

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри електронної техніки

_____ Олександр ВОВНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2022 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ бакалавра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка електронного пристрою вимірювання осьових переміщень під час впливу високої температури»

Виконав студент 4 курсу, групи ЕЛТ-18
(шифр групи)

спеціальності _____ 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

_____ Сердюк Владислав Андрійович
(Прізвище, Ім'я та По-батькові) (підпис)

Керівник _____ асистент кафедри ЕТ _____ Ганна ЛАКТИОНОВА
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Рецензент _____ доц. каф. ЕЛІН, к.ф.-м.н., доц. _____ Олена ЛЮБИМЕНКО
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Нормоконтроль
зав. кафедри ЕТ, д.т.н., проф.

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

_____ Олександр ВОВНА
(підпис)

Студент _____
(підпис)

Луцьк – 2022 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____
(дата)

з оцінкою _____

Секретар ЕК _____
(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра

Тема: «Розробка електронного пристрою вимірювання осьових переміщень під час впливу високої температури»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. ЕЛТ – 18

Владислав СЕРДЮК

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

Ганна ЛАКТИОНОВА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Іван ЛАКТИОНОВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Олександр ШТЕПА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра Електронна техніка
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Олександр ВОВНА

« _____ » 2022 року

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Сердюк Владислав Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка електронного пристрою вимірювання осьових переміщень під час впливу високої температури

керівник проекту (роботи) Лактіонова Ганна Анатоліївна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 06.05.2022 року № 180

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз та характеристика об'єкту; обґрунтування та розробка структурної схеми електронного пристрою; розробка принципової схеми електронного пристрою; оцінка метрологічних характеристик; синтез мікропроцесорної частини електронного пристрою; розробка конструкції та зовнішнього вигляду електронного пристрою.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	ас. каф. ЕТ, Лактіонова Г.А.		
2.1	ас. каф. ЕТ, Лактіонова Г.А.		
2.2 – 2.5	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		
3.1	проф. каф. ЕТ, д.т.н., доц. Лактіонов І.С.		
3.2	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Штепа О.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз метрологічних характеристик вихрових сенсорів осьових переміщень		
2	Розробка математичної моделі вихрового сенсора вимірювання осьового переміщення		
3	Розробка електронного пристрою вимірювання осьових переміщень		
4	Додаток А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві		

Студент

_____ **Владислав СЕРДЮК**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ **Ганна ЛАКТІОНОВА**
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Сердюк, В.А. Розробка електронного пристрою вимірювання осьових переміщень під час впливу високої температури / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 171 Електроніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Луцьк, 2022.

Пояснювальна записка: 58 стор., 9 рис., 5 табл., 17 посилань.

Виконано аналіз способів і засобів зменшення величини додаткової похибки вимірювання переміщень від зміни температури під час впливу термічного удару, а також нестационарній температурі. Зі застосуванням технологічних і конструктивних способів не може бути досягнуто зниження величини додаткової похибки вимірювання переміщення від зміни температури. Отже, увагу потрібно приділити схемотехнічним способам з використанням мікроконтролерів. Пропонується застосовувати диференціальний метод включення котушок, які є вимірювальні та компенсаційні, що дозволяє зменшити вплив неінформативної складової вихідного сигналу вимірювача.

Під час імітаційного моделювання встановлено, що трьохкомпонентна схема заміщення сенсора з обліком компенсації початкової індуктивності дозволяє підвищити величину чутливості вимірювання переміщення на 26 %. Під час розрахунку визначено, що величина методичної похибки для трьохкомпонентної схеми заміщення зменшено у порівнянні з двокомпонентною на 45 %. Похибка вихрострумowego сенсора, що обумовлено зміною температури, для трьохкомпонентної схеми зменшено у порівнянні з двокомпонентною в 1,72 рази.

Під час виконання роботи розроблено пристрій вимірювання осьових переміщень на основі методів зменшення додаткової похибки під час зміни температури та термоудару.

Ключові слова: вимірювання, осьове переміщення, індуктивність, сенсор, температура, термічний удар, похибка, пристрій.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРОВИХ СЕНСОРІВ ОСЬОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ.....	9
1.1 Характеристика вихрового способу вимірювання осьових переміщень.....	9
1.2 Аналіз способів зменшення впливу зміни температури на похибку вимірювання осьових переміщень.....	11
1.3 Підвищення точності вимірювання осьових сенсорів переміщення під час дії нестационарної температури.....	15
1.4 Висновки.....	18
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИХРОВОГО СЕНСОРА ВИМІРЮВАННЯ ОСЬОВОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ.....	19
2.1 Ідентифікація параметрів схеми заміщення вихрового сенсора.....	19
2.2 Розробка вимірювального кола сенсора на базі диференціальної схеми включення.....	28
2.3 Розрахунок чутливості сенсора на основі вихрових струмів.....	31
2.4 Визначення значення методичної похибки схем заміщення сенсора..	33
2.5 Дослідження впливу зміни температури на вихідний сигнал сенсора	34
3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ОСЬОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ.....	39
3.1 Розробка схеми пристрою вимірювання осьових переміщень.....	39
3.2 Розробка протоколу взаємодії сенсора за інтерфейсом.....	43
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві.....	52

ВСТУП

Основною вимогою під час експлуатації ракетної техніки є забезпечення високих показників надійності обладнання. Виконання зазначеної вимога пов'язано з підвищенням ефективності ракетних двигунів, які є доволі складною системою, що функціонує під дією великої кількості дестабілізуючих факторів.

Дослідження роботи сенсорів під час дії нестационарної температури, а такої впливів термоударів є одним з шляхів підвищення надійності ракетних двигунів. Якщо під час роботи сенсора трапляється термоудар або під час впливу нестационарної температури має місце некоректне вимірювання одного з фізичних параметрів, то може статися генерування помилкової команди до системи керування та вихід з ладу ракетного двигуна. Покращення показників надійності ракетних двигунів є однією з ключових проблем української ракетної техніки. Підвищення числа фізичних параметрів, значення яких необхідно вимірювати під час роботи ракетного двигуна, є одним зі шляхів покращення показників надійності.

Сенсори осьових переміщень встановлюються у турбонасосному агрегаті, завдяки цьому здійснюється вимірювання переміщення валів ротора на всьому циклі роботи ракетного двигуна. До складу сенсора осьових переміщень входить вихрострумний чутливий елемент, який визначає самопереміщення, а також вторинний вимірювальний перетворювач, що здійснює перетворення переміщення до цифрового формату. Експлуатація турбонасосу має місце в охолодженому стані з високошвидкісним обдуванням рідким азотом, значення температури якої складає мінус 196°C . Ця термодинаміка негативно впливає на працездатність та надійність сенсорів осьових переміщень. На показники надійності турбонасосу впливає осьова, поперечна та вертикальна вібрації вібрацію підшипників, відносні переміщення елементів статора та ротора. Осьове або радіальне переміщення в

турбонасосі обумовлено зношенням його упорного підшипника, зростанням наддуванням азотом, що охолоджує турбонасос, наявністю люфту осі, що має певне прогресування, а через деякий проміжок часу крильчатка турбонасосу може торкатися лопатями до корпусу. Зношення агрегату має нерівномірний характер, під час цього турбонасос має розбалансування та має місце вібрація, яка призводить до поломки ракетного двигуна.

