

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
Інженерно-технічний факультет
Кафедра приладобудування

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри

" " грудень 2023 р.

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему

" Автоматичний модуль контролю лінійних переміщень на основі лінійно-регульованого
диференціального трансформатора "

Виконав: студент II курсу маг., групи АКІТР

Веретко І.І.

(прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Керівник:

ст. викл. Чичура І.І.

(вчене звання, ПІБ, посада)

(підпис)

Ужгород - 2023

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 60 с., 27 рис., 6 додатків, 12 посилань.

Об'єкт проектування – пристрій для контролю лінійних переміщень на основі лінійно-регульованого диференціального трансформатора, що призначений для роботи в автоматизованих системах контролю переміщень об'єктів.

Спроектований призначено для точного позиціонування об'єктів на виробництві а також переміщень у автоматизованих системах. У основі роботи лежить використання лінійно регульованого диференціального трансформатора, як первинного вимірювального перетворювача лінійних переміщень штоку у зміну електричного сигналу на обмотках трансформатора. Для побудованого пристрою було спроектовано модуль попереднього підсилення сигналу з використанням мікроконтролера, що дозволяє як виводити дані про переміщення штоку на дисплей так і підключати пристрій до відповідної автоматизованої системи контролю.

ЛІНІЙНИЙ РЕГУЛЬОВАНИЙ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ
ТРАНСФОРМАТОР, ПЕРЕМІЩЕННЯ ОБ'ЄКТІВ,
АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ПЕРЕМІЩЕННЯ.

ABSTRACT

Explanatory note: 60 p., 27 figures, 6 appendices, 12 references.

The object of design is a device for controlling linear movements based on a linearly regulated differential transformer, which is designed to work in automated systems for controlling the movements of objects.

It is designed for accurate positioning of objects in production as well as movements in automated systems. The basis of the work is the use of a linearly regulated differential transformer as the primary measuring converter of linear movements of the rod into changes in the electrical signal on the transformer windings. A signal pre-amplification module using a microcontroller was designed for the built device, which allows both to display data about the movement of the rod on the display and to connect the device to the corresponding automated control system.

LINEAR ADJUSTABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER, OBJECT MOVEMENT, AUTOMATED MOVEMENT CONTROL.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 Аналіз технічного завдання	10
2 Огляд літератури за темою об'єкта проектування	11
2.1 Огляд сучасного стану розробки індуктивних датчиків	11
2.1.1 Принцип роботи та основні характеристики індуктивних датчиків	11
2.1.2 Датчики переміщення на основі індуктивності	12
2.1.3 Котушка з рухомим сердечником	14
2.2 Принцип роботи лінійно-регульованих диференціальних трансформаторів	16
2.3 Похибки вимірювань лінійно-регульованих диференціальних трансформаторів	19
2.4 Аналіз конструкції та технічних особливостей сучасних датчиків на основі лінійно-регульованого диференціального трансформатора	21
2.4.1 Огляд конструкції корпусів датчиків ЛРДТ	21
2.4.2 Короткий огляд технічних характеристик датчиків на основі ЛРДТ	23
3 Вибір та проектування датчика для контролю лінійних переміщень	27
3.1 Розрахунок лінійно регульованого диференціального трансформатора та його передавальної характеристики	27
3.2 Огляд схем нормуючої електроніки для датчиків на базі ЛРДТ	33
3.3 Структурна схема первинного вимірювального перетворювача для датчика ЛРДТ	36
3.4 Електрична принципова схема первинного вимірювального перетворювача для датчика ЛРДТ	38
3.5 Розрахунки електричних параметрів принципової схеми первинного вимірювального перетворювача	40
3.6 Огляд основних компонентів схеми первинного вимірювального перетворювача	42
3.7 Базові розрахунки по проектуванню друкованої плати первинного вимірювального перетворювача	48
4 Розробка конструкції корпусу проектного пристрою	54
4.1 Опис конструкції датчика проектного пристрою	54

					КМР.АКІТР.10550276.01.000 ПЗ			
Вим,	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматичний модуль контролю лінійних переміщень на основі лінійно-регульованого диференціального трансформатора Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив	Веретко І.І.					У	6	60
Перевірив	Чичура І.І.							
Н. Контр.	Гютюніков С.					УжНУ, ІТФ, курс 2м, спец. АКІТР		
Затвердив	Чичура І.І.							

4.2 Опис конструкції корпусу блока нормуючої електроніки первинного вимірювального перетворювача	55
Висновки	58
Перелік посилань	59
Додатки	60

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

В нашому сучасному світі, все більше і більше зростає виробнича конкуренція, а вимог до екологічності, економічності, надійності та ефективності промисловість стають все жорсткішими та жорсткішими. Тому сучасне виробництво переживає постійний процес технологічного вдосконалення, що неминуче приводить до впровадження нових науково-технічних рішень і підвищення рівня автоматизації для пришвидшення та підвищення якості усіх видів виробництва. Дедалі частішим спостерігається впровадження і активне застосування різноманітних датчиків для автоматичних систем, які набувають все більш широкого застосування як у виробництві так і у військовій техніці, сучасній медицині, харчовій промисловості та інших видах діяльності людства.

Значну роль серед великого різноманіття сучасних датчиків для автоматизованих систем відіграють пристрої для визначення лінійних та кутових переміщень. Це пов'язано з тим, що на автоматизованому виробництві якість продукції, що виготовляється прямо залежить від точного позиціонування деталей на виробничій лінії при виконанні операцій з ними.

Для вимірювання позиціонування та переміщення об'єктів у просторі в даний момент часу активно використовуються лінійні і цифрові інтегральні схеми. Застосування інтегральних схем призвело до значно більш ефективного вирішення проблем, які раніше вирішувалися з використанням дорогих та складних електромеханічних засобів. Сучасні системи вимірювання положення і переміщення, у наш час, широко використовуються в наступних програмах: робототехніка, комп'ютеризоване виробництво, автоматизоване виробництво, авіація і автомобілебудування та багатьох інших сферах діяльності людства.

Лінійні диференціальні трансформатори (ЛДТ) це сучасні, точні та надійні пристрої для вимірювання лінійних переміщень об'єктів. Сучасні ЛДТ широко використовуються в механообробці, робототехніці, авіації і автоматизованому виробництві, на різних його етапах. До завершення другої світової війни лінійні

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		8

диференціальні трансформатори набули значного поширення в якості чутливого елемента в управлінні при промисловому виробництві на основі досвіду їх використання в військової авіації, в торпедах і системах управління зброєю. Герман Шейвітц (Herman Schaevitz) опублікував в 1946 році роботу «Лінійні диференціальні трансформатори» (праці SASE, Volume IV, No.2), що ознайомило громадськість з областю застосування і можливостями ЛДТ.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

1 КОРОТКИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

У даному розділі виконано аналіз основних проблем, які необхідно врахувати при виконанні кваліфікаційної магістерської роботи.

Проектований пристрій, як складова частина складної автоматизованої виробничої системи повинен відповідати усім технічним вимогам для забезпечення високої надійності, швидкодії та неперервної роботи автоматизованої системи у якій він може бути використаним.

Сучасні датчики переміщення та позиціонування, що будуються на основі лінійно регульованих диференціальних трансформаторів повинні забезпечувати точне та вимірювання переміщення штоку в складних виробничих умовах з високою відтворюваністю результатів та значною кількістю годин напрацювання пристрою. Велику увагу приділяють міцності та надійності корпусу та складових частин пристрою, екрануванню та захисту від впливу вологи та агресивних речовин.

Не зважаючи на це пристрій повинен бути доступним та недорогим, тому важливим є оптимальний підбір матеріалів та технології виготовлення комплектуючих пристрою.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ОБ'ЄКТА ПРОЕКТУВАННЯ

2.1 Огляд сучасного стану розробки індуктивних датчиків

2.1.1 Принцип роботи та основні характеристики індуктивних датчиків

Принцип роботи датчиків даного типу полягає в тому, що в процес вимірювання задіюється один із елементів магнітного контуру, який тим самим викликає зміну магнітного потоку через вимірювальну обмотку та відповідно зміну електричного струму у колі.

Якщо рухомим об'єктом є феритовий сердечник, то його переміщення при поступальному русі чи обертанні проявляється: а) у зміні коефіцієнта самоіндукції котушки (змінна індуктивність) або б) в зміні коефіцієнта зв'язку між первинною та вторинною обмоткою трансформатора (диференційний трансформатор), що призводить до зміни напруги на виході вторинної обмотки.

В трансформаторі зі змінним зв'язком одна обмотка може обертатися відносно іншої, зафіксованої (одна з них грає роль джерела, а інша - приймача). Первинна обмотка створює індуктор, а вторинна обмотка з наведеним струмом дає напругу у вигляді функції кута обертання (індуктивний потенціометр).

Залежність коефіцієнта самоіндукції L та взаємної індукції M від переміщення обмотки зазвичай володіє невисокою ступню лінійності, її лінійність може бути значно покращена диференційним ввімкненням двох додаткових котушок з коефіцієнтами M і L , змінними, при заданому переміщенні, у протилежних напрямках, чим і забезпечується часткова компенсація не лінійності.

Індуктивний датчик вмикається в коло живлення з джерелом синусоїдальної напруги, частота якого зазвичай обмежена кількома десятками кілогерц, з метою зменшення завад, магнітні втрати, та втрати через струми Фуко. Вимірювана напруга v_m утворюється в наслідок модуляції амплітуди напруги живлення $E_s \cos \omega_s t$ переміщенням $x(t)$:

$$v_m = kx(t) E_s \cos(\omega_s t + \Phi) \quad (2.1)$$

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		11

Інколи зміни індуктивного елементу можуть використовуватися для модуляції частоти коливання пропорційно переміщенню. У будь якому випадку, який би не був тип модуляції, частота f повинна бути набагато нижчою за несучу частоту з метою полегшення детектування ($f < f_s/10$).

По своїй природі індуктивні датчики, з одного боку чутливі до зовнішніх електромагнітних полів, а з другого здатні самостійно їх індукувати. Тому індукційні датчики необхідно вміщувати в середину кожуху, що слугуватиме магнітним екраном.

2.1.2 Датчики переміщення на основі індуктивності

Коефіцієнт самоіндукції L котушки з N витками проводу залежить від магнітного опору пов'язаного з ним магнітного струму:

$$L = N^2/R, \text{ где } R = \oint_{(\text{по контуру})} \frac{dl}{\mu s} \quad (2.2)$$

де μ - магнітна проникність, s - площа поперечного перерізу контуру.

Якщо площа поперечного перерізу різних ділянок контуру постійна:

$$R = \frac{l_f}{\mu_0 \mu_f s_f} + \frac{l_0}{\mu_0 s_0} \quad (2.3)$$

де l_f та l_0 - довжина силових ліній у феромагнітному матеріалі та у повітрі відповідно, s_f та s_0 - площі поперечних перерізів магнітного контуру та зазору, μ_f - відносна магнітна проникність феромагнітного матеріалу та $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Для магнітного контуру зі змінним зазором рис. 2.1, виходячи з загальної формули, легко встановити вираз для коефіцієнту самоіндукції:

$$L = \mu_0 N^2 s \frac{1}{l_0 + l_f/\mu_f} \quad (2.4)$$

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

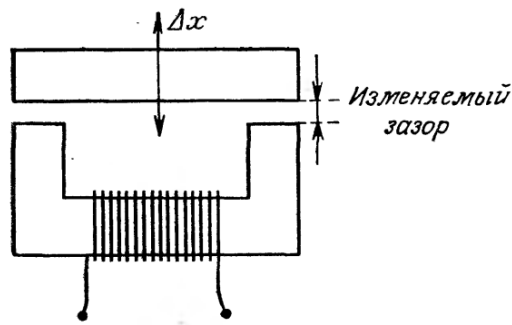


Рис. 2.1 Схема датчика зі змінним зазором [1]

Оскільки індуктивність повинна бути чутливою до зміни зазору, потрібно обрати $l_0 \gg l_f / \mu_f$; звідки одержимо вираз для L :

$$L = \mu_0 N^2 S / l_0 \quad (2.5)$$

Переміщення Δx обкладки приводить до зміни $\Delta l_0 = 2\Delta x$ зазору, в результаті чого індуктивність набуває нового значення:

$$L + \Delta L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l_0} \frac{1}{1 + 2\Delta x / l_0} \quad (2.6)$$

При $\Delta x \ll l_0$ одержимо:

$$\Delta L = - \frac{2\mu_0 N^2 S}{l_0^2} \Delta x \left[1 - \frac{2\Delta x}{l_0} + \left(\frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (2.7)$$

а чутливість S можна записати у вигляді:

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta x} = - \frac{2\mu_0 N^2 S}{l_0^2} \left[1 - \frac{2\Delta x}{l_0} + \left(\frac{2\Delta x}{l_0} \right)^2 + \dots \right] \quad (2.8)$$

Чутливість залежатиме від початкового положення l_0 обкладки: вона зростатиме при зменшенні l_0 ; при цьому чутливість може вважатися постійною тільки у випадку, коли переміщення є дуже малими у порівнянні з l_0 . Це обмежує використання такого датчика вимірюваннями переміщенні на рівні міліметра.

Чутливість та лінійність вдається покращити шляхом диференційного ввімкнення двох однакових обмоток та сердечників, розміщених симетрично відносно рухомої обкладки рис. 2.2.

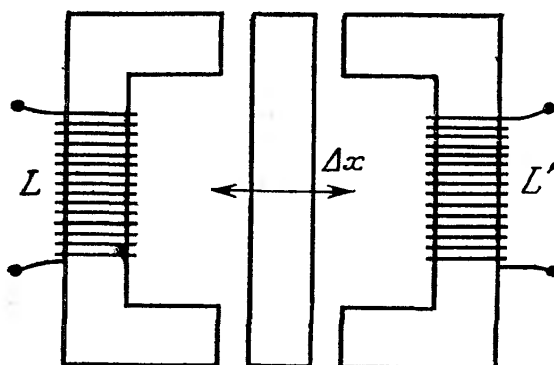


Рис. 2.2 Схема датчика з об'єднанням двох магнітних кіл, з протилежною зміною зазорів [1]

Чутливість такого пристрою очевидно подвоюється, але головне, не лінійність зменшується до сотих одиниці, за рахунок компенсації не лінійності першого та усіх непарних порядків.

