. Відстань від M_2 до прямокутної призми постійно підтримувалася на рівні 508 мм (20 дюймів), щоб компенсувати різні радіуси кожного валу. Висоту від дна призми до горизонтальної поверхні постійно тримали на рівні 210 мм ($8,250 \text{ дюймів}$).

У всіх випадках оптичний промінь, відбитий M_2 , не мав ідеально симетричної форми і не мав рівномірного розподілу інтенсивності. Ці нерівності були зведені до мінімуму, використовуючи розташування лінз, як показано на рисунку 3.1. Для ущільнення променя використовувався об'єктив РСХ діаметром 25 мм і фокусною відстанню 50 мм . Циліндрична лінза з фокусною відстанню 50 мм перетворила конденсований промінь у майже однорідну та інтенсивну еліптичну лінію. У всіх трьох випадках

витагнута велика вісь зображення з еліптичною лінією стабільно підтримувалася на рівні 16,7 мм (0,656 дюйма).

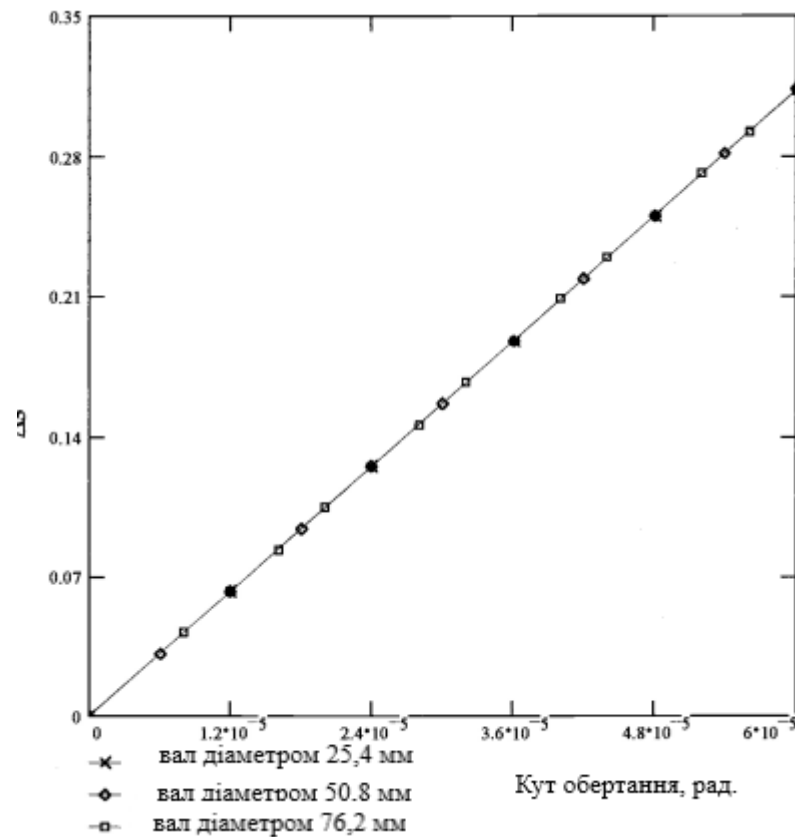


Рисунок 3.3 - Лінеаризовані зміщення оптичного променя (ΔS) як функція ϕ .

При виконанні вимірювань зміщення оптичного променя було виявлено, що для кожного значення $\phi = 6,0 \cdot (10^{-6})$ радіан отримано зміщення променя приблизно 0,8128 мм (0,032 дюйма). Це було справедливим для всіх трьох валів.

Отже, криві на рисунку 3.3 ілюструють прийнятну ідеалізацію цих висновків. Основною метою цього тесту було зміцнити впевненість у тому, що лінійність $\Delta s()$ викличе лінійну реакцію в підсилювачі.