Останнім часом виконуються дослідження роботи ракетних двигунів в умовах термоудару, тобто без наявності попереднього охолодження. Це дозволяє зменшити кількість рідкого азоту, що необхідний для здійснення охолодження, а також зменшити час запуску ракетного двигуна. Під час цього сенсори осьових переміщень повинні виконувати вимірювання з впливом термоудару, після цього сенсори будуть працювати в нестационарному температурному режимі. Під час вимірювання переміщень має місце істотне значення додаткової похибки від зміни температури, що може буде більше 60%. На теперішній час розроблено доволі велику кількість методів зменшення похибки вимірювання переміщення, що обумовлено зміною температури в нестационарному режимі. Для реалізації цих методів способів використовуються схемотехнічні, технологічні та конструктивні способи. В умовах впливу термоудару на чутливий елемент необхідно забезпечити зменшення величини додаткової похибки під час зміни температури зі застосуванням конструктивних і структурних методів корекції.

Завдання випускної кваліфікаційної роботи є розробка способів і засобів вимірювання переміщення під час термоудару з використанням математичних моделей, а також зменшення величини додаткової похибки вимірювання переміщення від зміни температури.

1 АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРОВИХ СЕНСОРІВ ОСЬОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

1.1 Характеристика вихрового способу вимірювання осьових переміщень

Під час протікання струму в котушці індуктивності виникає електромагнітне поле. Це поле викликає вихрові струми в об'єкті вимірювального контролю, які спрямовано зустрічно основному магнітному потоку. Під час зміни положення об'єкта вимірювального контролю щодо чутливого елемента сенсора змінюється форма електромагнітного поля, а, отже, має місце зміна індуктивність обмотки. Метрологічні характеристики чутливого елемента сенсора визначаються параметрами обмотки: кількістю витків, діаметром дроту, що намотано на котушку, взаємним розташуванням у котушці витків. Схемотехнічні рішення, які спрямовано на оптимізації конструкції обмоток чутливого елемента, базуються на експериментальних дослідженнях тому, що теорія вимірювального контролю вихрового струму не враховує взаємний зв'язок між метрологічними та конструктивними характеристиками чутливого елемента [1].

Величина індуктивності обмотки чутливого елемента залежить від електромагнітних характеристик котушки. Значення активного опору визначається матеріалом дроту, кількістю витків, а також це значення залежить від діаметра дроту, частоти струму та способу намотування дроту на котушку.

Величина повного опору обмотки визначається як:

$$Z = \sqrt{R_0^2 + (\omega L_0)^2}.$$

Значення повного опору обмотки залежить від таких факторів[2]:

- частота збуджуючого поля;
- питома провідність матеріалу об'єкта;

- магнітна проникливість матеріалу об'єкта.

Інформаційна складова сигналу щодо переміщення може бути в зміні значення амплітуди та фази вихідного сигналу, а також зміні активної та/або реактивної складової повного опору обмотки. Вихровий сенсор для вимірювання переміщень повинен задовольняти таким вимогам [2]:

- мінімальне значення основної похибки вимірювання переміщення;
- мінімальні вагові та габаритні розміри;
- мінімальне значення додаткової похибки вимірювання переміщення, що обумовлено зміною температури;
- можливість роботи в широкому діапазоні нестаціонарних температур, а також під час дії термоудару.

Інформація про об'єкт вимірювального контролю є багатопараметричною. Для ідентифікації інформативного сигналу з сигналу необхідно використовувати способи розділення інформативних параметрів та неінформативних факторів. Зміну неінформативних факторів після розподілу необхідно компенсувати зі застосуванням способів компенсації. Отже, стає актуальним питання теоретичних методів вимірювального контролю вихрових струмів, уточнення аналітичної залежності, що визначає повний опір обмотки вихрового сенсора з об'єктом вимірювального контролю [1]. Зі збільшенням величин, які вносять до порівняння зі власними параметрами вихрового сенсора, тим менше величина додаткова похибки вимірювання від зміни температури, що призводить до зменшення значення методичної похибки вимірювання осьових переміщень. Для зменшення впливу неінформативних параметрів потрібно ввімкнути зустрічно вторинні обмотки. Кількість витків обмотки повинна бути однаковою. Якщо відсутній об'єкт вимірювального контролю, то під час переміщення однієї з обмоток, можна отримати нульове значення вихідного сигналу на виході сенсора. Після цього об'єкт переміщують до зони контролю, а на виході сенсора має місце вимірювальне значення напруги. До недоліків трьохобмоткового вихрового сенсора є значні габаритні розміри, що під час дії термічного удару є неприпустимим.

1.2 Аналіз способів зменшення впливу зміни температури на похибку вимірювання осьових переміщень

Під час функціонування об'єктів в умовах значної зміни температури безперервний вимірювальний контроль переміщення є актуальним завданням. У цьому випадку стає актуальним покращення метрологічних характеристик сенсорів осьових переміщень зі застосуванням нових способів і засобів вимірювання переміщення.

Відомі способи зменшення величини додаткової похибки від зміни температури відносять два основних способи [3]. Перший спосіб базується на зменшенні потужності впливу зміни температури, а другий спосіб – у зменшенні чутливості сенсора до зміни температури.

Зменшення чутливості до зміни температури розділяють на схемотехнічні, параметричні й технологічні способи.

Технологічні способи можна розділити на [4, 5]:

- розробка нових технологічних процесів виготовлення вихрострумових сенсорів, зі застосуванням яких можна отримати мінімальну чутливість вихідного сигналу від зміни температури;

- розробка та впровадження нових технологічних операцій зі складання та налаштування, що дає можливість отримати мінімальне значення чутливості вихідного сигналу від зміни температури.

До технологічного способу зменшення величини додаткової похибки від зміни температури відноситься введення до технології виготовлення термічного циклювання. Це дозволить ідентифікувати конструктивні та технологічні дефекти. Використання заливки епоксидною смолою для зменшення ефекту окислення відноситься до технологічного способу зменшення величини додаткової похибки вимірювання переміщення від зміни температури.

Параметричні способи базуються на таких принципах:

- вибір елементів, які мають мінімальне значення температурного коефіцієнту лінійного розширення;

- вибір геометрії вихрострумових сенсорів, що може забезпечити мінімальне значення чутливості вихідного сигналу від зміни температури;
- проробка різних варіантів розташування котушок індуктивності, під час експлуатації яких можна отримати мінімальне значення чутливості вихідного сигналу від зміни температури;
- вибір різних варіантів підключення та закріплення елементів сенсора між собою, що також забезпечить мінімальне значення чутливості вихідного сигналу до зміни температури.

Якщо використовувати котушку індуктивності, яка має низьке значення температурного коефіцієнту опору, то можна істотно зменшити додаткову похибку вимірювання переміщення від зміни температури. До цих дротів відносять марку ПНЕТІМІД, який має жилу з міді з покриттям поліамідною ізоляцією. Провід ПНЕТ-ІМІД можна експлуатувати під час дії температури 220°C, зі збільшенням температури поліамідна ізоляція руйнується [5, 6].

Схемотехнічні способи для зменшення величини чутливості вихідного сигналу сенсора від зміни температури застосовуються як [5, 7 – 9]:

- пасивна компенсація температурну, яка передбачає налаштування та регулювання сенсорів з обліком температурного режиму його роботи, її реалізують зі застосуванням диференціального включення компенсаційної додаткової котушки;
- активна компенсація температури, яка передбачає застосування вимірювального каналу температури, що забезпечує корекцію додаткової похибки вимірювання переміщення від зміни температури.

Схемотехнічні способи зменшення додаткової похибки вимірювання переміщення від зміни температури передбачають зменшення впливу зміни зовнішніх дестабілізуючих факторів зі застосуванням додаткових сигналів, що залежать від зміни температури. Зазвичай застосовується включення до мостової схема вимірювальної й компенсаційної котушок. Зовнішня зміна температури впливає як на вимірювальну, так і компенсаційну котушки. Компенсаційну котушку можна використати, як сенсор зміни температури. За

каналом вимірювання температури виконується корекція функції перетворення вихрострумового сенсора. Корекція додаткової похибки вимірювання переміщенні від зміни температури зі застосуванням експериментальних даних та алгоритмічною корекції, що занесено до програми керування мікроконтролера.