2.1.3 Котушка з рухомим сердечником

Феромагнітний сердечник з'єднують з деталлю, положення якої необхідно виміряти. Цей сердечник поміщено в змінювану глибину l_f в обмотку N рівномірно розміщених на довжині l витків дроту рис. 1.3.

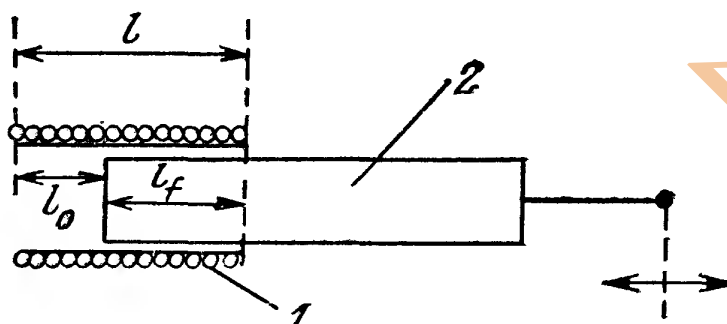


Рис. 2.3 Схема котушки з рухомим сердечником.

1 - котушка; 2 - магнітний сердечник. [1]

Коефіцієнт самоіндукції L обмотки залежить від глибини введення сердечника. При розрахунку L індуктивність розглядають як послідовне об'єднання заповненої повітрям індуктивності довжиною l_0 з коефіцієнтом самоіндукції L_0 та індуктивності залізного осердя довжиною l_f з коефіцієнтом самоіндукції L_f ; коефіцієнт взаємної індукції рівний M . Для такої схеми матимемо:

$$L = L_0 + L_f + 2M \quad (2.9)$$

$$M = k \sqrt{L_0 L_f} \quad (2.10)$$

де k - коефіцієнт зв'язку, що вважається постійним ($0 \leq k \leq 1$). В залежності від параметрів контуру можна записати вирази:

$$L_0 = \mu_0 (N^2/l^2) s_0 l_0 = \mu_0 (N^2/l^2) s_0 (l - l_f) \quad (2.11)$$

$$L_f = \mu_0 (N^2/l^2) \{s_0 + (\mu_f - 1) s_f\} l_f \quad (2.12)$$

звідки отримуємо вираз для L :

$$L = \mu_0 (N^2/l^2) [s_0 l + (\mu_f - 1) s_f l_f + 2k \sqrt{s_0 \{s_0 + (\mu_f - 1) s_f\}} \sqrt{(l - l_f) l_f}] \quad (2.13)$$

Переміщення Δl_f сердечника викликає зміну ΔL індуктивності, яка залежить від l_f і є нелінійною функцією Δl_f . Як і у випадку індуктивності зі змінним зазором, ця не лінійність може бути зменшена шляхом диференціального ввімкнення в суміжні плечі моста двох однакових котушок зі спільним осердям, переміщення якого відносно рівноважного положення викликають однакові за величиною, але протилежні за значенням зміни індуктивності котушок рис. 2.4.

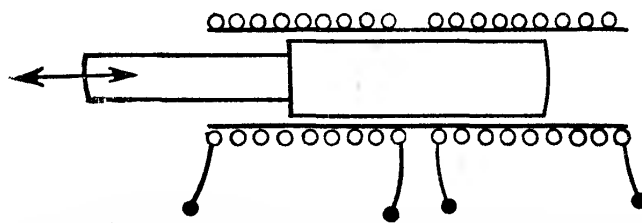


Рис. 2.4 Диференційне з'єднання двох котушок з рухомим осердям[1]

В такому випадку, також слід враховувати виникнення взаємної індукції M' між двома котушками, яка може бути значно зменшена за рахунок використання підходу розглянутого для випадку магнітного контуру.

2.2 Принцип роботи лінійно-регульованих диференціальних трансформаторів

Диференційно-трансформаторні датчики застосовуються для безконтактного вимірювання малих переміщень. Вони працюють за принципом диференціального трансформатора з механічно керованим осердям. Нелінійність датчиків складає 0,25% від повної шкали при робочому діапазоні вимірювань від $\pm 2,54$ до ± 470 мм. При вимірюванні однонаправлених переміщень діапазон може складати до ± 940 мм.

Конструктивно диференційно-трансформаторні датчики являють собою схему з первинної і двох вторинних обмоток з рухомим магнітним осердям. На первинну обмотку подається напруга з постійною амплітудою. В залежності від положення осердя змінюється напруга на вторинних обмотках. Різниця цих напруг знаходиться в лінійній залежності від переміщення магнітного осердя. Вихідний сигнал з датчика показує не тільки величину переміщення, але і його напрямок.

При роботі датчиків переміщення даного типу необхідно враховувати наступні фактори: діапазон вимірювання, тип конструкції датчика, тип

перетворення сигналу та умови експлуатації датчика. Датчики подібного типу використовуються для вирішення найрізноманітніших завдань промислової автоматизації: вимірювань переміщення, зміщення, деформації площини, вигину, нерівності поверхні, контролю габаритів однотипних об'єктів, контролю якості продукції та ін.

Датчики мають кілька типів конструкції: плунжер з магнітним сердечником на кінці може бути надійно зафіксований в корпусі датчика і переміщуватися на певну відстань або може являти собою окремий елемент датчика, який монтується на об'єкт, переміщення якого необхідно вимірювати. У тестовому обладнанні використовуються датчики з вимірювальною голівкою, яка підвішена на пружині, що повертається у початкове положення.

Лінійні диференціальні регульовані трансформатори (ЛРДТ) є точними і надійними засобами для вимірювання лінійного переміщення. ЛРДТ широко використовуються в сучасній механообробці, робототехніці, авіації і комп'ютеризованому виробництві. До кінця другої світової війни лінійні диференціальні трансформатори придбали поширення в якості чутливого елемента в управлінні при промисловому виробництві на основі досвіду використання їх в військовій авіації, в торпедах і системах управління зброєю. Герман Шейвітц (Herman Schaevitz) опублікував в 1946 році роботу «Лінійні диференціальні трансформатори» (праці SASE, Volume IV, No.2), що ознайомило громадськість з областю застосування і можливостями ЛДТ.

Лінійні диференціальні трансформатори (див. рис.2.5) є датчиками, вихідна напруга з яких пропорційна положенню переміщуваного магнітного сердечника. Сердечник переміщується по лінійному закону всередині трансформатора, що складається з центральної, первинної обмотки і двох вторинних обмоток циліндричної форми. первинна обмотка збуджується джерелом змінної напруги (частота зазвичай становить кілька КГц), наводячи при цьому у вторинних обмотках напруги, які змінюються зі зміною положення магнітного осердя всередині збірки. Зазвичай, сердечник забезпечується зсередини різьбленням, для

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		17

того щоб полегшити кріплення немагнітного штока, який в свою чергу прикріплюється до об'єкта, переміщення і зміщення якого вимірюватиметься.

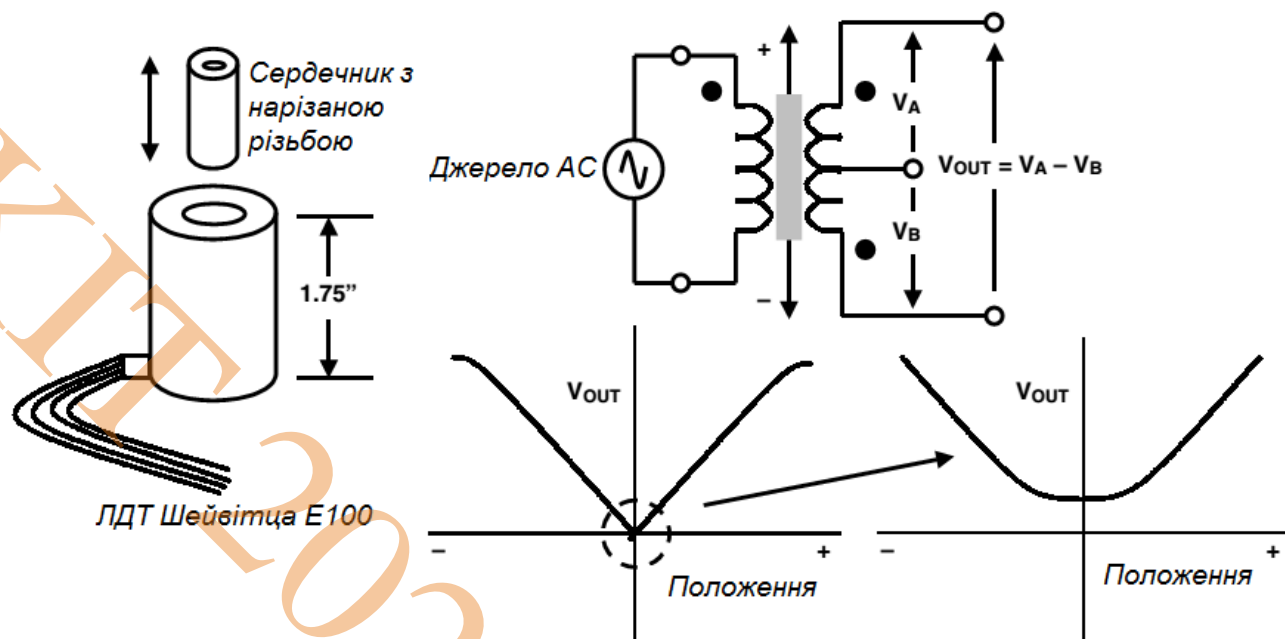


Рис. 2.5 Лінійний диференціальний трансформатор (ЛДТ)

Вторинні обмотки намотуються зустрічно, і коли осердя знаходиться в центрі, напруги на вторинних обмотках рівні й протилежні за знаком, а вихідна результуюча напруга дорівнює нулю. Коли сердечник зміщується від центру, напруга у вторинній обмотці, в бік якої це осердя зміщується, зростає, в той час як напруга на протилежній обмотці зменшується. В наслідок чого вихідна диференціальна напруга змінюється лінійно залежно від положення сердечника. Лінійність такої системи за діапазоном переміщення вельми висока 0.5% або краще. ЛДТ забезпечує хорошу точність, лінійність і чутливість, а також роботу без тертя і високу жорсткість.

ЛДТ володіє широким спектром діапазонів вимірювання переміщення, зазвичай від ± 100 мкм до ± 25 см. Типові напруги збудження лежать в області від 1 В до 24 В по середньоквадратичної величині (ВКВ), і з частотами від 50 Гц до 20 КГц. Основні специфікації для ЛДТ Шейвітца Е100 наведені нижче:

- ◆ Номінальний лінійний діапазон: ± 0.1 дюйма (± 2.54 мм)

- ◆ Напруга збудження: 3 В ВКВ
- ◆ Робочі частоти: 50 Гц до 10 КГц (2.5 КГц номінальна)
- ◆ Лінійність: 0.5% від верхньої межі
- ◆ Чутливість: 2.4 мВ / 0.001 дюйма / В збудження
- ◆ Вхідний імпеданс первинної обмотки: 660Ω
- ◆ Вихідний імпеданс вторинної обмотки: 960Ω

Відзначимо, що коли сердечник знаходиться в центрі, істинного нуля на виході не буде, внаслідок неузгодженості вторинних обмоток і наявності індуктивності розсіювання. До того ж просте вимірювання вихідної напруги V_{OUT} не дасть інформації про те, в який бік від нульової позиції зміщено осердя.

2.3 Похибки вимірювань лінійно-регульованих диференціальних трансформаторів

У міру руху сердечника зв'язок первинної обмотки з двома вторинними котушками змінюється та викликає зміну наведених напруг. Котушки з'єднані таким чином, що вихідна напруга є різницею (отже, «диференціал») між верхньою вторинною напругою і нижньою вторинною напругою. Коли осердя знаходиться у своєму центральному положенні, на рівній відстані між двома вторинними обмотками, у двох вторинних обмотках індукуються рівні напруги, але два сигнали скасовуються, тому вихідна напруга теоретично дорівнює нулю. Насправді невеликі зміни у способі підключення первинної обмотки до кожної вторинної обмотки означають, що невелика напруга виводиться, коли сердечник перебуває у центрі.

Ця невелика залишкова напруга виникає через фазове зсув і часто називається квадратурною помилкою. Це є перешкодою для систем управління зі зворотним зв'язком, оскільки може призвести до коливань близько нульової точки, а також може бути неприйнятним у простих вимірювальних додатках. Це наслідок використання синхронної демодуляції з прямим відніманням вторинних

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		19

напруг змінного струму. Сучасні системи, особливо ті, які пов'язані з безпекою, вимагають виявлення несправності LVDT, і нормальний метод полягає в демодуляції кожної вторинної обмотки окремо з використанням прецизійних напівхвильових або двонапівперіодних випрямлячів на основі операційних підсилювачів та обчисленні різниці шляхом віднімання сигналів постійного струму. Напрузі збудження сума двох вторинних напруг майже стала протягом робочого ходу LVDT, її значення залишається у невеликому вікні і може контролюватись таким чином, що будь-які внутрішні відмови LVDT викличуть сумарну напругу відхилитися від своїх меж і швидко виявлятися, викликаючи індикацію несправності. У цій схемі відсутня квадратурна помилка, і різниця напруга, що залежить від положення, плавно проходить через нуль в нульовій точці.

Якщо в системі доступна цифрова обробка у вигляді мікропроцесора або FPGA, то зазвичай пристрій обробки виконує виявлення несправності і можливо, логометрична обробка для підвищення точності шляхом поділу різниці вторинної напруги на суму вторинної напруги, щоб вимірювання не залежало від точної амплітуди сигналу збудження. Якщо є достатня потужність цифрової обробки, стає звичайним використання для генерації синусоїдального збудження через DAC і, можливо, також для виконання вторинної демодуляції через мультиплексований ADC.

Коли осердя зміщене догори, напруга у верхній вторинній котушці збільшується, коли напруга в нижній частині зменшується. Вихідна напруга, що результує, збільшується з нуля. Ця напруга знаходиться у фазі з первинною напругою. Коли осердя рухається в іншому напрямку, вихідна напруга також збільшується від нуля, але його фаза протилежна фазі первинної обмотки. Фаза вихідної напруги визначає напрямок зміщення (вгору або вниз), а амплітуда вказує величину зміщення. синхронний детектор може визначати вихідну напругу зі знаком, що відноситься до зміщення.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

LVDT розроблений з довгими тонкими котушками, щоб зробити вихідну напругу практично лінійною при зміщенні до кількох дюймів (кілька сотень міліметрів) завдовжки.