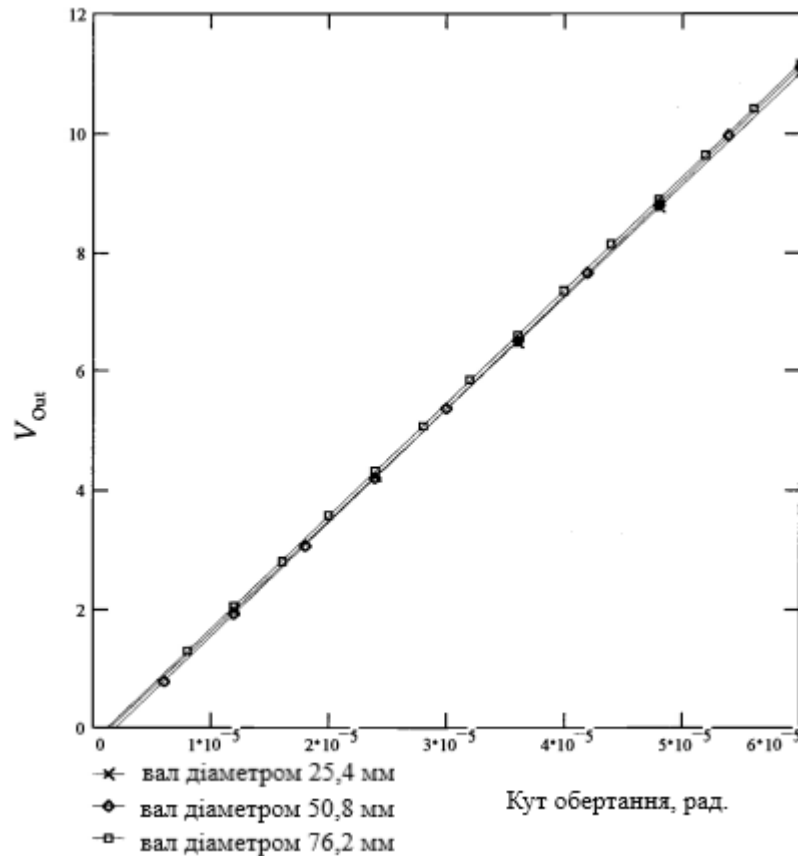


Рисунок 3.4 - Реакція підсилювача (V_{out}) як функція ϕ

Обмеження ϕ $6,0 (10^{-6})$ радіан призвело до лінійного набору зміщень, обмежених ϕ Δs 0,313 дюйма; межі останньої нерівності були визначені попередньо експериментально, оскільки 0,313 дюйма було максимальною межею, яку міг змістити промінь перед тим, як залишити поверхню датчика.

У всіх трьох випадках лінійність $\Delta s()$ служить для підтвердження лінійної реакції напруги підсилювача на зміщення у відбитому оптичному промені (як показано на рисунках 3.4 і 3.5).