Зазвичай для корекції додаткової похибки вимірювання переміщення від зміни температури використовується схемотехнічний спосіб зі застосуванням мікроконтролера.

У нормальних кліматичних умовах (НКУ), у відповідності з розробленим алгоритмом, визначається функція перетворення $N(h, T_{HKV})$ під час вимірювання переміщення h :

$$N(h, T_{HKV}) = k(h, T_{HKV}) \cdot h + b(T_{HKV}),$$

де $N(h, T_{HKV})$ – код вихідного сигналу від вторинного вимірювального перетворювача під час дії фіксованого значення переміщення й температури;

$k(h, T_{HKV}), b(T_{HKV})$ – коефіцієнт перетворення та зсуву нуля.

Визначення коефіцієнта перетворення та зсуву нуля $k(h, T_{HKV}), b(T_{HKV})$ здійснюється за допомогою двох тестових вхідних статичних переміщень h_0, h_n . Для кожного з цих тестових переміщень експериментально виконують дві серії вихідних сигналів: для h_0 – $N(h_0, T_1), N(h_0, T_2)$, а також для h_n – $N(h_n, T_1), N(h_n, T_2)$ під час дії відповідних температур T_1, T_2 .

Функціональна залежність зміни вихідного сигналу $N(h_0, T)$ від зміни температури T , якщо відомі T_1, T_2 та $N(h_0, T_1), N(h_0, T_2)$, то лінійна функція має такий вигляд:

$$N(h_0, T) = \frac{N(h_0, T_2) - N(h_0, T_1)}{T_2 - T_1} \cdot T + N(h_0, T_1) - \frac{N(h_0, T_2) - N(h_0, T_1)}{T_2 - T_1} \cdot T_1,$$

якщо $T_1 \leq T < T_2$.

Для $N(h_n, T)$:

$$N(h_n, T) = \frac{N(h_n, T_2) - N(h_n, T_1)}{T_2 - T_1} \cdot T + N(h_n, T_1) - \frac{N(h_n, T_2) - N(h_n, T_1)}{T_2 - T_1},$$

якщо $T_1 \leq T < T_2$.

Під час застосування $N(h_0, T)$, $N(h_n, T)$, якщо $T = T_{HKV}$ можна визначити $k(h, T_{HKV})$, $b(T_{HKV})$ зі застосуванням залежностей:

$$k(T_{HKV}) = \frac{N(h_n, T_{HKV}) - N(h_0, T_{HKV})}{h_n - h_0},$$

$$b(T_{HKV}) = N(h_0, T_{HKV}) - \frac{N(h_n, T_{HKV}) - N(h_0, T_{HKV})}{h_n - h_0} \cdot x_0.$$

Отримані функціональні залежності $N(h, T_1)$, $N(h, T_2)$, що визначаються під час обробки експериментальних даних, заносяться до програми керування мікроконтролера.

Результати вимірювання переміщення $h(T)$ за зміною вихідного сигналу $N(h, T)$ під час дії температури T здійснюється за функціональною залежністю:

$$h = \frac{1}{k(T)}(N(h, T) - b(T)).$$

Під час впливу термічного удару наведений алгоритм неможливо застосувати тому, що під час дії термоудару необхідно виконувати корекцію цифрового вихідного сигналу в перехідному режимі, як функція двох змінних:

переміщення та часу $N(h, T)$.

Під час визначення переміщення зі застосуванням корекції додаткової похибки вимірювання від зміни температури з використанням вимірювального каналу температури робочого середовища. Сенсор температури цього каналу розміщується всередині корпусу вихрострумowego вимірювача, а його вихідним сигналом виконується корекція. Проте, під час дії різкої зміни градієнта температур на котушках цей алгоритм корекції не можливо застосувати.

1.3 Підвищення точності вимірювання осьових сенсорів переміщення під час дії нестационарної температури

Час дії впливу термоудару, протягом якого значення вихідного сигналу сенсора відповідає вимогам щодо величини додаткової похибки вимірювання переміщень, яку обумовлено зміною температури, складає 50 с, після цього сенсор здійснює вимірювання переміщення під час дії нестационарної температури. У відповідно до ОСТ 92-5069-88, який розповсюджується на сенсори переміщень індуктивно-трансформаторного типу, які призначено для виконання безконтактних вимірювань переміщень з перетворенням їх значень до стандартного електричного сигналу, повинні мати наступні метрологічні характеристики:

- відносне значення основної похибки вимірювання повинно бути не більше ніж 0,5 % з довірчою ймовірністю 0,95;
- відносне значення похибки вимірювання, що обумовлено нелінійністю статичної характеристики перетворення не більше ± 7 %;
- величина додаткової статичної похибки, що обумовлено синусоїдальною вібрацією, не більше ± 1 %;
- значення додаткової статичної похибки вимірювання, що обумовлено впливом механічного удару, не більше ± 1 %;
- величина додаткової статичної похибки вимірювання переміщень, що

обумовлено впливу лінійного прискорення, не більше ніж $\pm 1 \%$;

– значення додаткової статичної похибки вимірювання переміщень, що обумовлено впливу підвищеного тиску середовища, повинно складати не більше $\pm 1 \%$;

– величина додаткової статичної похибки вимірювання переміщень, що обумовлено впливом зміни температури середовища, повинна бути не більше $\pm 4 \%$.

Зміна температури середовища під час роботи вихрових сенсорів переміщення має як статичний характер, що змінюється з градієнтом до 3°C на хвилину, а також динамічний характер під час термоудару градієнт становить до 200°C за секунду.

Ефективним способом зменшення величини додаткової похибки вимірювання переміщення в статичному режимі базується на розділенні інформативних параметрів та неінформативних факторів пристрою.

Інформативний параметр вимірювального пристрою, величина якого змінюється від вхідної величини, що вимірюється, а інші будуть неінформативними факторами, зміна яких обумовлена впливом зовнішніх факторів, що впливають на результат вимірювання. У теперішній час розроблено велику кількість способів перетворення простих двокомпонентних схем заміщення, а саме індуктивність та активний опір, індуктивність та ємність, активний опір та ємність. Перетворення цих величин до стандартизованих електричних сигналів дозволяє одержати доволі високі показники точності засобів вимірювання. Доволі великий інтерес має ідентифікація інформативних параметрів з трьохелементної схеми вимірювача під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів. Для вихрострумowego сенсора, який представлено послідовне з'єднання індуктивності, як активної та реактивної складової опору. Для розділення початкової від внесеної індуктивності потрібно розробити спосіб інваріантного вимірювання та перетворення вихідного сигналу до стандартизованої уніфікованої форми [10].

Як джерело вхідного впливу застосовуються джерела синусоїдальної форми, прямокутні або пілкоподібні імпульси, одиничний дельта-імпульс, білий шум. Для оцінки метрологічних характеристик зазвичай застосовується синусоїдальний вплив. Розроблені нормативно-технічні документи регламентують застосування синусоїдального впливу під час вимірювання активного опору, індуктивності та ємності. Під час застосування білого шуму можна отримати доволі хороші результати з ідентифікації параметрів схеми вимірювача завдяки тому, що частотний білий шум складає від 0 до ∞ .

Зменшення впливу неінформативних факторів на значення вихідного сигналу можна отримати різними способами. Для розподілу на інформативні параметри та неінформативні фактори застосовується двохчастотний метод, якщо мають місце однакові та різні початкові фази, а також амплітудно-фазовий метод. Більш детальний порівняльний аналіз зазначених методів з обліком некомпенсації за амплітудою та фазою наведено в [11, 12]. З аналізу отриманих результатів у цих роботах, можна зробити висновок щодо переваги амплітудно-частотного методу в порівнянні з двохчастотним тому, що амплітудно-частотний метод має меншу зміну величини вихідного сигналу під час некомпенсації за амплітудою та фазою.