LVDT можна використовувати як датчик абсолютного положення. Навіть якщо живлення вимкнено, при перезапуску LVDT показує той самий вимір, і ніяка інформація про місцезнаходження не втрачається. Його найбільші переваги - повторюваність та відтворюваність після правильного налаштування. Крім того, крім одновісного лінійного руху осердя, будь-які інші рухи, такі як обертання осердя навколо осі, не вплинуть на його вимірювання.

Оскільки ковзний сердечник не стосується внутрішньої частини труби, він може рухатися без тертя, що робить LVDT дуже надійним пристроєм. Відсутність ковзних або обертових контактів дозволяє повністю ізолювати LVDT від навколишнього середовища.

LVDT зазвичай використовуються для зворотного зв'язку за положенням у сервомеханізмах, а також для автоматизованих вимірювань у верстатах та багатьох інших промислових та наукових додатках.

2.4 Аналіз конструкції та технічних особливостей сучасних датчиків на основі лінійно-регульованого диференціального трансформатора

2.4.1 Огляд конструкції корпусів датчиків на основі ЛРДТ

Корпуси сучасних датчиків для ЛРДТ виготовляють здебільшого прямокутної або циліндричної форми з металу або міцного пластику. Нижче приведено декілька варіантів конструкції корпусів для датчиків ЛРДТ, що зараз доступні на ринку.

1. Продукт фірми Sensotec моделі DLB, DLF та JEC-C. Дані датчики відрізняються розмірами корпусу та діапазоном вимірюваного переміщення. Це датчики у циліндричному металевому корпусі виготовленому з нержавіючої сталі. На рис. 2.6 зображено схему конструкції датчика даного типу.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		21

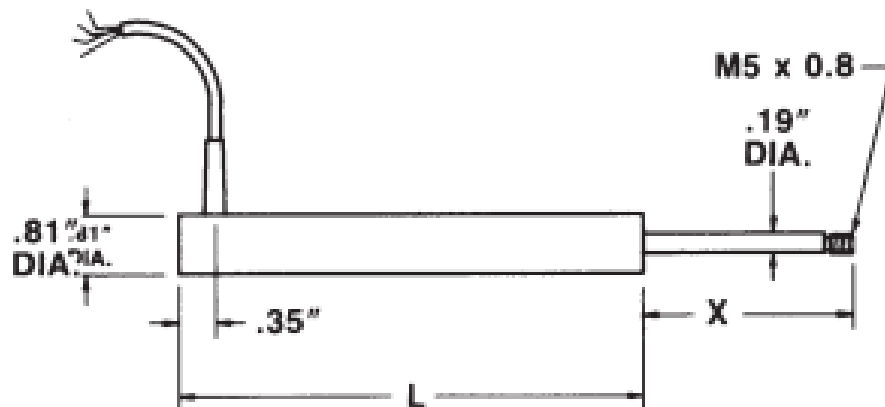


Рис. 2.6 Схема конструкції датчика ЛРДТ
Sensotec моделі DLB і DLF [3]

2. Продукт фірми Sensotec моделі LW7U, LW7C та LW7S. Дані датчики відрізняються розмірами корпусу та діапазоном вимірюваного переміщення. Це датчики у циліндричному металевому корпусі виготовленому з нержавіючої сталі. Основною їх відмінністю є повністю герметичний корпус. На рис. 2.7 зображено зовнішній вигляд датчика даного типу.

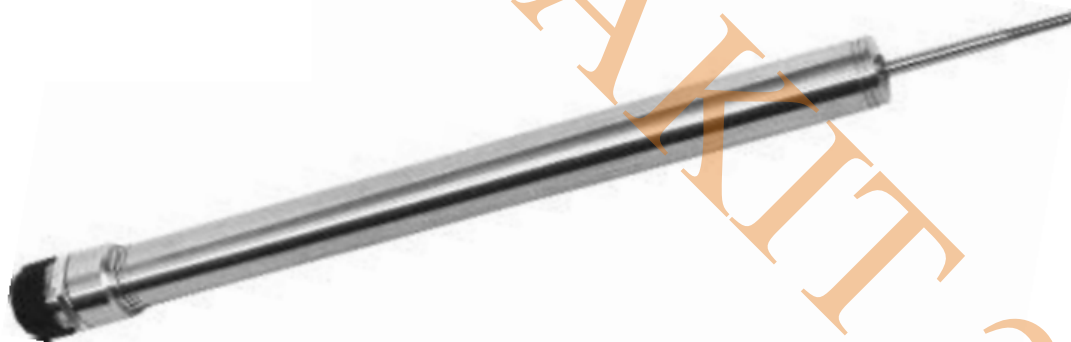


Рис. 2.7 Зовнішній вигляд датчика ЛРДТ
Sensotec моделі LW7U, LW7C та LW7S [3].

3. Також фірма Sensotec випускає моделі датчиків MS7A та MS7C.

Основною відмінністю яких є компактний розмір, водонепроникність та висока точність. Дані датчики також випускаються у циліндричному корпусі з нержавіючої сталі. На рис. 2.8 зображено конструкцію датчиків даного типу.

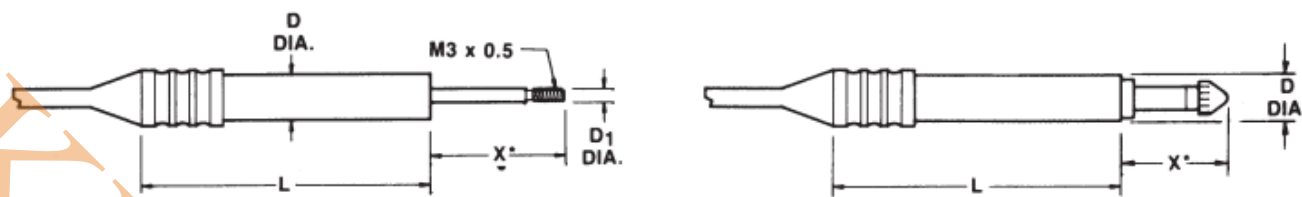


Рис. 2.8 Схема конструкції датчиків ЛРДТ
Sensotec моделі MS7A та MS7C [4].

У результаті аналізу доступних на ринку датчиків для ЛРДТ можна помітити, що найбільш розповсюдженим для датчиків даного типу є металевий циліндричний корпус, що виготовляють, як правило, з нержавіючої сталі або високоякісних сталей з захисним екрануванням. Також досить розповсюдженим є підвищений захист корпусів від вологи, бруду та агресивних речовин.

2.4.2 Короткий огляд технічних характеристик датчиків на основі ЛРДТ

1. Датчик DC Lvdт Itarget Sourcing Co., Ltd. призначений для вимірювання переміщення. Датчик може живитися від однополярного джерела 9 - 28 В, величина вихідного сигналу становить 0 - 5 В або 4 - 20 мА. Електрична схема герметично закрита в середині корпусу з нержавіючої сталі. Даний датчик володіє високою точністю та стабільністю хорошою роздільною здатністю та повторюваністю показів. Зовнішній вигляд наведено на рис. 2.9.



Рис. 2.9 Зовнішній вигляд датчика DC LvdT Itarget Sourcing Co., Ltd.

2. Датчик переміщення Ns-Wy03

Високоточний датчик переміщення виконаний у металевому корпусі, що володіє високою надійністю стабільністю роботи роздільною здатність та швидкістю реакцію на переміщення штоку.

Характеристики:

- точність для різних моделей - 0,05%, 0,1%, 0,25%;
- повторюваність показів - 0,002 мм;
- вихідний сигнал - 4-20 мА, 0-5 В, 0-10 В, $\pm 0-5$ В, $\pm 0-10$ В;
- напруга живлення - 9, 12, 15, 24 В DC;
- робоча температура -30~100 °С;
- Режим високоточного вимірювання.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.10 Зовнішній вигляд датчика переміщення Ns-Wy03

3. Датчик переміщення фірми Miram модель KTC-225mm

Особливості:

Пристрій працює на основі вимірювання опору;

Номінальний опір 5 кОм;

Датчик лінійно позиційного типу;

Інтервал вимірювання переміщень 225 мм;

Максимальна швидкість переміщення штоку складає 10 м/с;

Точність вимірювання $\pm 0,1\%$;

Повторюваність показів 0,01 мм;

Робочий діапазон температури -50 - +160 °C;

Варіація вимірюваного переміщення від 75 до 2000 мм для різних моделей.:

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.11 Зовнішній вигляд датчика переміщення Miram модель KTC-225mm

					КМР.АКТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		26

3 ВИБІР ТА ПРОЕКТУВАННЯ ДАТЧИКА ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

3.1 Розрахунок лінійно регульованого диференціального трансформатора та його передавальної характеристики

Згідно з технічним завданням курсової роботи основним завданням виконання даного розділу є виконання розрахунку датчика переміщення на базі лінійного регульованого диференціального трансформатора. У технічному завданні зазначено, що переміщення повинно вимірюватися в діапазоні ± 300 мм з точністю $\pm 1\%$. Чутливість ЛРДТ повинна складати 3 мВ/мм а напруга збудження первинної обмотки 12 В з частотою від 1 кГц.

Проектування лінійно регульованого диференціального трансформатора розпочнемо з висловлення наступних припущень:

1) форму та взаємне розташування котушок первинної та вторинної обмоток прийmemo такі як на рис.3.1;

2) кожна з трьох котушок має однакове число витків N з рівномірною намоткою та однакову довжину l ;

3) довжина осердя l_s вдвічі більша за довжину котушки l , тобто $l_s = 2l$;

4) довжина котушки набагато більша за товщину намотки, тому візьmemo дрiт діаметром $d = 0.1$ мм;

5) для спрощення розрахунку прийmemo, що діаметри котушок рівні діаметру осердя.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

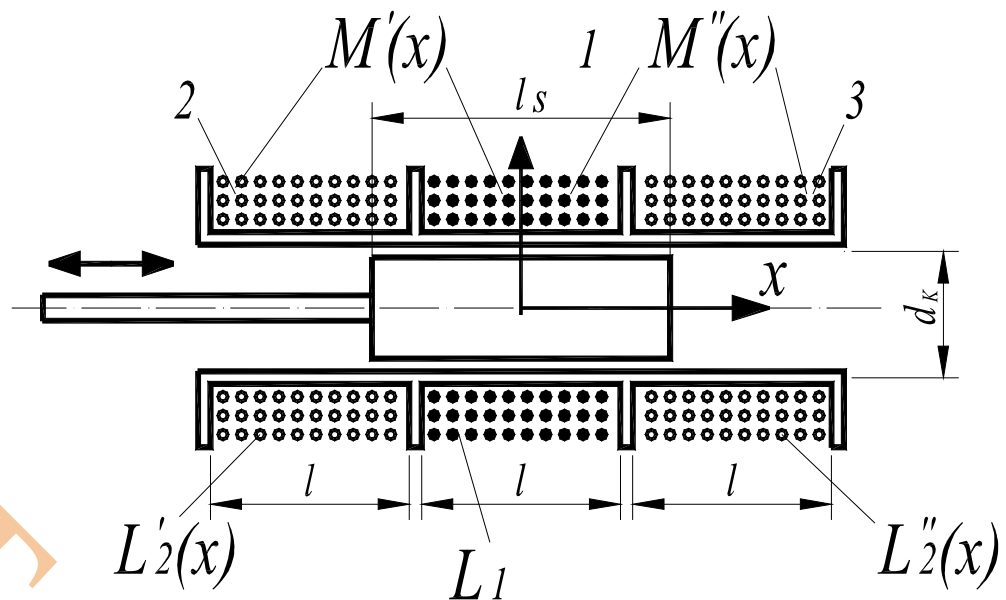


Рис.3.1. Схема лінійно регульованого диференціального трансформатора.

1 – первинна обмотка, 2, 3 – вторинні обмотки.

На початку розрахунку знайдемо L_1 , $L'_2(x)$ та $L''_2(x)$. Індуктивність котушки первинної обмотки не залежить від переміщення осердя x і рівна

$$L_1 = \mu_0 \mu_f \frac{N^2 s}{l}, \quad (3.1)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна проникність повітря, μ_f – відносна магнітна проникність матеріалу осердя, s – площа котушки, рівна $s = \frac{\pi d^2}{4}$.

Далі визначимо $L'_2(x)$. Коли осердя розташовується по центру ЛРДТ (рис.3.1) (переміщення $x = 0$), воно заглиблене в кожну з вторинних обмоток на відстань l_f . Припустимо, що осердя переміщається вліво. Тоді величина заглиблення в ліву котушку складе $l_f + x$, а в праву – $l_f - x$.

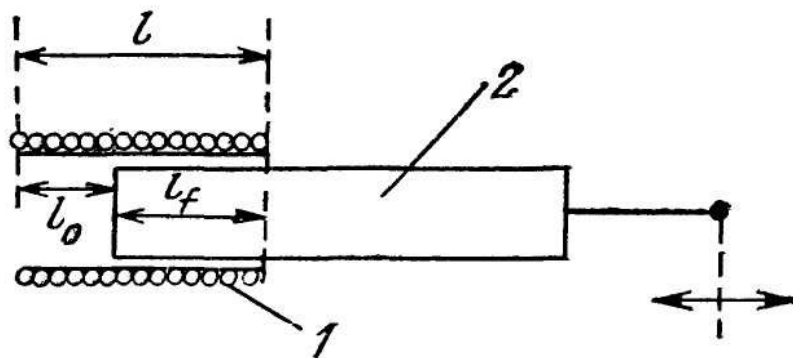


Рис.3.2. Принципова схема котушки з рухомим осердям.

1 – котушка, 2 – осердя.