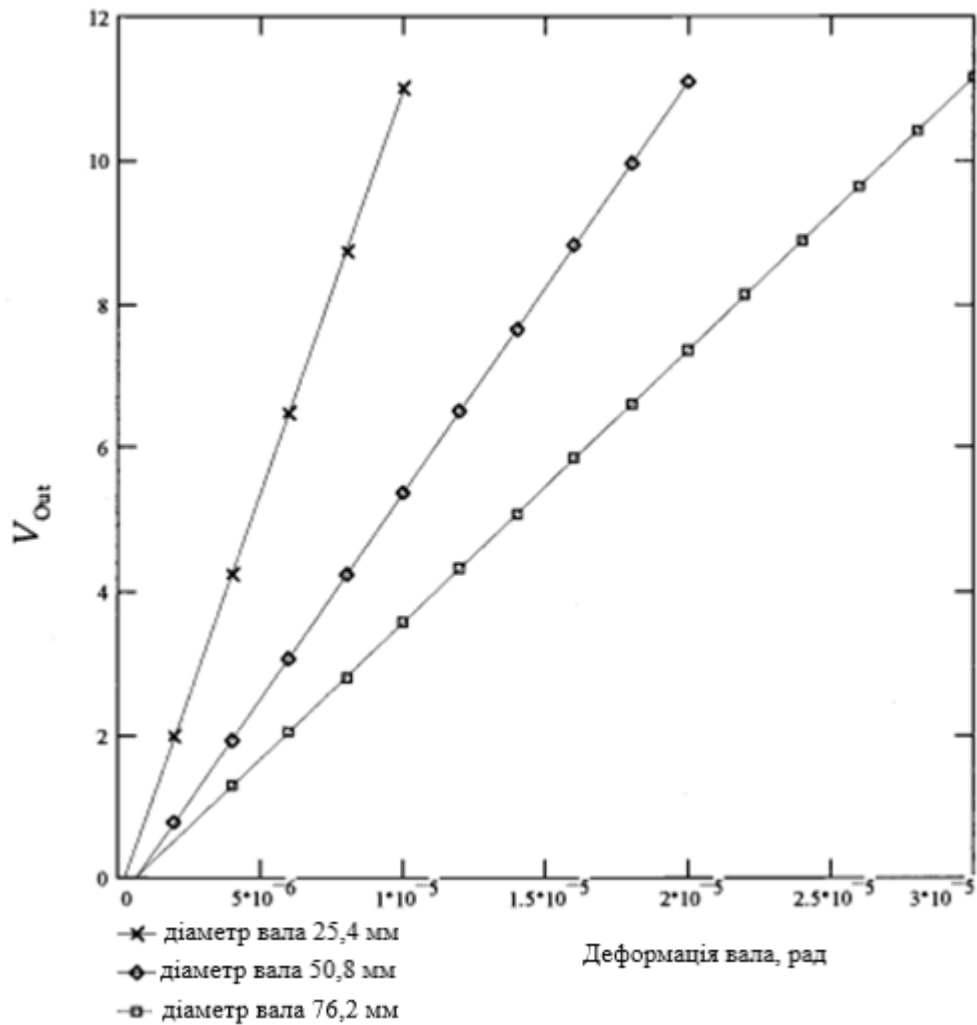


Рисунок 3.5 - Лінеаризована характеристика підсилювача (V_{out}) як функція γ

Функція $\Delta s(\phi)$ була застосована як чисельний розв'язок інтеграла рівняння (2.8). Для сталевих валів діаметром в один, два та три дюйми отримані числові наближення дають відповідно:

$$\Delta s_1(\phi_1) \approx 5,45 \cdot 10^3 \cdot \phi_1 - 0,004$$

$$\Delta s_2(\phi_2) \approx 5,417 \cdot 10^3 \cdot \phi_2 - 0,003$$

$$\Delta s_3(\phi_3) \approx 5,426 \cdot 10^3 \cdot \phi_3 - 0,004$$

Рівняння, наведені вище, підтверджують існування лінійної залежності між зміщеннями оптичного променя та кутом обертання вала. Хоча ці

рівняння можна використовувати для обчислення ϕ , головна ідея полягала в тому, щоб підтвердити лінійність між обертальними переміщеннями валу та реакцією напруги підсилювача.

Було виявлено, що вихідна напруга підсилювача змінюється лінійно пропорційно куту обертання вала (тобто через лінійні зміщення відбитого оптичного променя). В якості початкової стандартизації необхідно було співвіднести вимірювання деформації та напруги. Для випробуваних валів діаметром один, два та три дюйми відповідно були реалізовані такі нерівності, що відносять γ до V_{out} :

$$0 \leq \gamma \leq 10 \cdot 10^{-6} \text{ при } 0 \leq V_{out} \leq 11,2$$

$$0 \leq \gamma \leq 20 \cdot 10^{-6} \text{ при } 0 \leq V_{out} \leq 11,2$$

$$0 \leq \gamma \leq 30 \cdot 10^{-6} \text{ при } 0 \leq V_{out} \leq 11,2$$

У кожному випадку γ використовувався для розрахунку вхідного крутного моменту на вал за допомогою рівняння (2.2); Рівняння (2.4) потім було використано для обчислення ϕ . За допомогою аналізу лінійної регресії було створено емпіричні рівняння, що пов'язують характеристику напруги підсилювача як функцію від ϕ . Для валів одного, двох і трьох дюймів відповідні вирази:

$$V_{out}(\phi_1) = 1,879 \cdot 10^5 \cdot \phi_1 - 0,274$$

$$V_{out}(\phi_2) = 1,912 \cdot 10^5 \cdot \phi_2 - 0,374$$

$$V_{out}(\phi_3) = 1,9 \cdot 10^5 \cdot \phi_3 - 0,24$$

розв'язуючи для ϕ_1 , ϕ_2 і ϕ_3 дає:

$$\phi_1(V_{out}) = 5,322 \cdot 10^{-6} \cdot V_{out} + 1,457 \cdot 10^{-6}$$

$$\phi_2(V_{out}) = 5,229 \cdot 10^{-6} \cdot V_{out} + 1,953 \cdot 10^{-6}$$

$$\phi_3(V_{out}) = 5,264 \cdot 10^{-6} \cdot V_{out} + 1,262 \cdot 10^{-6}$$

Підставляючи рівняння, що приведено вище у вираз (2.4) і розв'язавши вхідний крутний момент валу, можна отримати:

$$T_1(V_{out}) = \frac{GJ}{\Delta x} [5.322 \cdot 10^{-6} V_{out} + 1.457 \cdot 10^{-6}]$$

$$T_2(V_{out}) = \frac{GJ}{\Delta x} [5.229 \cdot 10^{-6} V_{out} + 1.953 \cdot 10^{-6}]$$

$$T_3(V_{out}) = \frac{GJ}{\Delta x} [5.264 \cdot 10^{-6} V_{out} + 1.262 \cdot 10^{-6}]$$

Рівняння, що наведено вище, формуються для стандартизації розрахунків вхідного крутного моменту для сталевого валу на основі виключно оптичних вимірювань напруги. Графіки цих рівнянь наведені на рисунку 3.6 і ілюструють лінійність вхідного моменту на валу як функцію V_{Out} .

Для того, щоб продемонструвати, наскільки точність V_{Out} порівнюється для подібних значень ϕ серед трьох випробуваних валів, до рівнянь, що визначають $V_{out}(\phi_1)$ було застосовано лінійну інтерполяцію та аналіз помилок.

Результати цих операцій наведені в таблиці 3.1.

$$T_1(V_1) = \frac{G \cdot J_1}{\Delta x} [5.322 \cdot 10^{-6} V_1 + 1.457 \cdot 10^{-6}] \text{ діаметр вала } 25,4 \text{ мм}$$

$$T_2(V_2) = \frac{G \cdot J_2}{\Delta x} [5.229 \cdot 10^{-6} V_2 + 1.956 \cdot 10^{-6}] \text{ діаметр вала } 50,8 \text{ мм}$$

$$T_3(V_3) = \frac{G \cdot J_3}{\Delta x} [5.264 \cdot 10^{-6} V_3 + 1.262 \cdot 10^{-6}] \text{ діаметр вала } 76,2 \text{ мм}$$