Зменшення впливу неінформативних факторів можна отримати під час екранування, а також термостабілізації зі включення за трьох або чотирьох провідною схемою, під час застосування цих способів точність вимірювання суттєво збільшується [13].

Конструктивні способи підвищення точності не розв'язують задачу інваріантного перетворення. До теперішнього часу немає можливості за допомогою конструктивних способів повністю виключити активні втрати у сенсорах на базі вихрових струмів. Сенсори на базі вихрових струмів характеризуються нестабільністю вихідного сигналу під час здійснення вимірювань у динаміці [14].

1.4 Висновки

Виконано аналіз способів і засобів зменшення величини додаткової похибки вимірювання переміщень від зміни температури під час впливу термічного удару, а також нестационарній температурі. Під час аналізу виявлено, що зі застосуванням технологічних і конструктивних способів не може бути досягнуто зниження величини додаткової похибки вимірювання переміщення від зміни температури. Отже, увагу потрібно приділити схемотехнічним способам з використанням мікроконтролерів.

Актуальність та необхідність виконання досліджень, що спрямовані на зменшення величини додаткової похибки вимірювання переміщень під час впливу термоудару, що підтверджується високими вимогами до показників точності й технічних характеристик сенсорів на базі вихрових струмів.

Виявлено, що зі застосуванням інваріантного вимірювання параметрів перетворювачів можна істотно підвищити точність та знизити вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів, зміна яких впливає на результати вимірювання.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИХРОВОГО СЕНСОРА ВИМІРЮВАННЯ ОСЬОВОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ

2.1 Ідентифікація параметрів схеми заміщення вихрового сенсора

Для підвищення інформативності вихідного сигналу вимірювального перетворювача сенсора проводиться ідентифікацію параметрів його схеми заміщення. Для схеми заміщення сенсора, яку наведено на рис. 2.1, а, значення невідомих параметрів L_x , R_x , L_0 можна розрахувати зі застосуванням системи рівнянь:

$$\begin{cases} L_0 = \frac{1}{k_0}; \\ L_x = \frac{1}{k_0 \cdot (T_1 - T_3)}; \\ R_x = \frac{1}{k_0 \cdot T_3 \cdot (T_1 - T_3)}. \end{cases}$$

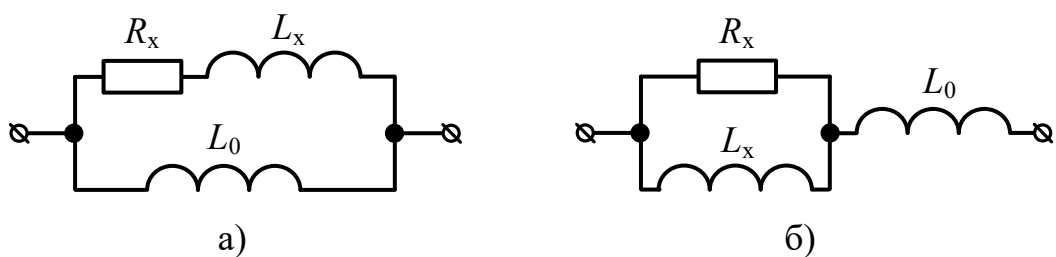


Рисунок 2.1 – Схеми заміщення вимірювальної котушки як паралельне включення початкової індуктивності та послідовне включення активного та реактивного опорів (а), а також послідовне включення початкової індуктивності та паралельне включення активного та реактивного опорів (б)

Для визначення значення параметра k_0 передаточну функцію:

$$Y(p) = \frac{k_0 \cdot (T_1 \cdot p + 1)}{p \cdot (T_3 \cdot p + 1)}.$$

можна представити як добуток простих. Отже, це добуток безінерційної ланки W_0 , ланки форсування W_1 , ланки інтегрування W_2 , а також аперіодичного ланки першого порядку W_3 . Отже, має місце такі аналітичні залежності:

$$Y(p) = \frac{k_0 \cdot (T_1 \cdot p + 1)}{p \cdot (T_3 \cdot p + 1)} = W_0 \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot W_3;$$

$$W_0 = k_0;$$

$$W_1 = T_1 \cdot p + 1;$$

$$W_2 = \frac{1}{p};$$

$$W_3 = \frac{1}{T_3 \cdot p + 1}.$$

Формула для визначення амплітудно-частотної характеристики має такий вигляд:

$$A(\omega_1) = 20 \cdot \lg k_0 - 20 \cdot \lg \omega_1;$$

$$k_0 = 10^{\frac{A}{20} + \lg \omega_1}.$$

Для переміщення $h = 2,8$ мм розраховано значення параметрів схеми заміщення:

$$k_0 = 10^{\frac{A}{20} + \lg \omega_1} = 10^{\frac{42}{20} + 6,72} = 10^{-2,1+6,72} = 10^{4,61} = 40938;$$

$$T_1 = \frac{1}{10^{6,72}} = 1,95 \cdot 10^{-7};$$

$$T_2 = \frac{1}{10^{6,8}} = 1,58 \cdot 10^{-7};$$

$$T_3 = \frac{1}{10^{7,1}} = 8 \cdot 10^{-8};$$

$$L_0 = \frac{1}{k_0} = \frac{1}{40938} = 24,4 \text{ мкГн};$$

$$R_x = \frac{L_0}{T_1 - T_3} = \frac{24,4 \cdot 10^{-6}}{1,95 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-8}} = 212 \text{ Ом};$$

$$L_x = T_3 \cdot R_x = 8 \cdot 10^{-8} \cdot 212 = 16,8 \text{ мкГн}.$$

Для переміщення $h=0,1$ мм значення параметрів схеми заміщення дорівнюють:

$$k_0 = 10^{\frac{A}{20} + \lg \omega_1} = 10^{\frac{45}{20} + 6,8} = 10^{-2,2+6,8} = 10^{4,6} = 39810;$$

$$L_{\text{н}} = \frac{1}{k_0} = \frac{1}{39810} = 24,2 \text{ мкГн};$$

$$R_x = \frac{L_0}{T_2 - T_3} = \frac{24,2 \cdot 10^{-6}}{1,58 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-8}} = 320 \text{ Ом};$$

$$L_x = T_3 \cdot R_x = 8 \cdot 10^{-8} \cdot 320 = 25,6 \text{ мкГн};$$

$$\Delta L = \frac{L_{h=0} - L_{h=\infty}}{L_0} \cdot 100 \% = \frac{25,6 - 16,8}{24,4} \cdot 100 \% = 36,2 \%;$$

$$\Delta R = \frac{R_{h=0} - R_{h=\infty}}{2 \cdot \pi \cdot L_0 \cdot f} \cdot 100 \% = \frac{320 - 212}{2 \cdot 3,14 \cdot 24,4 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 7,5 \%.$$

Для схеми заміщення, яку наведено на рис. 2.1, б, значення невідомих параметрів L_x , R_x , L_0 можна визначити зі системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_0 = \frac{T_1}{T_2 \cdot k_0}; \\ L_x = \frac{1}{k_0} - \frac{T_1}{T_2 \cdot k_0}; \\ R_x = \frac{\frac{1}{k_0} - \frac{T_1}{T_2 \cdot k_0}}{T_2}. \end{array} \right.$$