Задача розрахунку індуктивності котушки з рухомим осердям (рис.3.2) розглянута в [1]. Індуктивність визначається за наступною формулою

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} \left[s_0 l + (\mu_f - 1) s_f l_f + 2k \sqrt{s_0 (s_0 + (\mu_f - 1) s_f)} \sqrt{(l - l_f) l_f} \right] \quad (2.2)$$

Згідно висловлених припущень $s_0 = s_f$. Коефіцієнт зв'язку ($0 \leq k \leq 1$) приймемо рівним $k = 1$. Тоді

$$L = \mu_0 \frac{N^2 s}{l^2} \left[l + (\mu_f - 1) l_f + 2 \sqrt{\mu_f} \sqrt{(l - l_f) l_f} \right]. \quad (3.3)$$

В нашому випадку для лівої котушки

$$l'_f(x) = \frac{l_s - l}{2} + x. \quad (3.4)$$

Тоді індуктивність лівої котушки $L'_2(x)$ рівна

$$L'_2(x) = \mu_0 \frac{N^2 s}{l^2} \left[l + (\mu_f - 1) l'_f(x) + 2 \sqrt{\mu_f} \sqrt{(l - l'_f(x)) l'_f(x)} \right]. \quad (3.5)$$

Індуктивність правої котушки $L''_2(x)$ знаходиться аналогічно. В цьому випадку

$$l''_f(x) = \frac{l_s - l}{2} - x, \quad (3.6)$$

$$L_2''(x) = \mu_0 \frac{N^2 s}{l^2} \left[l + (\mu_f - 1) l_f''(x) + 2\sqrt{\mu_f} \sqrt{(l - l_f''(x)) l_f''(x)} \right]. \quad (3.7)$$

Далі потрібно розрахувати взаємоіндуктивності $M'(x)$ та $M''(x)$. Розрахунок взаємоіндуктивності двох котушок з однаковими діаметрами розглянуто в [4]. Якщо котушки 1 та 2 розташовані на одній осі і між ними немає зазору то їх взаємоіндуктивність рівна

$$M_{12} = \frac{1}{2} (L_{12} - L_1 - L_2), \quad (3.8)$$

де L_1 та L_2 – власні індуктивності котушок 1 та 2, а L_{12} – власна індуктивність котушки, складеної з котушок 1 та 2. Тому для визначення взаємоіндуктивностей $M'(x)$ та $M''(x)$ спочатку треба розрахувати індуктивності $L'_{12}(x)$ та $L''_{12}(x)$. Тут $L'_{12}(x)$ – власна індуктивність котушки, складеної з котушок 1 та 2 (рис.3.1), а $L''_{12}(x)$ – власна індуктивність котушки, складеної з котушок 1 та 3.

Індуктивності $L'_{12}(x)$ та $L''_{12}(x)$ розраховуються аналогічно $L'_2(x)$ та $L''_2(x)$. Слід відмітити, що для такої складеної котушки довжина рівна $2l$, а число витків – $2N$. Заглиблення осердя в даному випадку рівне:

для $L'_{12}(x)$

$$l'_{12f}(x) = \frac{7l - 3l_s}{2} + x \quad (3.9)$$

для $L''_{12}(x)$

$$l''_{12f}(x) = \frac{7l - 3l_s}{2} - x \quad (3.10)$$

Тоді індуктивності рівні $L'_{12}(x)$ та $L''_{12}(x)$ визначається за формулами:

$$L'_{12}(x) = \mu_0 \frac{(2N)^2 s}{(2l)^2} \left[2l + (\mu_f - 1)l'_{12f}(x) + 2\sqrt{\mu_f} \sqrt{(2l - l'_{12f}(x))l'_{12f}(x)} \right] =$$

$$= \mu_0 \frac{N^2 s}{l^2} \left[2l + (\mu_f - 1)l'_{12f}(x) + 2\sqrt{\mu_f} \sqrt{(2l - l'_{12f}(x))l'_{12f}(x)} \right] \quad (3.11)$$

$$L''_{12}(x) = \mu_0 \frac{N^2 s}{l^2} \left[l + (\mu_f - 1)l''_{12f}(x) + 2\sqrt{\mu_f} \sqrt{(l - l''_{12f}(x))l''_{12f}(x)} \right] \quad (3.12)$$

Взаємодуктивності $M'(x)$ та $M''(x)$ розраховуються на основі формул (3.1), (3.5), (3.7) і (3.11-12)

$$M'(x) = \frac{1}{2} (L'_{12}(x) - L_1 - L'_2(x)) \quad (3.13)$$

$$M''(x) = \frac{1}{2} (L''_{12}(x) - L_1 - L''_2(x)) \quad (3.14)$$

Згідно технічного завдання для збудження ЛРДТ використовується змінна синусоїдальна напруга $E_{СКЗ} = 12В$ і частотою $f = 1кГц$. При збудженні ЛРДТ напругою

$e_1 = E_1 \cos(\omega t)$ (рис.3.2) вихідна напруга $U_{ВИХ}$ буде рівна [1]

$$U_{ВИХ}(x) = \frac{j\omega(M'(x) - M''(x))}{R_1 + j\omega L_1} e_1, \quad (3.15)$$

де R_1 – активний опір первинної обмотки.

Враховуючи, що $E_1 = \sqrt{2}E_{СКЗ}$, а $\omega = 2\pi f$

$$U_{ВИХ}(x) = \left| \frac{j2\pi f(M'(x) - M''(x))}{R_1 + j2\pi f L_1} \sqrt{2}E_{СКЗ} \cos(2\pi f t) \right|. \quad (3.16)$$

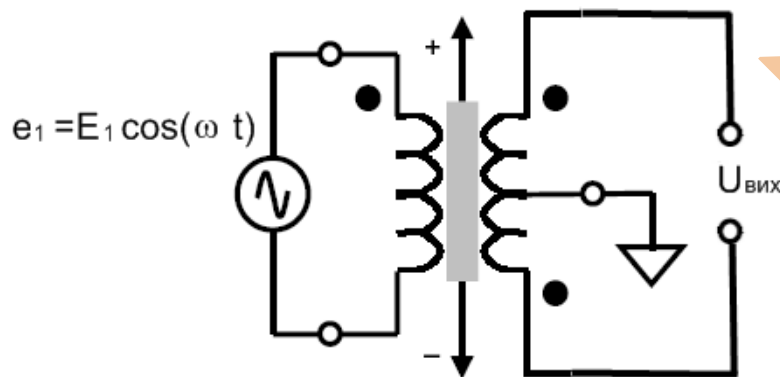


Рис.3.3. Електрична схема ЛРДТ.

Активна складова опору первинної обмотки рівна

$$R_1 = \rho \frac{l_{np}}{S_{np}}, \quad (3.17)$$

де ρ – питомий опір матеріалу провода, а l_{np} та S_{np} – довжина і площа поперечного перерізу дроту. Беремо мідний провід ($\rho = 0.0175 \text{ Ом} \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$) діаметром $d_{np} = 0.1 \text{ мм}$. Довжина проводу визначається як

$$l_{np} = \pi d_K N, \quad (3.18)$$

де d_K – діаметр котушки, N – число витків. Тоді R_1 рівний

$$R_1 = \rho \frac{N d_K}{d_{np}^2} = 1.531 \text{ Ом} \quad (3.19)$$

У якості матеріалу осердя виберемо Сталь 45. Відносна магнітна проникність для таких матеріалів складає $\mu_f = 700$.

Виходячи з складності математичних розрахунків усі обчислення були здійснені на комп'ютері за допомогою пакету MathCad.

Згідно технічного завдання чутливість розробленого лінійно регульованого диференціального трансформатора повинна бути $3 \text{ мВ}(U_{\text{вих}})/\text{мм}/1 \text{ В}(U_{\text{вх}})$. Згідно проведених розрахунків потрібна чутливість забезпечується при наступних параметрах ЛРДТ:

- число витків кожної з котушок рівне $N = 2000$;
- діаметр котушки рівний $d_K = 10 \text{ мм}$;
- довжина котушки рівна $l = 100 \text{ мм}$;

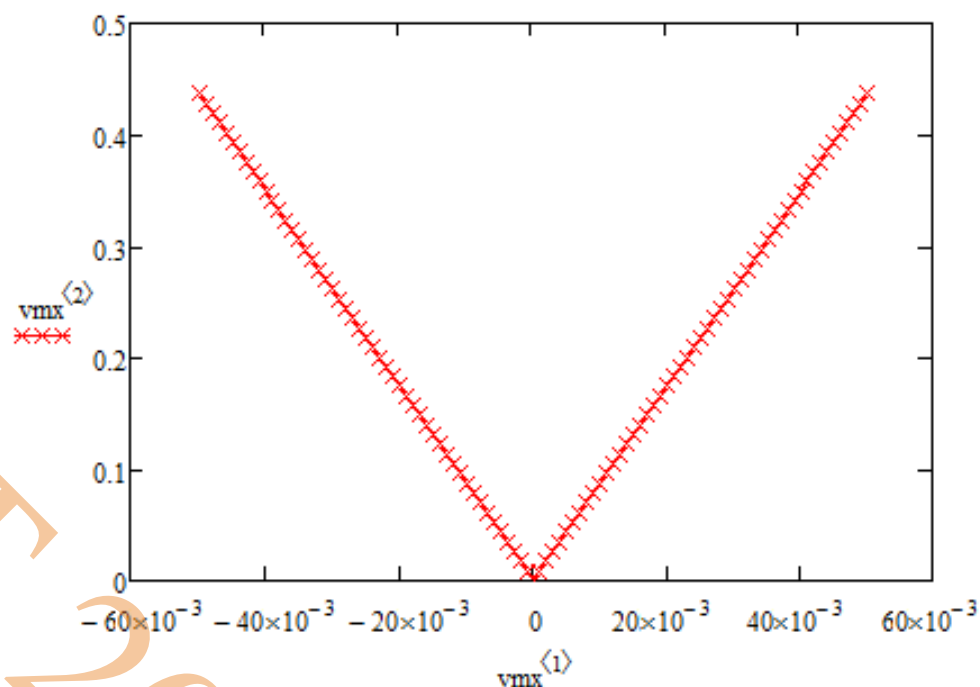


Рис.3.4 Залежність зміни напруги на крайніх виводах вторинних обмоток ЛРДТ від переміщення сердечника

За таких параметрів котушок чутливість перетворювача становить $3.28 \text{ мВ}(U_{\text{ВІХ}})/\text{мм}/1 \text{ В}(U_{\text{ВХ}})$.

3.2 Огляд схем нормуючої електроніки для датчиків на базі ЛРДТ

Слід відзначити, що у схемах ЛРДТ розглядуваної конструкції, коли сердечник знаходиться в центрі, істинного нуля на виході не буде, внаслідок неузгодженості вторинних обмоток і наявності індуктивності розсіювання. До того ж просте вимірювання вихідної напруги V_{OUT} не дасть інформації про те, по який бік від нульової позиції знаходиться сердечник.

Коло нормування, яке ліквідує зазначені проблеми, і в якому величини вихідних напруг віднімаються, показано на рис.3.5. Використання даного методу дозволяє вимірювати переміщення сердечника в позитивному або негативному напрямку від центру конструкції.

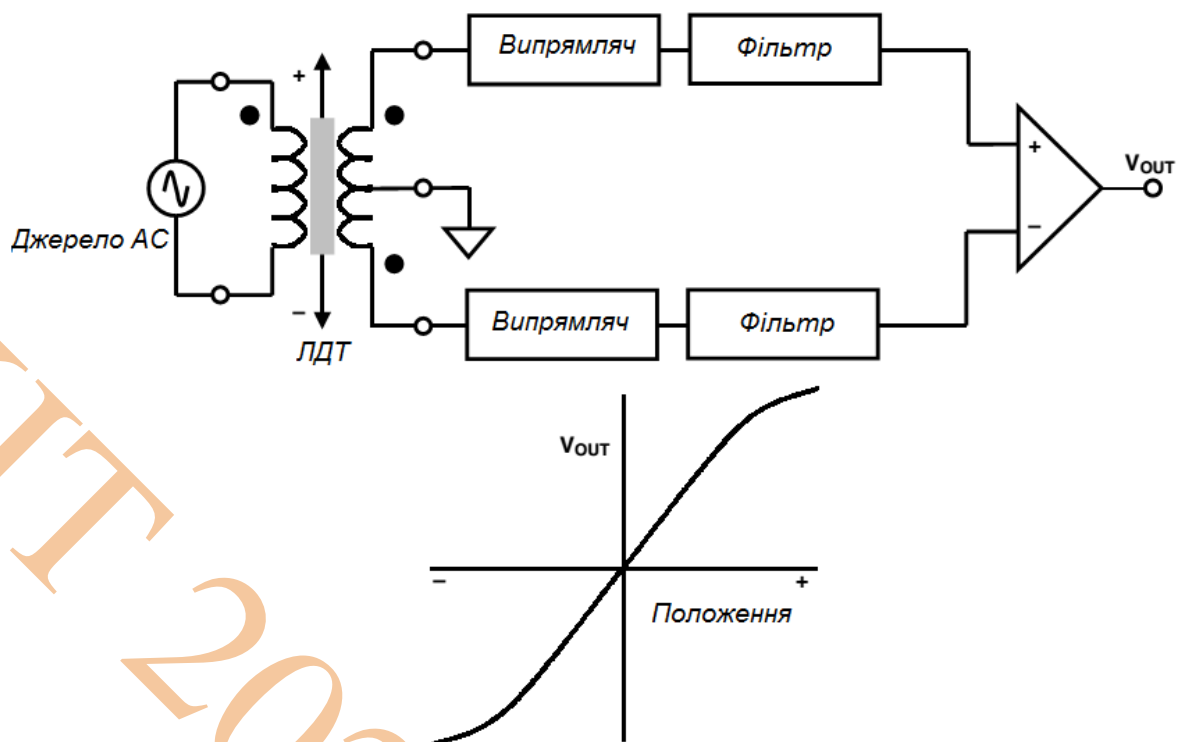


Рис. 3.5 Покращена схема обробки вихідних сигналів з ЛДТ

У якості кола яке, вимірює абсолютну величину напруги можна використовувати діод-ємнісний випрямляч, в той же час для більшої точності і лінійності краще використовувати прецизійний випрямляч, як продемонстровано на рис.1.6.