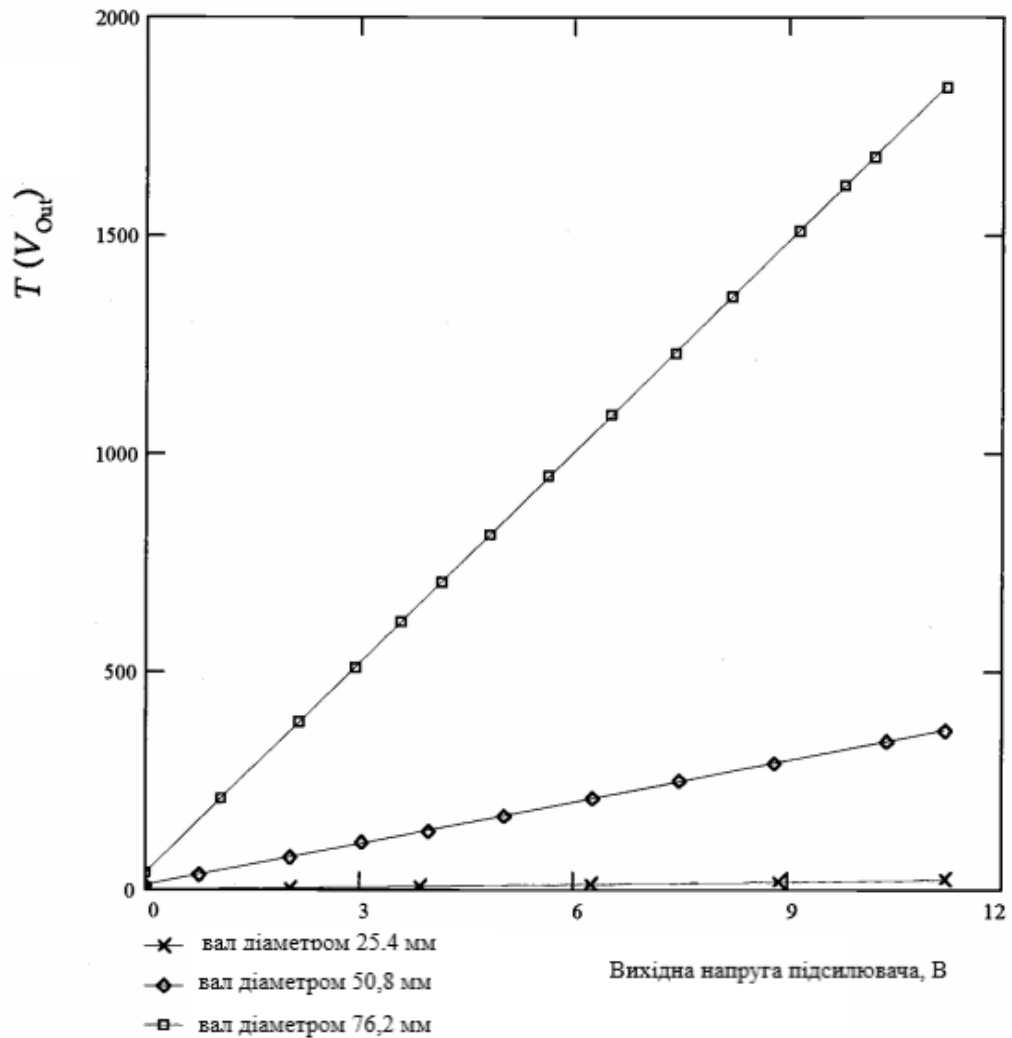


Рисунок 3.6 Лінеаризований вхідний крутний момент валу як функція (V_{Out})

Виконання лінійної інтерполяції та аналіз похибок для рівнянь, наведених вище, приведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Аналіз похибок розрахунків кутів обертів

ϕ_{rang} , рад $\cdot 10^{-6}$	$V_1(\phi_{rang})$ В	$V_2(\phi_{rang})$ В	$V_3(\phi_{rang})$ В	$\delta(V_1, V_2)$, %	$\delta(V_1, V_3)$, %	$\delta(V_2, V_3)$, %
--	-------------------------	-------------------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

0	0	0	0	0	0	0
6	0,853	0,773	0,9	9,379	5,51	16,429
8	1,229	1,156	1,28	5,94	4,15	10,727
12	1,981	1,92	2,04	3,079	2,978	6,25
16	2,732	2,685	2,8	1,717	2,484	4,283
18	3,108	3,068	3,18	1,287	2,317	3,651
20	3,484	3,45	3,56	0,976	2,181	3,188
24	4,236	4,215	4,32	0,496	1,983	2,491
28	4,987	4,98	5,08	0,14	1,865	2,008
30	5,739	5,744	5,84	0,019	1,809	1,828
32	5,739	5,744	5,84	0,087	1,76	1,671
36	6,49	6,509	6,6	0,293	1,695	1,398
40	7,242	7,274	7,36	0,442	1,629	1,182
42	7,618	7,656	7,74	0,499	1,601	1,097
44	7,994	8,039	8,12	0,563	1,576	1,008
48	8,745	8,804	8,88	0,675	1,544	0,863
52	9,479	9,568	9,64	0,939	1,696	0,753
54	9,873	9,951	10,02	0,79	1,489	0,693
56	10,248	10,333	10,400	0,829	1,483	0,648
60	11	11,098	11,160	0,891	1,455	0,559

Аналіз даних, наведених в таблиці 3.1, показує, що зі збільшенням кута обертання валу (тобто зменшенням кількості оптичного випромінювання, що поглинається фотоприймачем CdS), похибка між напругами відгуку підсилювача мала тенденцію до зменшення. Є дві ймовірні причини цього явища:

- при нижчих рівнях напруги в діапазоні 0,733 1,280 В, передбачається, що компоненти низькочастотної смуги (тобто завади) були присутні на виході підсилювача;

- компоненти високочастотного діапазону (тобто шум) були присутні на виході підсилювача.

По суті, жоден сигнал, що генерується в результаті падіння напруги на резистивному дільнику R1-R3, не буде «чистим». Забруднення завжди існуватиме в результаті розряду внутрішньої ємності, пульсації та інших низькочастотних компонентів, які зазвичай класифікуються як завади. У цьому контексті важливо розрізнити різницю між завадами та шумом.