Для переміщення $h = 2,8 \text{ мм}$ значення параметрів схеми заміщення дорівнюють:

$$k_0 = 10^{\frac{A}{20} + \lg \omega_1} = 10^{\frac{42}{20} + 6,72} = 10^{-2,1 + 6,72} = 10^{4,61} = 40938;$$

$$T_1 = \frac{1}{10^{6,72}} = 1,95 \cdot 10^{-7};$$

$$T_2 = \frac{1}{10^{6,8}} = 1,58 \cdot 10^{-7};$$

$$T_3 = \frac{1}{10^{7,1}} = 8 \cdot 10^{-8};$$

$$L_0 = \frac{T_1}{T_3 \cdot k_0} = \frac{1,95 \cdot 10^{-7}}{8,0 \cdot 10^{-8} \cdot 40938} = 59,47 \text{ мкГн};$$

$$L_x = \frac{1}{k_0} - \frac{T_1}{T_3 \cdot k_0} = \frac{1}{40938} - \frac{1,95 \cdot 10^{-7}}{1,58 \cdot 10^{-7} \cdot 40938} = 24,4 - 59,47 = -35,07 \text{ мкГн}.$$

$$R_x = \frac{\frac{1}{k_0} - \frac{T_1}{T_3 \cdot k_0}}{T_3} = \frac{-35,07 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{-8}} = -437 \text{ Ом}.$$

Для переміщення $h = 0,1$ мм значення параметрів схеми заміщення дорівнюють:

$$k_0 = 10^{\frac{A}{20} + \lg \omega_1} = 10^{\frac{45}{20} + 6,8} = 10^{-2,2 + 6,8} = 10^{4,6} = 39810;$$

$$L_0 = \frac{T_2}{T_3 \cdot k_0} = \frac{1,58 \cdot 10^{-7}}{8 \cdot 10^{-8} \cdot 39810} = 49,7 \text{ мкГн};$$

$$L_x = \frac{1}{k_0} - \frac{T_2}{T_3 \cdot k_0} = \frac{1}{39810} - \frac{1,58 \cdot 10^{-7}}{8 \cdot 10^{-8} \cdot 39810} = 24,2 - 49,7 = -25,5 \text{ мкГн};$$

$$R_x = \frac{\frac{1}{k_0} - \frac{T_2}{T_3 \cdot k_0}}{T_3} = \frac{-25,5 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{-8}} = -318 \text{ Ом}.$$

Під час розрахунків для схеми заміщення, що наведено на рис. 2.1, б, отримано негативні значення активних і реактивних опорів. Це пояснюється тим, що у двополюснику струм протікає в іншому напрямку щодо до початкової індуктивності, а це фізично неможливо. Отже, фізично обґрунтовано схему заміщення вимірювального перетворювача наведено на рис. 2.1, а.

Для визначення значення параметрів двохкомпонентної схеми заміщення зіставимо повний комплексний опір двохкомпонентної схеми зі повним комплексним опором трьохкомпонентної схеми заміщення:

$$\dot{Z} = \text{Im}(\dot{Z}) + \text{Re}(\dot{Z}) = j\omega(L_0 - L_{\text{BH}}) + R_{\text{BH}} = \frac{j\omega L_0 \cdot (j\omega L_x + R_x)}{j\omega L_0 + j\omega L_x + R_x};$$

$$R_{\text{BH}} = \text{Im}(\dot{Z});$$

$$L_{\text{BH}} = L_0 - \frac{\text{Im}(\dot{Z})}{2\pi f}.$$

За результатами виконаних розрахунків для двохкомпонентної схеми заміщення:

– для переміщення $h = 2,8$ мм:

$$R_{\text{BH}} = 44,48 \text{ Ом}; \quad L_{\text{BH}} = 8,646 \text{ мкГн};$$

– для переміщення $h = 0,1$ мм:

$$R_{\text{BH}} = 36,91 \text{ Ом}; \quad L_{\text{BH}} = 5,745 \text{ мкГн};$$

$$\Delta L_{\text{вн}} = \frac{L_{h=0} - L_{h=\infty}}{L_0} \cdot 100\% = \frac{8,646 - 5,745}{24,4} \cdot 100\% = 11,3\%;$$

$$\Delta R_{\text{вн}} = \frac{R_{h=0} - R_{h=\infty}}{2 \cdot \pi \cdot L_0 \cdot f} \cdot 100\% = \frac{44,48 - 36,91}{2 \cdot 3,14 \cdot 24,4 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6} \cdot 100\% = 4,94\%.$$

На наступному етапі визначаються параметри передавальної функції для двох компонентної схеми заміщення:

$$Y(p) = \frac{k_0}{T_1 \cdot p + 1} = \frac{\frac{1}{R_{\text{вн}}}}{\frac{L_0 - L_{\text{вн}}}{R_{\text{вн}}} \cdot p + 1} :$$

– для переміщення $h = 2,8$ мм:

$$A = 20 \cdot \lg(R_{\text{вн}}) = -32,86 \text{ дБ};$$

$$T_1 = \frac{L_0 - L_{\text{вн}}}{R_{\text{вн}}} = \frac{(24,4 - 8,646) \cdot 10^{-6}}{44,48} = 3,55 \cdot 10^{-7};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{3,55 \cdot 10^{-7}} = 2,8 \cdot 10^6;$$

$$\lg(\omega_1) = \lg(2,8 \cdot 10^6) = 6,5;$$

– для переміщення $h = 0,1$ мм:

$$A = 20 \cdot \lg(R_{\text{вн}}) = -31,36 \text{ дБ};$$

$$T_1 = \frac{L_0 - L_{\text{BH}}}{R_{\text{BH}}} = \frac{(24,4 - 5,745) \cdot 10^{-6}}{36,91} = 5 \cdot 10^{-7};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-7}} = 2,0 \cdot 10^6;$$

$$\lg(\omega_1) = \lg(2,0 \cdot 10^6) = 6,3.$$

Повну схему заміщення сенсора на вихрових струмах можна представити як повітряний трансформатор, що наведено на рис. 2.2 [15], де позначено: U_0 – напруга для підключення джерела живлення; I_0 – струм, що протікає через обмотку; L_s – індуктивність розсіювання; L_0 – індуктивність намагнічування обмотки; R_0 – активний опір обмотки; L_x та R_x – параметри схеми заміщення, які залежать від вимірюваного переміщення.

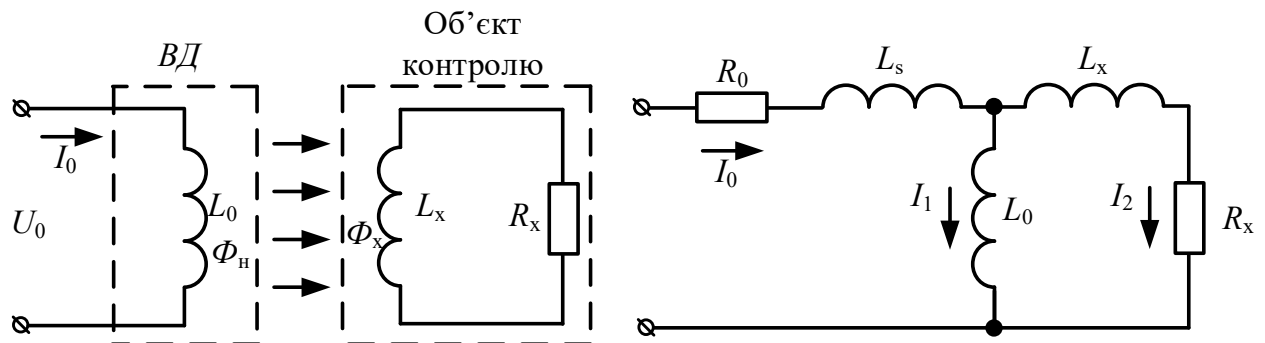


Рисунок 2.2 – Повна схема заміщення сенсора на вихрових струмах як повітряний трансформатор