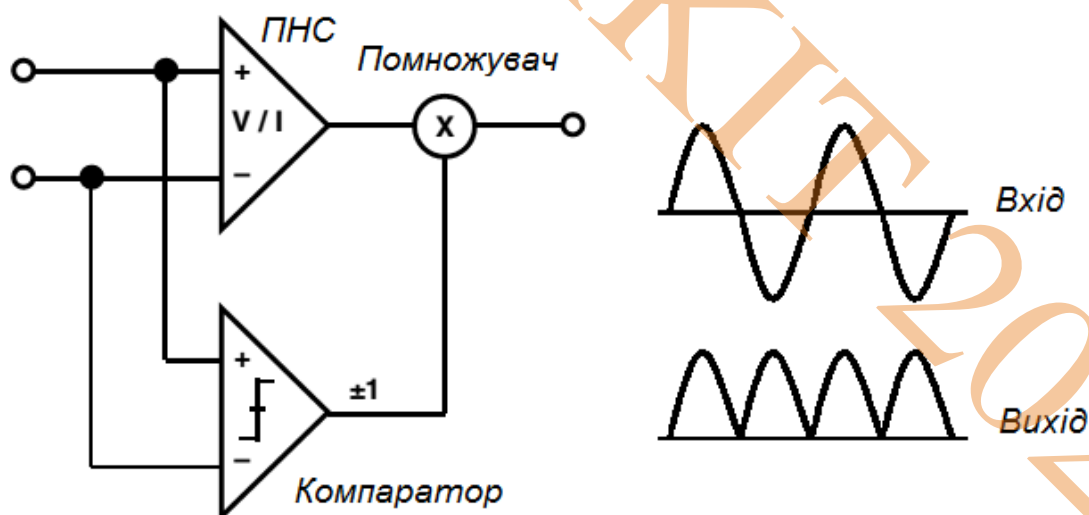


Рис. 3.6 Коло прицезійного виділення абсолютного значення напруги

Вхідний сигнал прикладається до перетворювача напруга / струм (ПНС), який, у свою чергу, подає свій вихідний сигнал на вхід аналогового помножувача. Знак сигналу на диференціальному вході визначається компаратором, вихід якого змінює знак вихідного сигналу ПНТ через аналоговий помножувач. Результуюча вихідна напруга є точною копією абсолютної величини вхідної напруги. Ця схема добре відома розробникам інтегральних схем (ІС) і вона добре вписується в сучасні біполярні процеси.

На рис.3.7 показана мікросхема нормування сигналів з ЛРДТ AD598 індустриального стандарту, яка виконує всю необхідну обробку сигналів з даних пристроїв. За допомогою єдиного зовнішнього конденсатора можна міняти частоту збудження внутрішнього генератора від 20 Гц до 20 КГц. для детектування амплітудних значень входів каналів А і В використовується ланцюг вимірювання абсолютної величини, за яким слідують два фільтри. Для того щоб згенерувати відносну функцію $[A - B] / [A + B]$ використовуються спеціальні аналогові ланцюги. Відзначимо, що дана функція не залежить від амплітуди напруги збудження на первинній обмотці, безумовно, припускаючи, що сума вихідних напруг ЛРДТ залишається постійною по всьому робочому діапазону.

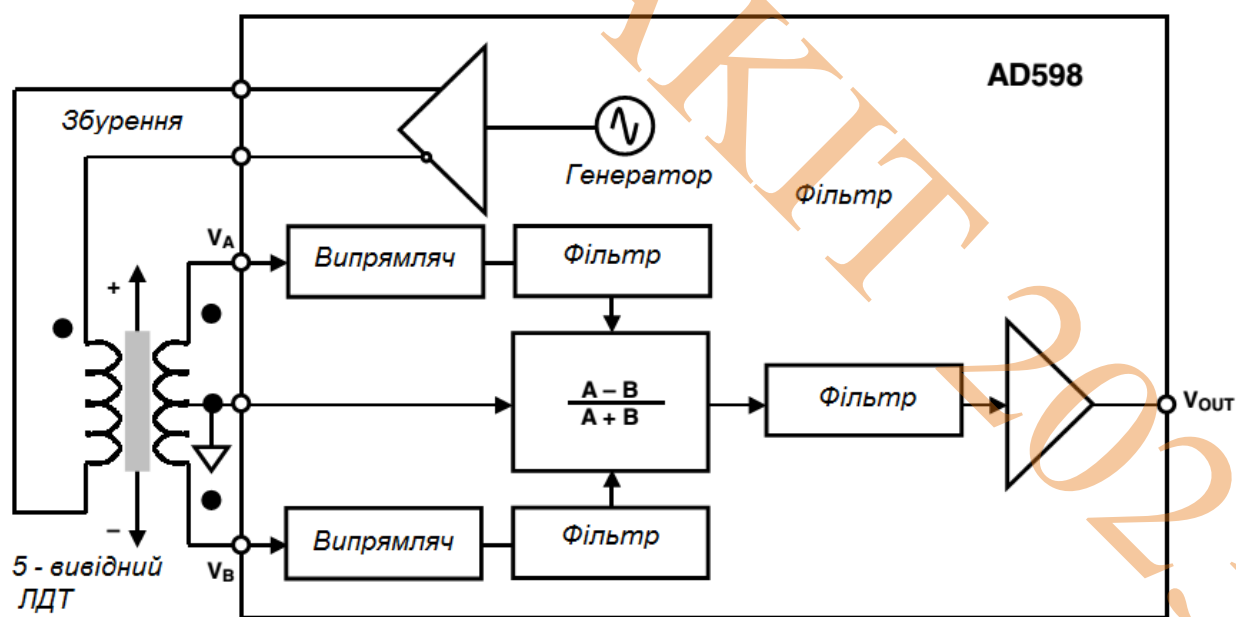


Рис. 3.7 Мікросхема нормування сигналів з ЛРДТ AD598

Остання схема є характерною для більшості ЛРДТ, але користувач повинен завжди консультиватися з виробником, якщо дана специфікація ЛРДТ відсутня в технічному описі. Відзначимо також, що даний метод вимагає використання 5-проводового ЛРДТ.

За допомогою єдиного зовнішнього резистора можна встановлювати напругу збудження на виході AD598 від 1 В до 24 В ВКВ. Здатність навантаження ІС становить 30 мА ВКВ. AD598 може з'єднуватися з ЛРДТ по кабелю довжиною до 300 футів, і при цьому, схема не вносить фазових зрушень і не змінює абсолютної величини значення сигналів. Діапазон вихідних сигналів V_{OUT} складає ± 11 В при струмі 6 мА і вихідні сигнали можуть передаватися по кабелю довжиною до 1000 футів. величини вхідних напруг в точках V_A і V_B можуть зменшуватися до 100 мВ ВКВ.

3.3 Структурна схема первинного вимірювального перетворювача для датчика ЛРДТ

Базова конструкція ЛРДТ складається з трьох співвісних котушок, намотаних на каркасі з центральним отвором (рис. 3.1). В отворі каркасу розміщують шток з феромагнітним сердечником, що здатен вільно переміщуватися в осьовому напрямку. Центральна котушка виконує роль обмотки збудження. На неї подається напруга збудження синусоїдальної форми. Бокові котушки, як правило, включені за диференціальною схемою та виконують роль сигнальної обмотки. Коли феромагнітний сердечник знаходиться в центрі (нульове положення), вихідна напруга сигнальної обмотки приблизно дорівнює нулю. Коли сердечник зміщується в будь-яку сторону щодо нульового положення, амплітуда вихідного сигналу зростає, поки сердечник не досягне деякого крайнього положення. Фаза вихідної напруги щодо напруги збудження дорівнює 0 або 180° в залежності від напрямку переміщення сердечника від нульового положення. Приблизний

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		36

діапазон вимірювання переміщень (X) відповідає ходу штока з одного крайнього положення в інше.

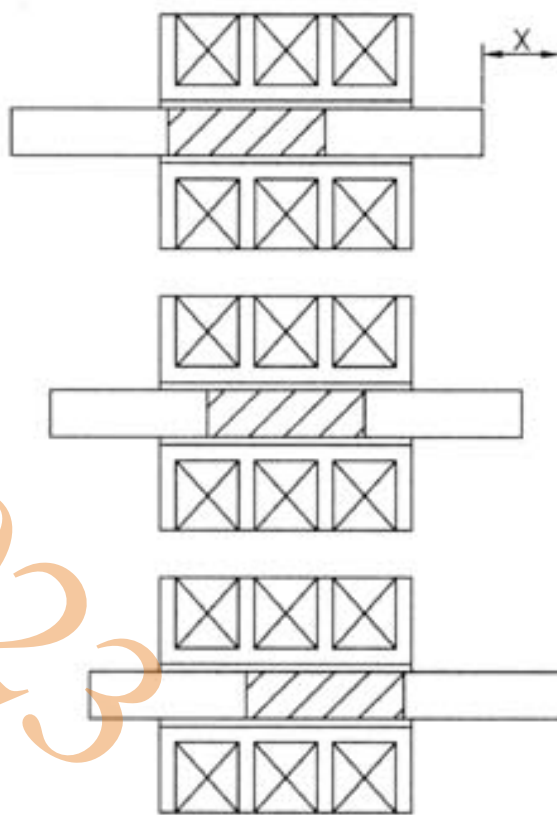


Рис. 3.1 Конструкція та схема роботи датчика ЛРДТ

Електронний перетворювач для роботи з ЛРДТ побудований по блок-схемі, наведеній на рис. 3.2 Обмотка збудження (1) підключається до генератора синусоїдального сигналу (2). Напруга з сигнальної обмотки, амплітуда і фаза якого залежать від положення феромагнітного сердечника по відношенню до котушок, посилюється підсилювачем (3) і подається на синхродетектор (4). Сигнал з виходу синхродетектора подається на фільтр низьких частот (5 і далі використовується за призначенням.

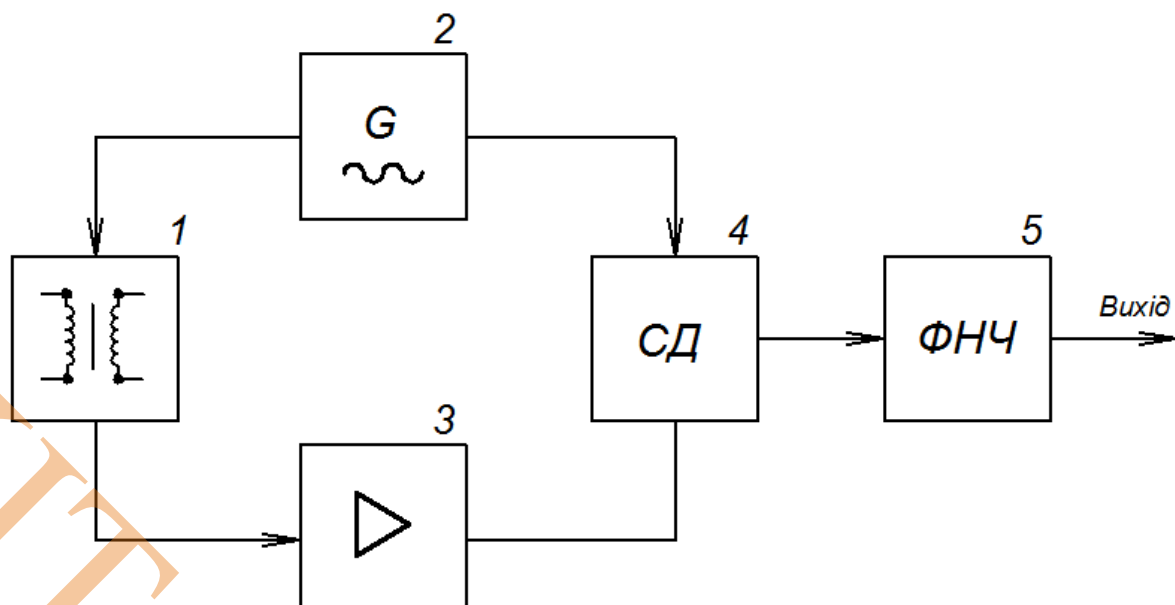


Рис. 3.2 Структурна схема електронного перетворювача сигналів з ЛРДТ

3.4 Електрична принципова схема первинного вимірювального перетворювача для датчика ЛРДТ

Для роботи з ЛРДТ можуть використовуватися спеціалізовані мікросхеми, наприклад, AD598 / 698 (Analog Devices) або NE5521 (Philips). Однак перша коштує досить дорого (близько 50 \$), а друга, знята з виробництва з причини втрати маски. Тому актуальною є розробка власної схеми електронного перетворювача на дискретних елементах. На рис. 3.3 приведено електричну принципову схему перетворювача ЛРДТ..

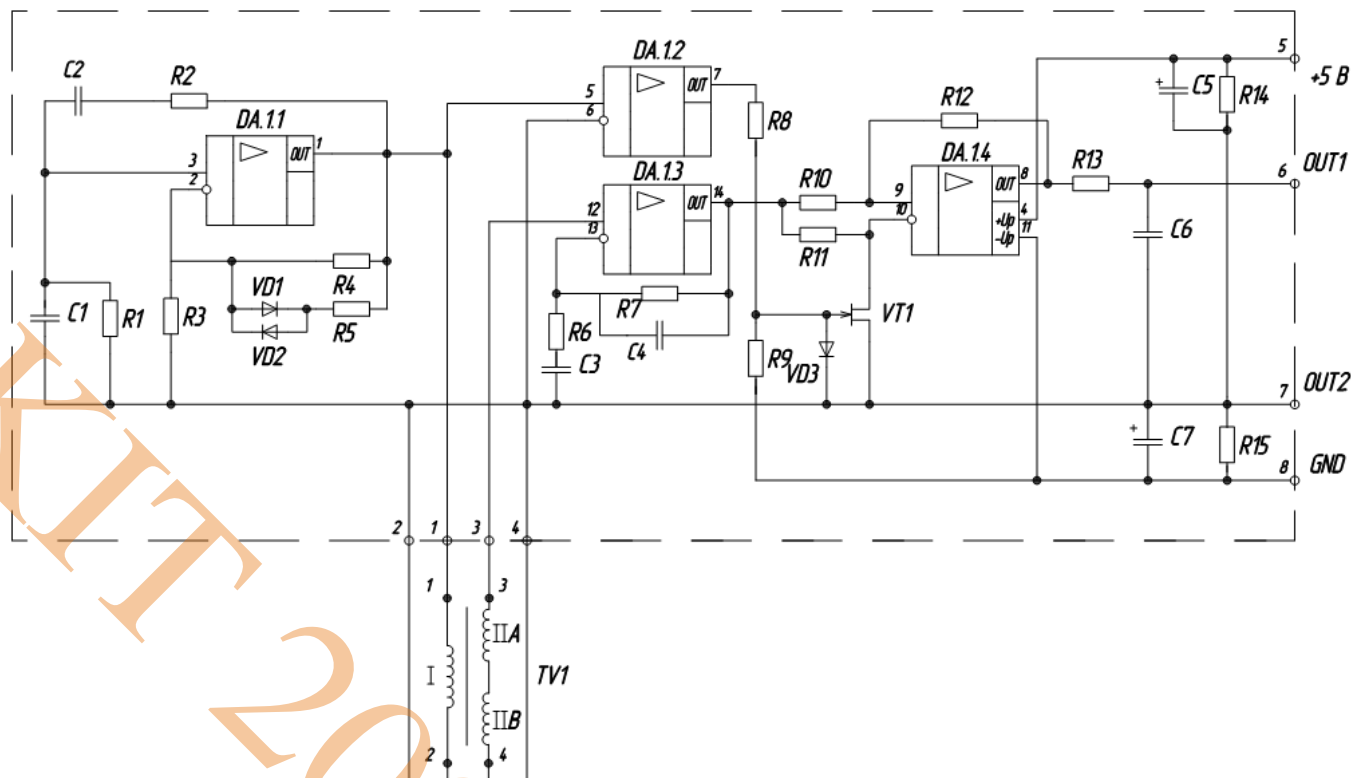
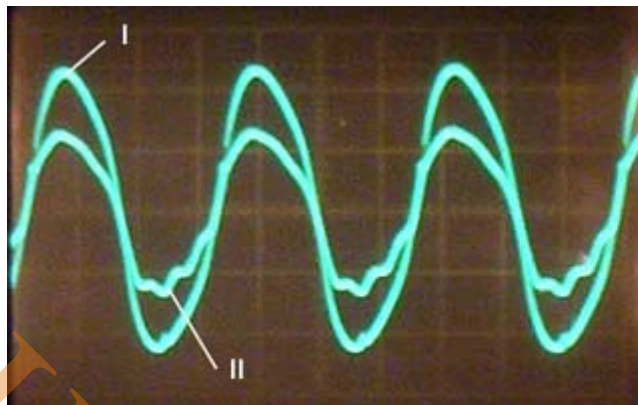