Завади будуть похибкою, викликаною падінням напруги в мережі R/R3; зазвичай це є результатом паразитних елементів ланцюга і не може бути передбачені кількісно.

Хоча шум також буде проявлятися як похибка при вимірюванні напруги, його походження лежить у фізичній природі пристрою CdS або схеми зчитування; шум — це передбачуваний параметр продуктивності, який контролюється проектом.

Якщо припустити, що завади викликали похибки, наведені в таблиці 3.5, то цю проблему можна було б мінімізувати, розмістивши конденсатор паралельно до пристрою CdS; це призведе до того, що будь-які низькі частоти смуги пройдуть через конденсатор, а не через клеми фоторезистора. Крім того, падіння напруги постійного струму, які складають вхідний сигнал до неінвертуючої клеми підсилювача, будуть заблоковані конденсатором.

Якщо припустити, що небажані високочастотні сигнали змішуються з інформацією, що містить сигнали в схемі зчитування, то простий фільтр нижніх частот, підключений до виходу підсилювача, буде діяти, щоб передавати будь-які забруднені шумом сигнали на землю (тобто конденсатор буде діяти як шунт на цих вищих частотах).

Що стосується оцінки математичного очікування, всі набори даних напруги, що спостерігається, мали чіткий нахил до групування навколо центральної точки. Таким чином, для кожного з цих наборів даних було розумно обчислити середню арифметичну напругу. Для випробуваних валів на 25,4 50,8 та 76,2 мм середнє арифметичне напруги було використано як основа для визначення рівнянь, що визначають $V_{out}(\phi)$, так що $V_{avg} = V_{out}(\phi)$. Ці напруги наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.2 - Середні арифметичні напруги для відповідних значень ϕ

Вал 25,4 мм		Вал 50,8 мм		Вал 76,2 мм	
$\phi_1, \text{рад} \cdot 10^{-6}$	$V_{out}(\phi), \text{В}$	$\phi_2, \text{рад} \cdot 10^{-6}$	$V_{out}(\phi), \text{В}$	$\phi_3, \text{рад} \cdot 10^{-6}$	$V_{out}(\phi), \text{В}$
0	0	0	0	0	0
12	2,02	6	0,747	8	1,07
24	3,86	12	2,02	12	2,16
36	6,23	18	3,04	16	2,93
48	8,87	24	3,97	20	3,58
60	11,2	30	5,04	24	4,14
		36	6,27	28	4,82
		42	7,49	32	5,65
		48	8,82	36	6,53
		54	10,4	40	7,41
		60	11,2	44	8,2
				48	9,14
				52	9,8
				56	10,2
				60	11,2

Для валу діаметром 25,4 мм найгірша величина дисперсії (тобто найбільша варіація всіх наборів даних) призвела до дисперсії $0,02 \text{ В}^2$ і стандартного відхилення $\sigma = 0,139 \text{ В}$ для середньої напруги $m = 2,02 \text{ В}$.

Розрахунок плюс-мінус два стандартних відхилення від середнього призвели до $+2\sigma = 2,298 \text{ В}$ і $-2\sigma = 1,742 \text{ В}$. При більш високих рівнях напруги стандартне відхилення становило в гіршому випадку 95,1% середнього і 99,8% в кращому випадку.

Для валу з діаметром 50,8 мм найбільша міра дисперсії призвела до дисперсії $0,819 \text{ В}^2$ і $\sigma = 0,905$ для $V = 0,747$. Другий найгірший середній випадок, що спостерігався, був $\sigma^2 = 0,072 \text{ В}^2$ і $\sigma = 0,269 V_{\text{Avg}}$ для $m = 10,35 \text{ В}$. При інших рівнях напруги стандартне відхилення становило в найгіршому випадку 96,7% середнього і 98,9% в кращому випадку.

Для 76.2 мм валу $\sigma_{\text{макс}} = 0,05 \text{ В}$ і $\sigma_{\text{мін}} = 0,069 \text{ В}$ для середньої напруги $V_{\text{Avg}} = 1,063$ і $8,201 \text{ В}$ відповідно. На інших рівнях напруги стандартне

відхилення становило в гіршому випадку 95,8% середнього і 98,9% в кращому випадку.