Аналітична залежність провідності двополюсника, що наведено на рис. 2.2, в операторній формі :

$$Y(p) = \frac{I_0(p)}{U_0(p)} = \frac{(L_x + L_0) \cdot p + R_x}{\left(\frac{L_s \cdot L_x + L_s \cdot L_0 + L_0 \cdot L_s}{R_0 \cdot R_x} \right) \cdot p^2 + \left(\frac{L_s + L_0}{R_0} + \frac{L_x + L_0}{R_0} \right) \cdot p + 1}.$$

Величину струму I_2 , який протікає за гілкою з інформативними параметрами R_x та L_x , можна визначити як:

$$I_2 = \frac{U_0}{\frac{j\omega L_0 \cdot (j\omega L_x + R_x)}{j\omega L_0 + j\omega L_x + R_x} + j\omega L_s + R_0} \cdot \frac{j\omega L_0}{j\omega L_x + R_x}.$$

З аналізу цієї наведеної залежності можна зробити висновок, що проведення роздільного вимірювання інформативних параметрів (R_x та L_x) та неінформативних факторів (L_0 , L_s та R_0) неможливо.

Для оцінки адекватності запропонованої та розробленої моделі, яку представлено як трьохкомпонентну схему, виконано розрахунок значень середньоквадратичних відхилень експериментальних даних від даних, що одержано під час математичного моделювання.

Для трьохкомпонентної схеми заміщення дисперсія та с.к.в. для переміщення $h = 0,1$ мм дорівнюватиме:

$$D = \frac{1}{n} \sqrt{Y_0^{\text{екс}} - Y_0^{3x \text{ елем}}} = \frac{1}{21} \cdot \sqrt{(0,0659 - 0,0222)^2 + (0,0248 - 0,0189)^2 \dots};$$

$$\sigma = \sqrt{D} = 0,0078.$$

Для трьохкомпонентної схеми заміщення дисперсія та с.к.в. для переміщення $h = 2,8$ мм дорівнюватиме:

$$D = \frac{1}{n} \sqrt{Y_{\infty}^{\text{екс}} - Y_{\infty}^{3x \text{ елем}}} = \frac{1}{21} \cdot \sqrt{(0,0644 - 0,0265)^2 + (0,0236 - 0,0149)^2 \dots};$$

$$\sigma = \sqrt{D} = 0,0063.$$

Для двохкомпонентної схеми заміщення дисперсія та с.к.в. для переміщення $h = 0,1$ мм дорівнюватиме:

$$D = \frac{1}{n} \sqrt{Y_0^{\text{екс}} - Y_0^{2x \text{ елем}}} = \frac{1}{21} \cdot \sqrt{(0,0659 - 0,0633)^2 + (0,0258 - 0,0209)^2} \dots;$$

$$\sigma = \sqrt{D} = 0,0116.$$

Для двохкомпонентної схеми заміщення дисперсія та с.к.в. для переміщення $h = 2,8$ мм дорівнюватиме:

$$D = \frac{1}{n} \sqrt{Y_{\infty}^{\text{екс}} - Y_{\infty}^{2x \text{ елем}}} = \frac{1}{21} \cdot \sqrt{(0,0644 - 0,0631)^2 + (0,0236 - 0,0203)^2} \dots;$$

$$\sigma = \sqrt{D} = 0,0106.$$

Під час аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що має місце висока ефективність апроксимації експериментальних даних зі застосуванням трьохкомпонентної схеми заміщення у порівнянні з двохкомпонентною. Значення середньоквадратичного відхилення для трьохкомпонентної схеми заміщення, якщо $h = 0,1$ мм в 1,48 рази менше ніж с.к.в. для двохкомпонентної, а для $h = 2,8$ мм воно є меншим у 1,68 рази.

2.2 Розробка вимірювального кола сенсора на базі диференціальної схеми включення

Для зменшення величини додаткової похибки, що обумовлено зміною температури, зазвичай використовують диференціальний метод, під час реалізації якого вхідна вимірювана величина впливає тільки на одну гілку

вимірювального перетворювача сенсору [16].

Еквівалентну схему заміщення вимірювального перетворювача переміщень наведено на рис. 2.3. Схема має в своєму складі елементи, параметри яких не змінюються від вхідної вимірюваної величини, а під час роботи сенсора їх зміна повинна бути компенсована. Також схема має в своєму складі елементи, параметри яких залежать від зміни переміщення, вони повинні не залежати від неінформативних факторів, та перетворюватися до вихідного сигналу.

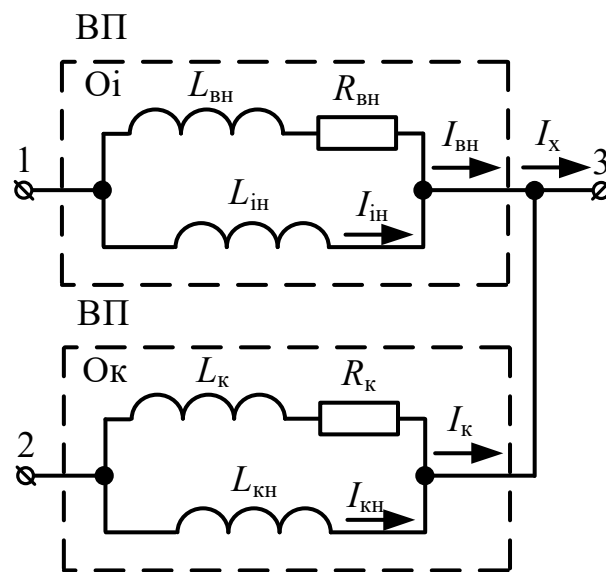


Рисунок 2.3 – Еквівалентна схема заміщення вимірювального перетворювача переміщень

Модель вимірювального перетворювача, що наведено на рис. 2.3, з повним комплексним опором котушки Z_x наведено як еквівалентна схема заміщення. Ця модель має в своєму складі паралельне з'єднання індуктивності $L_{\text{вимн}}$, що утворює магнітний потік під час дії номінального вимірюваного переміщення. Наведена модель вимірювального перетворювача застосовується для подальшої побудови вимірювального сенсора з інформативними параметрами схеми заміщення, а також компенсацією неінформативних параметрів вимірювального перетворювача з обліком зміни температури на зміну вихідного сигналу вимірювального перетворювача [17].

Особливістю цієї моделі є те, що її представлено як два паралельних кола: один з яких має інформативні елементи $R_{\text{вн}}$ та $L_{\text{вн}}$, а інше коло має в своєму складі неінформативний елемент $L_{\text{ін}}$. Як неінформативний елемент використано індуктивність намагнічування $L_{\text{ін}}$, значення цього елементу не змінюється під час зміни переміщення у всьому вимірювальному діапазоні. Інформативними параметрами виступають індуктивність $L_{\text{вн}}$, що вноситься, та опір $R_{\text{вн}}$, що вноситься. Значення цих параметрів змінюються під час зміни переміщення, що є причиною протікання в цьому колі струму $I_{\text{вн}}$. Вимірювальний перетворювач сенсора визначає тільки зміну інформативних параметрів $R_{\text{вн}}$ та $L_{\text{вн}}$ наведеної схеми заміщення, а також зменшення впливу на результат вимірювання переміщення завдяки компенсації значення постійного неінформативного параметра $L_{\text{ін}}$ завдяки виділенню зі спільного струму вимірювальної котушки двох складових: інформативного $I_{\text{вн}}$, який протікає за колом з елементом $R_{\text{вн}}$, його значення вимірюється зі застосуванням вимірювального перетворювача сенсора, та неінформативного $I_{\text{ін}}$, який протікає за колом з елементом $L_{\text{ін}}$, та після цього компенсується струмом $I_{\text{кн}}$, який протікає за компенсаційною котушкою індуктивності. Величина струму $I_{\text{к}}$ зменшується завдяки застосуванню екрануючої пластини, яку виготовлено з такого ж матеріалу, що й об'єкт вимірювального контролю. Отже, на виході вимірювального кола має місце струм $I_{\text{х}}$, величина якого є пропорційною тільки від зміни вимірюваного переміщення h .