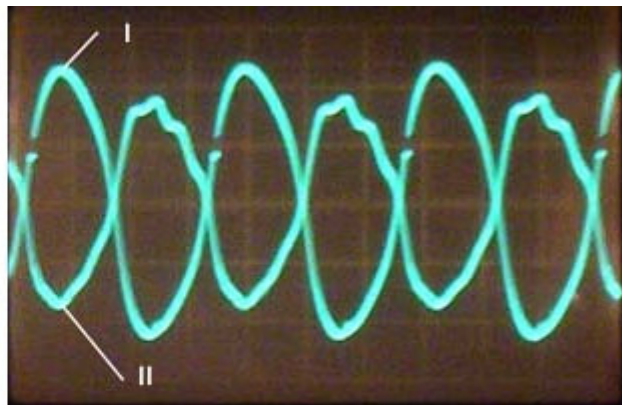
Рис. 3.3 Електрична принципова схема перетворювача сигналів ЛРДТ

На базі операційного підсилювача (ОП) DA1.1 (LM324) зібраний генератор синусоїдальної напруги частотою 1 кГц з амплітудним значенням приблизно 1 В. Ця напруга подається на обмотку збудження I ЛРДТ. На рис. 3.4 показані осцилограми сигналів на обмотці збудження (I) і сигнальній обмотці (IIA + IIB) при двох крайніх положеннях штока (феромагнітного сердечника).

Напруга з сигнальної обмотки ЛРДТ подається на підсилювач DA1.3 з смуговим фільтром. На ОУ DA1.2, DA1.4 зібраний синхродетектор, до виходу якого підключений ФНЧ на елементах R13 С6. Для живлення електронного перетворювача використовується однополярне джерело напругою +12 В. Споживаний струм не перевищує 4 мА. Діапазон зміни вихідної напруги (між контактами OUT1 і OUT2) становить -0.3 ... +0.3 В, що відповідає діапазону вимірюваних переміщень ± 50 мм (від одного крайнього положення штока до іншого), тобто чутливість датчика в середньому становить 3 мВ / мм.



а)



б)

Рис. 3.4 Сигнали на обмотці збудження і сигнальній обмотці LVDT при крайніх положеннях феромагнітного сердечника (I - обмотка збудження: 0.5 В / поділку., 50 мкс / поділку., II - сигнальна обмотка: 0.2 В / поділку, 50 мкс / поділку.).

3.5 Розрахунки електричних параметрів принципової схеми первинного вимірювального перетворювача

1. При вимірюванні переміщення з частотою $f_{\text{мех}}$, то частота напруги збудження ЛРДТ f розраховується, як:

$$f = 10 \times f_{\text{мех}} \quad (3.1)$$

оскільки в технічному завданні нам задано, що $f = 1000$ Гц, то згідно формули 2.1, ми отримаємо $f = 100$ Гц.

2. За формулою обчислюємо величину конденсатора C_1 :

$$C_1 = 35 \times 10^{-6} \times \frac{1}{3500} = 10 \left[\frac{\Phi}{\frac{\Gamma_{\text{ц}}}{\Gamma_{\text{ц}}}} \right] = 10 \text{ нФ} \quad (3.2)$$

3. Розрахуємо коефіцієнт передачі напруги (КПН) за формулою:

$$\text{КПН} = S_{\text{лрдт}} \times d, \quad (3.3)$$

де $S_{\text{лрдт}}$ – це чутливість лінійно регульованого диференціального трансформатора, а d – максимальне віддалення магнітного осердя від нульового положення.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		40

Згідно формули 3.3 маємо,

$$\text{КПН} = 50\text{мВ} \times 10^{-3} \times 6\text{мм} = 0,3.$$

4. З рис.3.5 при 10 СКЗ обираємо номінал резистора. $R_1 \approx 1,8 \text{ кОм}$.

5. Конденсатори C_1, C_2, C_3 є рівними і обчислюються за формулою:

$$C = 10^{-4} \times 1/350 = 330 \left[\Phi \times \Gamma_{\Pi} / \Gamma_{\Pi} \right] = 330\text{нФ} \quad (3.4)$$

6. Згідно з рівності

$$U_{\text{вих}} = S_{\text{лрдт}} \times d \times R_2 \quad (3.5)$$

$$R_2 = U_{\text{вих}} / S_{\text{лрдт}} \times d = \left[\text{В} / \text{мВ} \times \text{мм} \times \text{мкА} \right] = 68 \text{ кОм} \quad (3.6)$$

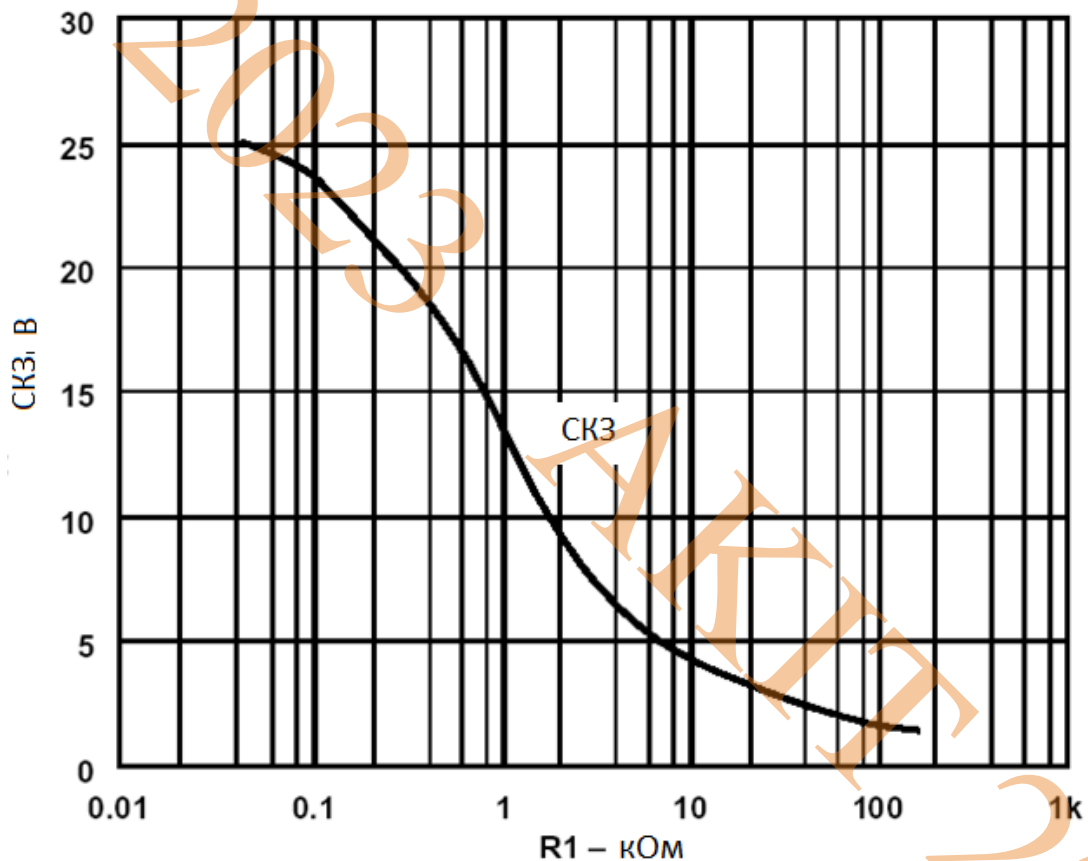


Рис. 3.5 Залежність резистора R_1 від СКЗ [8].

7. За умовою сума опорів R_5 і R_6 не повинна перевищувати 300 кОм, тому можемо обрати $R_5 = R_6 = 100 \text{ кОм}$.

8. Згідно завдання C_5 повинен бути номіналом від 0,1 мкФ до 1 мкФ, а C_8, C_7 мають бути рівні 10 мкФ та 0,1 мкФ відповідно і конденсатор $C_6 = 1000 \text{ пФ}$.

3.6 Огляд основних компонентів схеми первинного вимірювального перетворювача

Огляд мікросхеми LM324:

Мікросхема LM324 фірми Texas Instruments представляє собою недорогий чотирьох каналний операційний підсилювач з диференційними входами. Вони мають декілька значних відмінностей у порівнянні з типовими операційними підсилювачами та їх використанням. Даний підсилювач може працювати як при низькій напрузі живлення до 3 В, так і високими 32 В і вище та струмами на рівні однієї п'ятої допустимих струмів стабілізатора побудованого на основі підсилювача MC1741. У загальних режимах вхідний діапазон напруг включає від'ємні значення напруги, що усуває необхідність використання додаткових компонентів для корекції напруги зміщення при багатьох варіаціях застосування. Діапазон вихідних напруг також включає від'ємні значення по відношенню до напруг живлення.

Основні особливості:

- захист виходів від короткого замикання;
- диференціальний вхідний каскад;
- одно полярне живлення: від 3 до 32 В;
- низький вхідний струм зміщення 100 пА макс. для (LM324A);
- чотири підсилювачі в одному корпусі;
- внутрішня компенсація;
- загальний діапазон режимів, що поширюється на негативні напруги живлення;
- високий галузевий стандарт по терморегулюванню.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		42

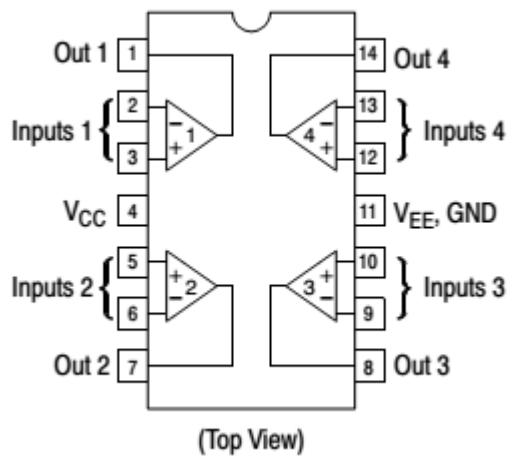


Рис. 3.6 Опис виводів мікросхеми LM324 [3]

Таблиця 3.1 Електричні параметри мікросхеми LM324.

Величина	Позначення	Значення	Одиниці
Напруга живлення: одно полярне	V_{CC}	32	В
дво полярне	V_{CC}, V_{EE}	± 16	
Диференціальний вхідний діапазон напруги	V_{IDR}	± 32	В
Загальний вхідний діапазон напруги	V_{ICR}	-0,3 до 32	В
Тривалість короткого замикання на виході	T_{SC}	неперерв.	
Температура сполучення	T_J	150	$^{\circ}\text{C}$
Тепловий опір: для корпусу	$R_{\theta JA}$	118	$^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$
646		156	
751A		190	
948G			
Температура зберігання	T_{stg}	-65 до +150	$^{\circ}\text{C}$
Захист ESD по будь-кому виводу	V_{esd}	2000	В
		200	
Діапазон робочих температур навколишнього середовища	T_A	0 до +70	$^{\circ}\text{C}$

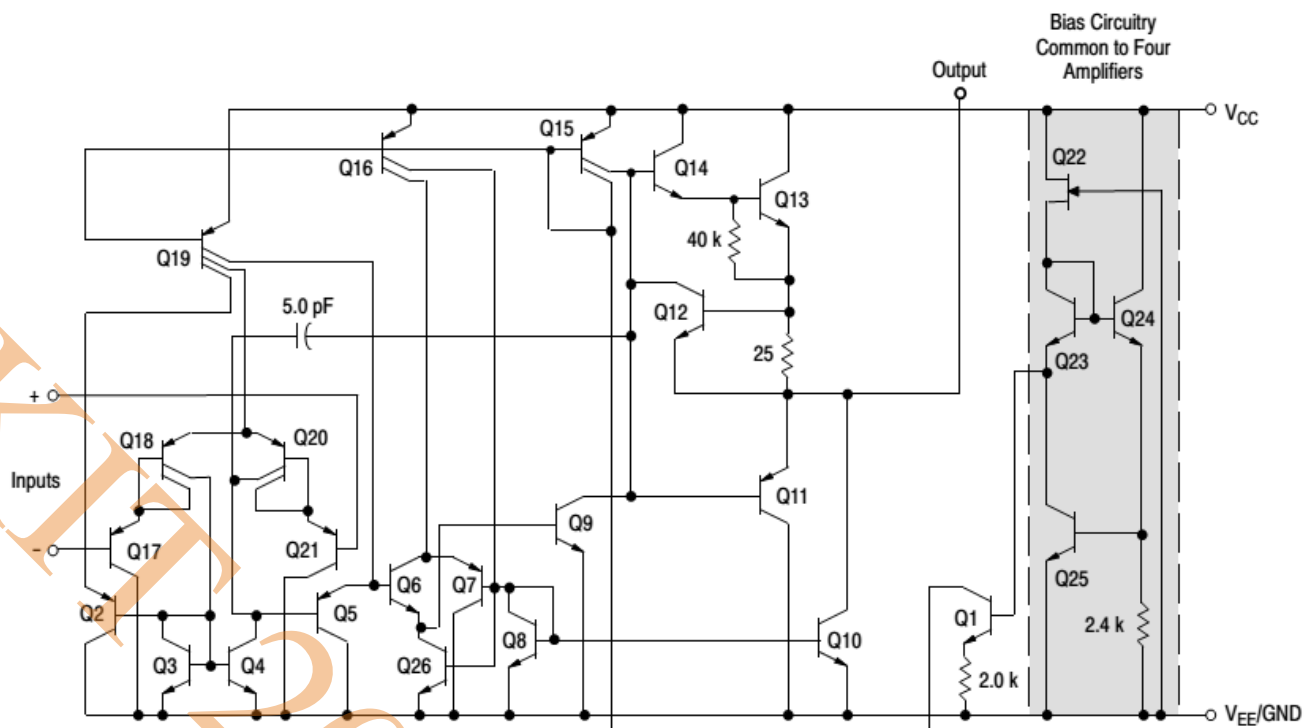


Рис. 3.6 Схема внутрішньої будови каскаду підсилювача LM324 [3]

У мікросхемах серії LM324 вбудовано чотири двоступеневі операційні підсилювачі з внутрішньою компенсацією. Кожен підсилювач складається з двох каскадів - диференціального пристрою введення Q20 та Q18 з вхідними буферними транзисторами Q21 та Q17 та диференціальним несиметричним перетворювачем Q3 і Q4. перший каскад виконує не тільки функцію підсилення, а й функцію перемикавання рівня та зміщення крутизни функції. зниження крутизни забезпечується за рахунок поділу на колекторах Q20 і Q18. Ще однією особливістю цього вхідного каскаду є те, що він може живитися як одно полярним живленням з землею так і дво полярним живленням. Другий каскад підсилення складається з класичного підсилювача по струму.