Висновки до розділу: в розділі було проведено моделювання роботи оптичного кутоміра. Для цього було розроблено модель оптичної частини та модель електронної частини. Було проведено оцінку похибок вимірювань та результати моделювання підтвердили можливість використання оптичного кутоміра для проведення вимірювань кута обертання вала.

ВИСНОВКИ

В першому розділі показано, що існуючі системи вимірювання кутів мають великий недолік, який полягає в тому, що під час експлуатації відбувається забруднення складових, що призводить до похибок вимірювань та втрат часу на технічне обслуговування внаслідок необхідності очищення від бруду. Ці недоліки відсутні у випадку використання оптичної системи вимірювання кута.

В другому розділі було вирішено задачу створення та ефективної передачі відбитого оптичного променя, що виявляється фотопровідником. Залишається остаточне завдання: синтезувати схему, здатну давати вихідну реакцію, яка змінюється за напругою як функцію падіння отриманого оптичного випромінювання.

В третьому розділі було проведено моделювання роботи оптичного кутоміра. Для цього було розроблено модель оптичної частини та модель електронної частини. Було проведено оцінку похибок вимірювань та результати моделювання підтвердили можливість використання оптичного кутоміра для проведення вимірювань кута обертання вала.

Перелік використаних літературних джерел

1. Головка Д. Б. Основи метрології та вимірювань: підручник. / Д. Б. Головка, К. Г. Рего, Ю. О. Скрипник. – К.: Либідь, 2001. – 408 с.
2. Сидоренко І. А. Прикладна оптика та оптичні вимірювальні системи / І. А. Сидоренко. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 280 с.
3. Головка Д. Б. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин / Д. Б. Головка, Ю. О. Скрипник, О. П. Яненко. – К.: Либідь, 2004. – 328 с.
4. Brown, J. Optical Angle Measurement: Theory and Applications / J. Brown. – New York: Wiley, 2017. – 320 p.
5. Johnson, P. Advances in Optical Angle Measurement Technologies / P. Johnson. – Cambridge: Cambridge University Press, 2021. – 280 p.
6. Кованько В. В. Загальнотехнічні вимірювання та прилади. Навчальний посібник / В. В. Кованько, В. В. Древецький, А. О. Христюк. – Рівне: НУВГП, 2013. – 189 с.
7. Василенко С. В. Оптичні інструменти та їх застосування в техніці / С. В. Василенко. – Одеса: ОНУ, 2017. – 275 с.
8. Smith, A. Precision Optical Instruments for Angular Measurement / A. Smith. – London: Springer, 2018. – 295 p.
9. Taylor, M. Applied Optics in Angular Measurement Systems / M. Taylor. – Oxford: Elsevier, 2019. – 350 p.
10. Anderson, R. Optical Instruments for Angle Measurement in Engineering / R. Anderson. – San Francisco: Academic Press, 2020. – 310 p.
11. Ковальчук О. П. Оптичні прилади для вимірювання кутів у технічних системах // Вісник ХНУРЕ. – 2019. – № 4. – С. 48-55.
12. Зайченко І. В. Моделювання кутових вимірювань за допомогою оптичних пристроїв // Наукові праці КПІ. – 2020. – № 6. – С. 21-28.
13. Іваненко М. Г. Оптичні методи вимірювання кутових відстаней в оптико-електронних системах // Радіоелектроніка та інформатика. – 2018. – № 5. – С. 34-42.
14. Green, M. Optical Measurement Techniques for Angular Displacement // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2019. – Vol. 68. – P. 567-575.

15. Evans, S. Precision Angular Measurement Using Optical Systems // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 113. – P. 745-752.
16. Савченко В. С. Оптичні кутоміри в геодезичних вимірюваннях // Геодезичний вісник. – 2020. – № 3. – С. 55-63.
17. Федоренко С. О. Точність вимірювання кутів за допомогою оптичних приладів // Вісник ДНУ. – 2021. – № 2. – С. 40-47.
18. Johnson, T. Optical Instruments for Angular Measurement in Precision Engineering // Optics Express. – 2020. – Vol. 28. – P. 1241-1250.
19. Williams, K. A Review of Optical Angle Measurement Systems // Journal of Optical Engineering. – 2019. – Vol. 58. – P. 315-325.
20. Harris, D. Advancements in Optical Angle Measurement for Industrial Applications // Applied Optics. – 2021. – Vol. 60. – P. 1502-1510.