У випускній кваліфікаційній роботі пропонується застосовувати диференціальний метод включення котушок, які є вимірювальні та компенсаційні, що дозволяє зменшити вплив неінформативної складової вихідного сигналу вимірювача. Для забезпечення повної компенсації неінформативного параметра необхідно доволі високу точність виготовлення котушок для вимірювання та компенсації.

2.3 Розрахунок чутливості сенсора на основі вихрових струмів

Чутливість дорівнює відношенню діапазонів зміни вихідного до вхідного сигналів:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x},$$

де Δx – діапазон зміни вхідного сигналу;

Δy – діапазон зміни вихідного сигналу.

На зміну чутливості вихідного сигналу сенсора істотно впливає зміна температури, а також частота під час дії періодичного вхідного впливу.

Виконаємо визначення чутливості сенсора, який має двох та трьохкомпонентну схему заміщення. Для двохкомпонентної схеми величина повного опору розраховується за аналітичною залежністю:

$$Z = \sqrt{Z_0^2 - Z_{\text{BH}}^2} = \sqrt{23482,76 - 135,46} = 152,76 \text{ Ом};$$

$$Z_0 = \sqrt{\omega^2 \cdot L_0^2} = \sqrt{(6,28 \cdot 10^6)^2 \cdot (24,4 \cdot 10^{-6})^2} = 153,23 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{BH}} &= \sqrt{\omega^2 \cdot (L_{\text{BH}\infty} - L_{\text{BH}0})^2 + (R_{\text{BH}\infty} - R_{\text{E}})^2} = \\ &= \sqrt{(6,28 \cdot 10^6)^2 \cdot ((8,64 - 5,74) \cdot 10^{-6})^2 + (44,4 - 36,91)^2} = 11,61 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

Величина вихідного струму схеми заміщення під час дії підключення напруги джерела живлення $U_{\text{ж}} = 5 \text{ В}$ визначається за формулою:

$$I = \frac{U_{\text{ж}}}{Z} = \frac{5}{152,76} = 32 \text{ мА}.$$

Діапазон зміни значення переміщення складає $\Delta h = 2,7$ мм, отже, величина чутливості розраховується за таким співвідношенням:

$$S_1 = \frac{I}{\Delta h} = \frac{32}{2,7} = 11,42 \text{ мА/мм.}$$

Для трьохкомпонентної схеми заміщення сенсора величина повного опору, з обліком виконання компенсації значення початкової індуктивності, розраховується за формулою:

$$Z = Z_{\text{вн}};$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{вн}} &= \sqrt{\omega^2 \cdot (L_{\text{вн}\infty} - L_{\text{вн}0})^2 + (R_{\text{вн}\infty} - R_{\text{вн}0})^2} = \\ &= \sqrt{(6,28 \cdot 10^6)^2 \cdot ((25,6 - 16,8) \cdot 10^{-6})^2 + (320 - 212)^2} = 121,3 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Величина вихідного струму схеми заміщення під час дії підключення напруги джерела живлення $U_{\text{ж}} = 5$ В визначається за формулою:

$$I = \frac{U_{\text{ж}}}{Z} = \frac{5}{121,3} = 41 \text{ мА.}$$

Діапазон зміни значення переміщення складає $\Delta h = 2,7$ мм, отже, величина чутливості для трьохкомпонентної схеми розраховується за таким співвідношенням:

$$S_2 = \frac{I}{\Delta h} = \frac{41}{2,7} = 14,64 \text{ мА/мм.}$$

Ефект від використання отриманої схеми заміщення буде складати:

$$k = \frac{S_2}{S_1} = \frac{14,64}{11,42} = 1,26 = 26 \, \%.$$

Отже, трьохкомпонентна схема заміщення сенсора з обліком компенсації початкової індуктивності дозволяє підвищити величину чутливості вимірювання переміщення на 26 %.

2.4 Визначення значення методичної похибки схем заміщення сенсора

Методична похибка виникає, якщо застосовується недосконалий метод вимірювання, а також наближену схему заміщення об'єкта вимірювання, неточність аналітичної залежності, що застосовуються для опису процесів і явищ у вимірювальному сенсорі.

Для вихрострумowego сенсора методична похибка має місце під впливом зміни неінформативних факторів. Під час отримання схеми заміщення вихрострумowego сенсора необхідно одержати найкращий компроміс між двома вимогами, які є суперечливим. Має місце мінімізація величини методичної похибки з представленням вихрострумowego сенсора повною схемою заміщення, проте необхідно досягнути простоти схеми, що дозволить зменшити інструментальну похибку засобу вимірювання.

Величина методичної похибки для двохкомпонентної схеми розраховується за співвідношенням:

$$\psi_{M1} = \frac{\Delta_{M1}}{X} \cdot 100 \, \% = \frac{Z - Z_x}{Z_x} \cdot 100 \, \%.$$

$$\text{де } Z_x = \sqrt{\omega^2 \cdot L_x^2 + R_x^2};$$

$$Z = \sqrt{\omega^2 \cdot (L_0 + L_x)^2 + R_x^2}.$$

Величина методичної похибка для трьохкомпонентної схеми заміщення з обліком компенсації неінформативного фактору розраховується за співвідношенням:

$$\psi_{M2} = \frac{\Delta_{M2}}{X} \cdot 100 \% = \frac{Z_1 - Z_x}{Z_x} \cdot 100 \% = \frac{Z - Z_0 - Z_x}{Z_x} \cdot 100 \% = \left(\psi_{M1} - \frac{Z_0}{Z_x} \right) \cdot 100 \%,$$

де $Z_0 = \omega L_0$;

$$Z_1 = Z - Z_0.$$

Виконано розрахунок $\frac{Z_0}{Z_x}$ зі застосуванням значень L_0 , L_x , R_x під час визначення у процентах:

$$\frac{Z_0}{Z_x} = \frac{6,28 \cdot 10^6 \cdot 24,4 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{320^2 + (6,28 \cdot 10^6 \cdot 16,6 \cdot 10^{-6})^2}} \cdot 100 \% = 45 \%.$$

Під час розрахунку визначено, що величина методичної похибки для трьохкомпонентної схеми заміщення зменшено у порівняно з двохкомпонентною на 45 %.

2.5 Дослідження впливу зміни температури на вихідний сигнал сенсора

Для впливу зміни температури на величину вихідного сигналу сенсора виконано імітаційне моделювання в середовищі Simulink пакету Matlab. Для здійснення моделювання зміни температури на зміну вихідного сигналу сенсора використано диференціальні рівняння. Розроблено імітаційні моделі сенсора для двохкомпонентної та трьохкомпонентної схем заміщення у пакеті прикладних програм Simulink пакету Matlab.