Кожен підсилювач захищено від внутрішньої напруги регулятором, з низьким коефіцієнтом температурного впливу, що дає підсилювачам хороші характеристики температурної стабільності разом з чудовим стабільністю по напрузі живлення.

Опис транзисторів серії 2N3821:

У схемі використано транзистори серії 2N3821 фірми Microsemi, що є доволі розповсюдженими та надійними компонентами РЕА. Зовнішній вигляд, та основні технічні характеристики приведено нижче.

Таблиця 3.2 Електричні параметри транзисторів 2N3821.

Параметри / умови випробування	Позначення	Значення	Одиниці
Напруга стік-затвор	V_{GS}	50	В
Напруга стік-виток	V_{DS}	50	В
Напруга затвор-витік	V_{DG}	-50	В
Струм затвора	I_{GF}	10.	мА
Споживана потужність при $T_A = +25^\circ\text{C}$	P_T	300	мВт
Робоча температура, температура зберігання	T_J, T_{stg}	Від -50 до +200	$^\circ\text{C}$

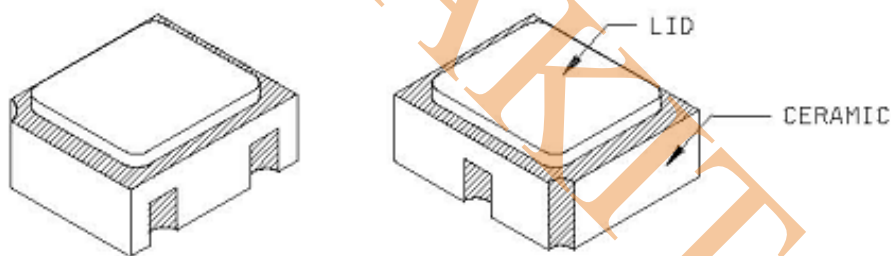


Рис. 3.7 Конструкція транзисторів 2N3821 [4]

Опис діодів 1N4148:

У схемі використано випрямляючі діоди серії 1N4148. До основних переваг даних діодів слід віднести високу швидкість перемикавання, планарну конструкцію та високу надійність. Зовнішній вигляд, та основні технічні характеристики приведено нижче.

Таблиця 3.3 Електричні параметри діоди серії 1N4148.

Параметри / умови випробування	Позначення	Значення	Одиниці
Не повторювана пікова зворотна напруга	V_{RM}	100	В
Пікова зворотна напруга	V_{RRM}	75	В
Зворотна напруга RMS	V_R	53	В
Вихідний струм	I_0	150	мА
Піковий прямий струм	I_{FSM}	500	мА
Споживана потужність	P_d	500	мВт
Температура зберігання та експлуатації	T_J, T_{stg}	Від -50 до +200	°C

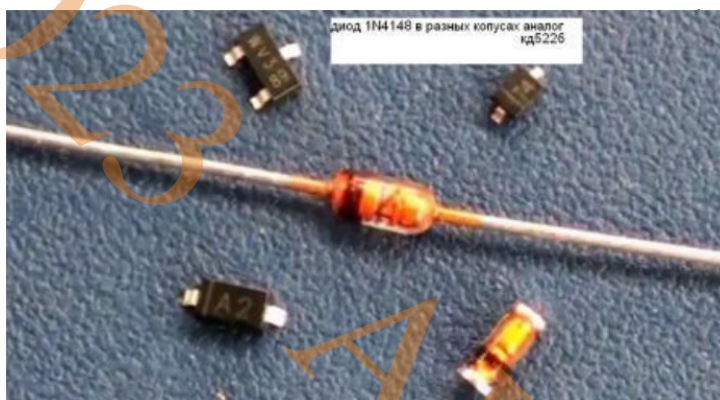


Рис. 3.8 Зовнішній вигляд діодів серії 1N4148 [5]

Дані компоненти максимально задовольняють покладені на них вимоги по таким параметрам к ціна, надійність, якість та доступність на ринку, що робить їх оптимальним вибором для побудови надійного електронного вузла для проектованого ЛРДТ.

3.7 Базові розрахунки по проектуванню друкованої плати первинного вимірювального перетворювача

Вихідними документами є ТЗ, принципова електрична схема вузла проектування та перелік документів до неї.

Доцільно використати для плати друкованої фольгований матеріал на основі склотекстоліту – Сф-1-35Г-1,5 (ГОСТ 10316-78).

Розміщення елементів конструкції ДП регламентується умовною координатною сіткою з двох взаємно перпендикулярних систем паралельних ліній, розміщених на однаковій відстані одна від одної. Ця відстань називається кроком координатної сітки.

Крок координатної сітки вибираємо рівним 1,27 мм.

Розрахунок площі монтажною зони S_m для високої густини монтажу виконуємо за формулою (3.7):

$$S_m = 4S_{mg} + 3S_{cg} + 1,5S_{kg} \quad (3.7)$$

де S_{mg} , S_{cg} , S_{kg} - відповідно сумарні установчі площі малогабаритних (всі мініатюрні елементи), середньо габаритні (МС у прямокутних корпусах, постійні опори вище 0,5 Вт, конденсатори у круглих корпусах і т. д.) та крупно габаритні (трансформатор, напівпровідникові прилади на радіаторах і т.д.).

Під установчою площею EPE розуміють площу прямокутника (квадрата), у яку вписується EPE разом з виводом та контактними площинками при його установці на плати друкованої.

Згідно вимог, наведених в технічному завданні на проектування, відповідно до ГОСТ 23751-86, розрахунок отворів та розмірів контактних площинок виконаємо для плати друкованої третього класу точності. Це доцільно, оскільки плати даного класу є найбільш простими у виготовленні, надійними та мають невисоку вартість.

Результати розрахунків установчих площ EPE наведені в таблиці 3.4.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.4 Розрахункова таблиця установчих площ під РЕА

Категорія становчих площ	Елементи та їх тип	Варіант установки за ОСТ 4.010.030-81	Установча площа одного елемента, мм ²	Кількість, шт.	Установча площа однотипних елементів, мм ²
S _{мг}	Мікросхема LM324	VIб	64,8	1	64,8
	Транзистор 2N3821	IV	20,5	1	20,5
	Конденсатор SAMS	Ia	150,5	2	301,0
Всього					386,3
S _{сг}	Отвори провідників	Ia	6,25	10	62,5
	Діод 1N4148	IV	12,22	3	36,7
	Конденсатор EPCOS	IV	11,28	5	56,4
	Резистори Симетрон	IV	11,28	13	146,64
Всього					302,3

Площа монтажно́ї зони згідно (3.7):

$$S_M = 4 S_{мг} + 3 S_{сг} = 4 \cdot 386,3 + 3 \cdot 302,3 = 2452,1 \text{ мм}^2$$

Лінійні розміри друкованої плати (ДП) складають 50x60 мм², що відповідає вимогам, наведеним у технічному завданні на проектування.

Для визначення розмірів отворів плати друкованої під виводи елементів необхідно знайти еквівалентні діаметри $d_{екв}$ виводів з прямокутним перерізом.

$$d_{екв} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3.8)$$

де a і b – сторони прямокутника.

Враховуючи допуски на розміри ЕРЕ, необхідність вільного проходження виводів у монтажних отворах, діаметри отворів повинні бути на $0,2 \div 0,3$ мм більшими від розрахованих. Згідно ОСТ 4.010.010–78 рекомендується також обмеження номенклатури діаметрів отворів – 0,8; 1,2; 1,5 мм, що підвищує технологічність монтажних процесів.

Кріплення плати друкованої передбачається під гвинт 1М3, а діаметр отвору до них – $d=3,2h^{14}$.

Для покращення пайки передбачається поверхню провідного рисунку, контактних площинок покрити сплавом Розе ТУ 6-09-4065-88.

Розрахунок мінімального діаметра контактної площинки D навколо монтажного отвору проведемо за формулою (ГОСТ 23751–75):

$$D = (d + \Delta d_{\text{в.в}}) + 2b + \Delta t_{\text{в.в}} + 2\Delta d_{\text{тр}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{н.в}}^2), \quad (3.9)$$

де d – номінальне значення діаметру монтажного отвору;

$\Delta d_{\text{в.в}}$ – верхнє граничне відхилення діаметра отвору;

b – гарантійний поясок на зовнішньому шарі;

$\Delta t_{\text{в.в}}$ – верхнє граничне відхилення діаметра контактної площинки;

$\Delta d_{\text{тр}}$ – значення підтравлювання діелектрика в отворі, яке в даному випадку рівне нулю (так як плата одношарова);

T_d – значення позиційних допусків розташування осей отворів;

T_D – значення позиційних допусків розташування центрів контактних площинок;

$\Delta t_{\text{н.в}}$ – нижнє граничне відхилення діаметра контактної площинки.

Для плати друкованої третього класу точності з покриттям [ГОСТ 23751-86]:

$\Delta d_{\text{в.в}} = 0,05$ мм (для отворів діаметром до 1 мм);

$\Delta d_{\text{в.в}} = 0,10$ мм (для отворів, діаметром більше 1 мм);

$\Delta t_{\text{н.в}} = 0,10$ мм; $b = 0,10$ мм; $\Delta t_{\text{в.в}} = 0,10$ мм; $T_d = 0,03$ мм;

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_D = 0,15 \text{ мм};$$

Для отворів $d = 1,2 \text{ мм}$ мінімальний діаметр контактної площинки рівний:

$$D_{1,2} = (1,2 + 0,10) + 2 \cdot 0,2 + 0,15 + (0,15^2 + 0,25^2 + 0,10^2) = 1,75 \text{ мм}.$$

Для отвору $d = 1,5 \text{ мм}$:

$$D_{1,5} = (1,5 + 0,10) + 2 \cdot 0,2 + 0,10 + (0,15^2 + 0,25^2 + 0,10^2) = 2,4 \text{ мм}.$$

Мінімальне значення номінальної ширини провідників для плати друкованої 3 класу точності $t = 0,25 \text{ мм}$, а допуск на ширину провідників Δt з покриттям $\Delta t = \begin{smallmatrix} +0,15 \\ -0,10 \end{smallmatrix} \text{ мм}$.

У порівнянні з традиційними, плати для поверхневого монтажу мають підвищену щільність розміщення електронних елементів, менші відстані між провідниковими елементами і контактними площинками. При проектуванні прагнуть не лише мінімізувати топологію, розміри посадочних місць і їх розміщення, але і зменшити кількість рівнів металізації друкованої плати і числа перехідних отворів, які виконують роль міжрівневих переходів. Крок між контактними площинками повинен бути мінімальним, але достатнім для запобігання їх замикання при дозованому паянні. Надмірне ж зменшення контактних площинок може привести до зниження надійності. Також важливим є забезпечення однакової форми і розмірів контактних площинок для монтажу кожного з елементів. Невиконання цієї умови може привести до зміщення або навіть підйому компонентів.

Контактні площинки під чіп-компоненти, сполучені між собою, слід проектувати окремо, з'єднуючи їх вузькою комутаційною доріжкою. Це дозволяє запобігти появі ефекту стягання елементів при оплавленні паяльної пасти.

Розміри контактних площинок для монтажу пасивних елементів з прямокутною формою корпуса визначимо за формулами:

$$x = W_{\max} - k \quad (3.4)$$

$$y = H_{\max} + T_{\max} + k \quad (3.5)$$

$$A = L_{\max} - 2T_{\max} - k, \quad (3.6)$$

де x, y – ширина і довжина площинки відповідно;

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		51

A – відстань між площинками

W - ширина компонента;

H - висота компонента;

L - довжина компонента;

T - ширина зони паяння (контактної області);

k - константа (0,25 мм).

Для товсто плівкових резисторів з типорозміром 2512 знаходимо:

$$x = 3,20 + 0,25 = 1,45 \text{ (мм);}$$

$$y = 0,5 - 0,25 = 0,25 \text{ (мм);}$$

$$A = 6,35 - 2 \cdot 0,5 - 0,25 = 5,1 \text{ (мм).}$$

Для плівкових конденсаторів B41121 знаходимо:

$$x = 3,20 + 0,25 = 1,45 \text{ (мм);}$$

$$y = 0,5 - 0,25 = 0,25 \text{ (мм);}$$

$$A = 6,35 - 2 \cdot 0,5 - 0,25 = 5,1 \text{ (мм).}$$

Для діодів 1N4148 знаходимо:

$$x = 1,45 + 0,25 = 1,7 \text{ (мм);}$$

$$y = 0,75 - 0,25 = 0,5 \text{ (мм);}$$

$$A = 7,5 - 2 \cdot 0,5 - 0,25 = 6,25 \text{ (мм).}$$

Для транзистора 2N3821 знаходимо:

$$x = 1,5 + 0,25 = 1,75 \text{ (мм);}$$

$$y = 1,0 - 0,25 = 0,75 \text{ (мм);}$$

$$A = 5,5 - 2 \cdot 0,5 - 0,25 = 4,25 \text{ (мм).}$$

Для електролітичних конденсаторів типу B41121 розміри контактних площинок будуть наступними:

$$x = 3,0 + 0,25 = 3,25 \text{ (мм);}$$

$$y = 1,6 + 0,25 = 1,85 \text{ (мм);}$$

$$A = 8,15 - 2 \cdot 3,25 - 0,25 = 1,4 \text{ (мм).}$$

Для мікросхеми типу LM324 розміри контактних площинок будуть наступними:

$$x = 0,7 + 0,25 = 0,95 \text{ (мм);}$$

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

$$y = 0,38 + 0,25 = 0,63 \text{ (мм)};$$

$$A = 1,03 - 2 \cdot 0,25 - 0,25 = 0,28 \text{ (мм)}.$$

					КМР.АКТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ КОРПУСУ ПРОЕКТОВАНОГО ПРИБОРУ

4.1 Опис конструкції датчика проектного пристрою

Відповідно до результатів аналізу конструктивних особливостей сучасних датчиків переміщення на основі лінійно-регульованих диференціальних трансформаторів, що наведено у розділі 2 даної кваліфікаційної магістерської роботи. Було розроблено конструкцію датчика лінійних переміщень для автоматизованої системи контролю лінійних переміщень.

Конструктивно датчик складається з металевого рухомого штоку поміщеного у середину пустотілого сердечника з намотаними на нього обмотками (однією первинною обмоткою та двома вторинними). Сердечник вільно рухається у середині корпусу. У якості захисту від механічних пошкоджень а також екранування від зовнішніх електромагнітних полів уся конструкція поміщена у середину циліндричної труби з різьбовою кришкою, виконаної з нержавіючої сталі. Дана конструкція виконана з нержавіючого циліндру з товстою стінкою, що є доволі надійним захистом від механічних пошкоджень та агресивних речовин, а також інших небезпечних умов, що можуть виникнути в умовах виробничого процесу. Для захисту датчику від потрапляння вологи у місті виводу електричного проводу передбачено додатковий гумовий ущільнювач.

Запропонована конструкція датчика приведена на рис. 4.1 де рисунок вгорі це зовнішній вигляд датчика а рисунок внизу представлено у розрізі.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		54

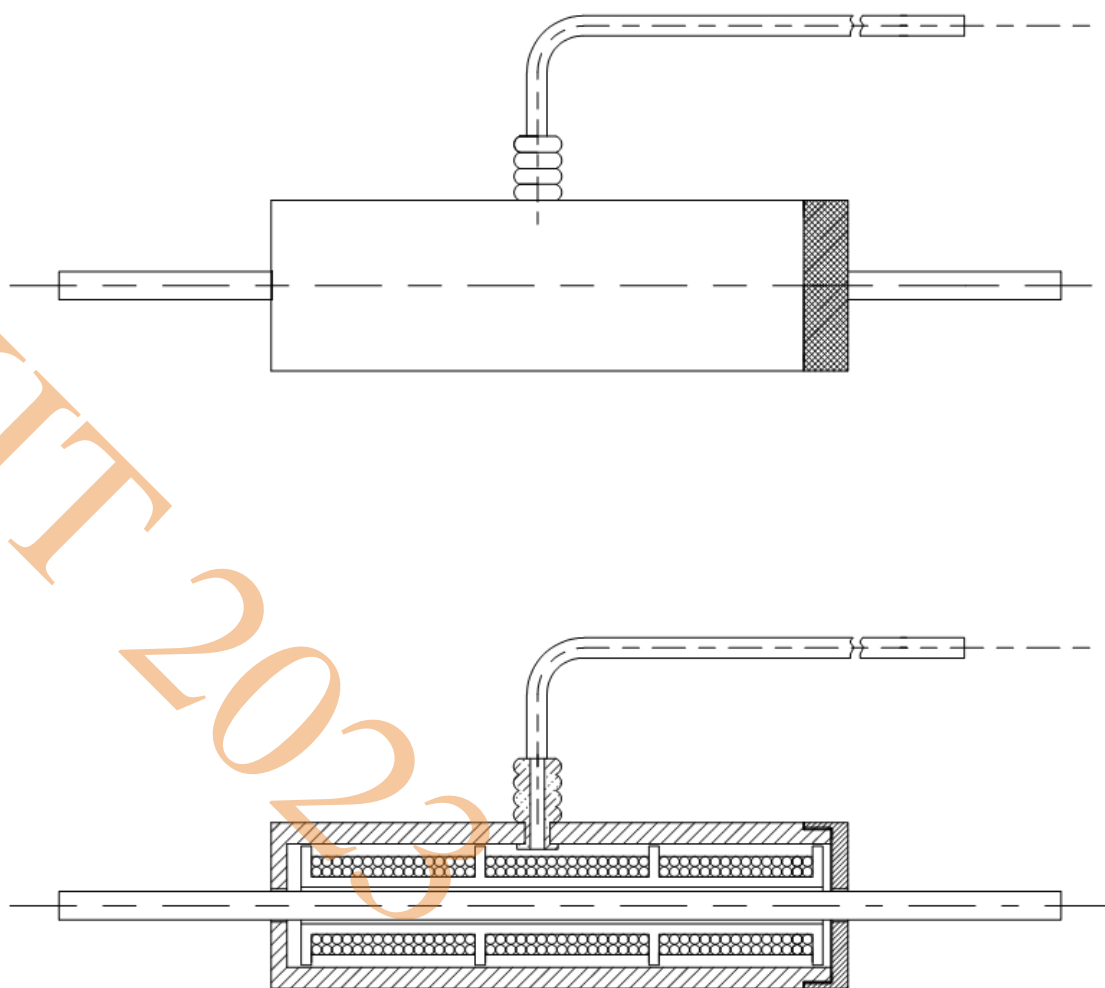


Рис. 4.1 Запропонована конструкція проектного датчика переміщень на основі ЛРДТ

4.2 Опис конструкції корпусу блока нормуючої електроніки первинного вимірювального перетворювача

Результатом виконання огляду сучасних корпусів для нормуючої електроніки ЛРДТ став вибір заготовки корпусу для проектного вимірювача. Даний корпус виконано у геометрично зручній формі прямокутника з

заокругленими гранями. Матеріалом корпусу є міцний та витривалий пластик марки Н-2938, який є надзвичайно міцним та стійким до високих температур.

Для забезпечення високого рівня екранування від електромагнітних оплів, що генеруються датчиком переміщень, передбачено внутрішнє екранування корпусу за допомогою екрануючої фольгової плівки, що приклеюється з середини корпусу. Даний корпус складається з двох основних частин - кришки та основи, які утримуються у з'єднаному стані за допомогою чотирьох гвинтів. У середині корпусу розміщено плату нормуючої електроніки для ЛРДТ з цифровим індикатором для виведення значень переміщення, також присутній роз'єм для підключення датчика переміщень та USB порт для забезпечення можливості з'єднання приладу з персональним комп'ютером. Загальний вигляд блоку нормуючої електроніки для ЛРДТ приведено на рис 3.х.

					КМР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.		№ докум.	Підпис	Дата		

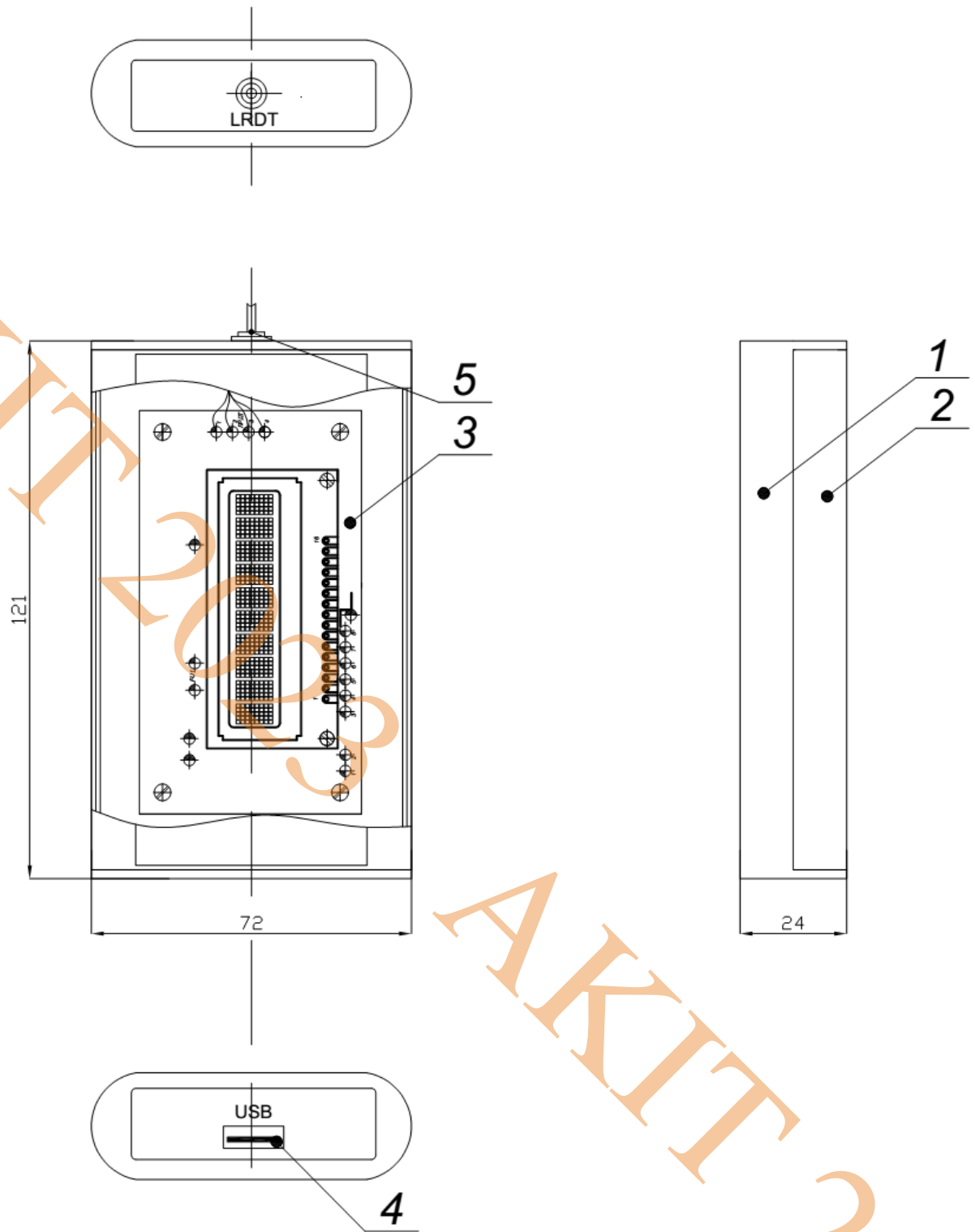


Рис. 4.2 Зовнішній вигляд блоку нормуючої електроніки для ЛРДТ: 1 - основа, 2 - кришка; 3- плата блока нормуючої електроніки; 4 - USB роз'єм; 5 - конектор датчика ЛРДТ

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної магістерської роботи розглядалися питання, по проектуванню сучасного вимірювального пристрою, що може бути складовою частиною складної автоматизованої системи лінійних переміщень об'єктів на виробництві. Даний пристрій побудовано на основі лінійно-регульованого диференціального трансформатора.

У роботі виконано аналіз сучасного стану розробки пристроїв для контролю лінійних переміщень на основі лінійно-регульованого диференціального трансформатора, їх конструктивних особливостей, матеріалів та типових характеристик.

Виконано основні розрахунки по проектуванню датчика пристрою, та розраховано його передавальну характеристику. Проведено аналіз нормуючої електроніки для проектованого пристрою та на основі відповідного аналізу розроблено структурну та електричну принципову схеми пристрою.

Також запропоновано конструкцію датчика проектованого пристрою та блоку нормуючої електроніки з відповідним описом і розроблено відповідні креслення.

					MP.AKIT.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. The LVDT: construction and principle of operation. Measurement specialties Inc. Lucas Way, Hampton, -VA 23666 USA
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_variable_differential_transformer
3. Hank Zumbahlen, CHAPTER 3 - Sensors, Editor(s): Hank Zumbahlen, Linear Circuit Design Handbook, Newnes, 2008, Pages 193-243, ISBN 9780750687034, <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8703-4.00003-1>.
4. P. Ripka, Magnetic Sensors: Principles and Applications, Editor(s): K.H. Jürgen Buschow, Robert W. Cahn, Merton C. Flemings, Bernhard Ilchner, Edward J. Kramer, Subhash Mahajan, Patrick Veyssi re, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier, 2007, Pages 1-11, ISBN 9780080431529, <https://doi.org/10.1016/B978-008043152-9.02158-8>.
6. Clarence W. de Silva, Sensors for Control, Editor(s): Robert A. Meyers, Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), Academic Press, 2003, Pages 609-650, ISBN 9780122274107, <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00139-3>.
7. Vishay Datasheet for BPW34
8. Datasheet “LASER COMPONENTS” UV - Photodetector Hamamatsu» Datasheet for S7686
9. Методичні рекомендації до виконання технологічного розділу дипломного проекту / Федак В.В., Кузьміна Е.А., Бутурлакін О.П. Ужгород 2006. – 28с.
10. Конструювання друкованих плат. Методичні вказівки до виконання конструкторських розрахунків курсового проекту „Проектування радіоелектронної апаратури”. – Ужгород, УжНУ, 2003, 40с.
11. Методична розробка для студентів інженерних спеціальностей. УжНУ, 2001, 56с.
12. Методичні рекомендації до виконання розрахунків по оцінці показників надійності радіоелектронної апаратури для студентів інженерних спеціальностей. УжНУ, 2001, 56с.

					МР.АКІТ.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АКТ 2023

ДОДАТКИ

					MP.AKIT.10550276.01.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		