Вихідні параметри моделі отримано під час ідентифікації схеми заміщення: $L_k = 24,4$ мкГн, $L_0 = 24,4$ мкГн, $L_x = 25,6$ мкГн, $R_x = 320$ Ом, частота напруги живлення котушки індуктивності, що має синусоїдальну форму $f = 1$ МГц; амплітуда напруги джерела живлення $U_{ж} = 5$ В. Значення цих параметрів перераховано для трьохкомпонентної схеми заміщення (див. рис. 2.4), диференціальні рівняння для цієї схеми мають такий вигляд:

$$\begin{cases} L_x \cdot \frac{dI}{dt} + R_x \cdot I = U_{ж}; \\ L_0 \cdot \frac{dI}{dt} = U_{ж}; \\ L_k \cdot \frac{dI}{dt} = -U_{ж}; \\ I_n + I_i - I_k = \Delta I. \end{cases}$$

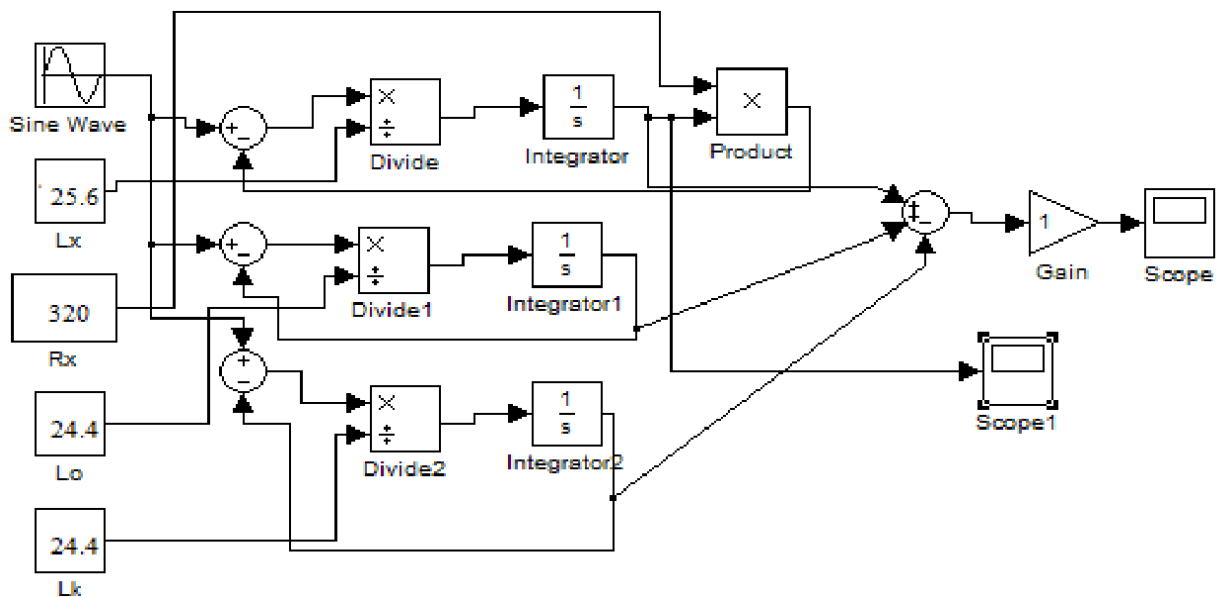


Рисунок 2.4 – Модель трьох компонентної схеми заміщення в Simulink пакету прикладних програм Matlab

Для імітаційного моделювання впливу зміни температури параметри L_k , L_0 , L_x , R_x трьохкомпонентної схеми підвищено на 10 % та їх значення становлять $L_k = 26,8$ мкГн, $L_0 = 26,8$ мкГн, $L_x = 28,1$ мкГн, $R_x =$ Ом, під час цього вимірюється значення вихідного струму схеми (див. рис. 2.5).

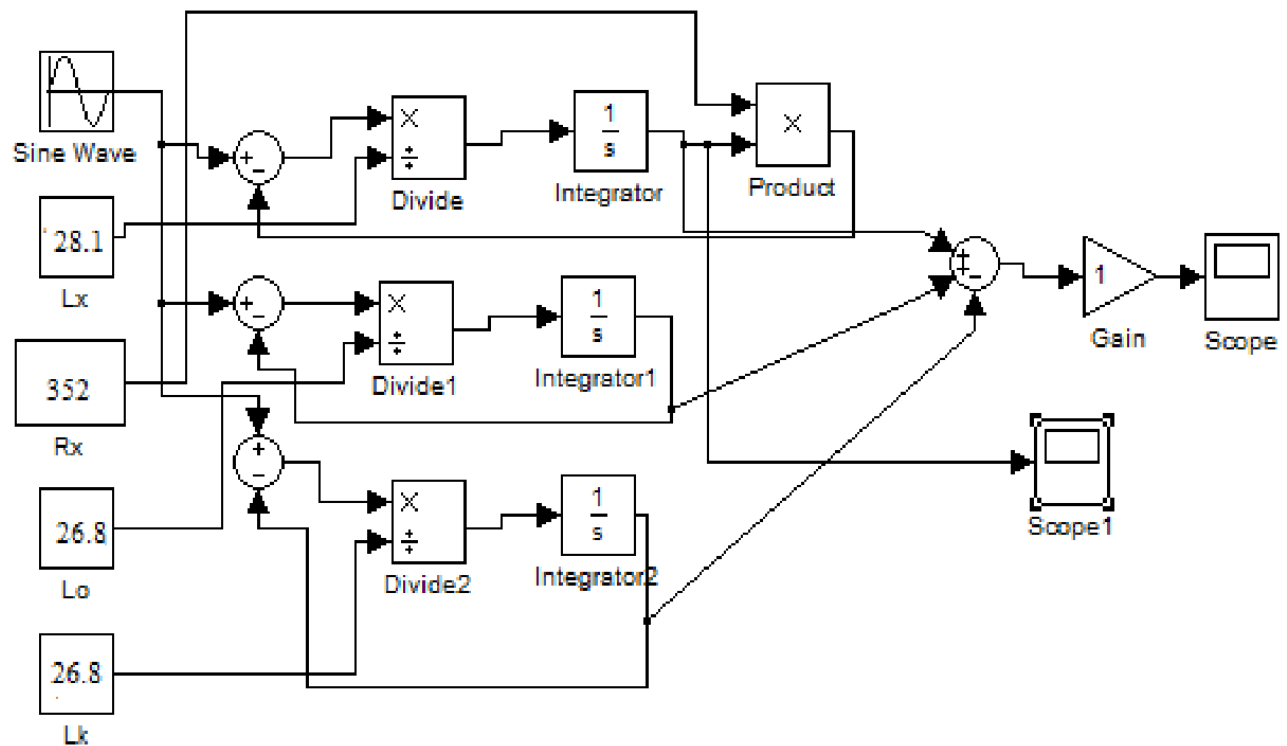


Рисунок 2.5 – Модель трьохкомпонентної схеми в Simulink пакета Matlab з впливом зміни температури

Значення амплітуди струму для трьохкомпонентної схеми заміщення становить 0,032 мА, а під час зміни температури 0,028 мА.

Для побудови двокомпонентної схеми застосовано диференціальне рівняння такого типу:

$$U_{\text{ж}} = (L_0 - L_{\text{вн}}) \cdot \frac{dI}{dt} + R_{\text{вн}} \cdot I.$$

Для двокомпонентної схеми (див. рис. 2.6) застосовується такі значення параметрів: початкове значення індуктивності $L_0 = 24,4$ мкГн, індуктивність $L_{\text{вн}} = 5,74$ мкГн, що вноситься, активний опір $R_x = 36,9$ Ом, що вноситься.

Для моделювання впливу температури значення параметрів $L_{\text{вн}} = 5,74$ мкГн, $L_0 = 24,4$ мкГн, $R_x = 36,9$ Ом збільшено на 10 %, та складають $L_{\text{вн}} = 6,31$ мкГн, $L_0 = 26,8$ мкГн, $R_{\text{вн}} = 40,5$ Ом, у моделі здійснюється вимірювання вихідного струму кола (див. рис. 2.7).

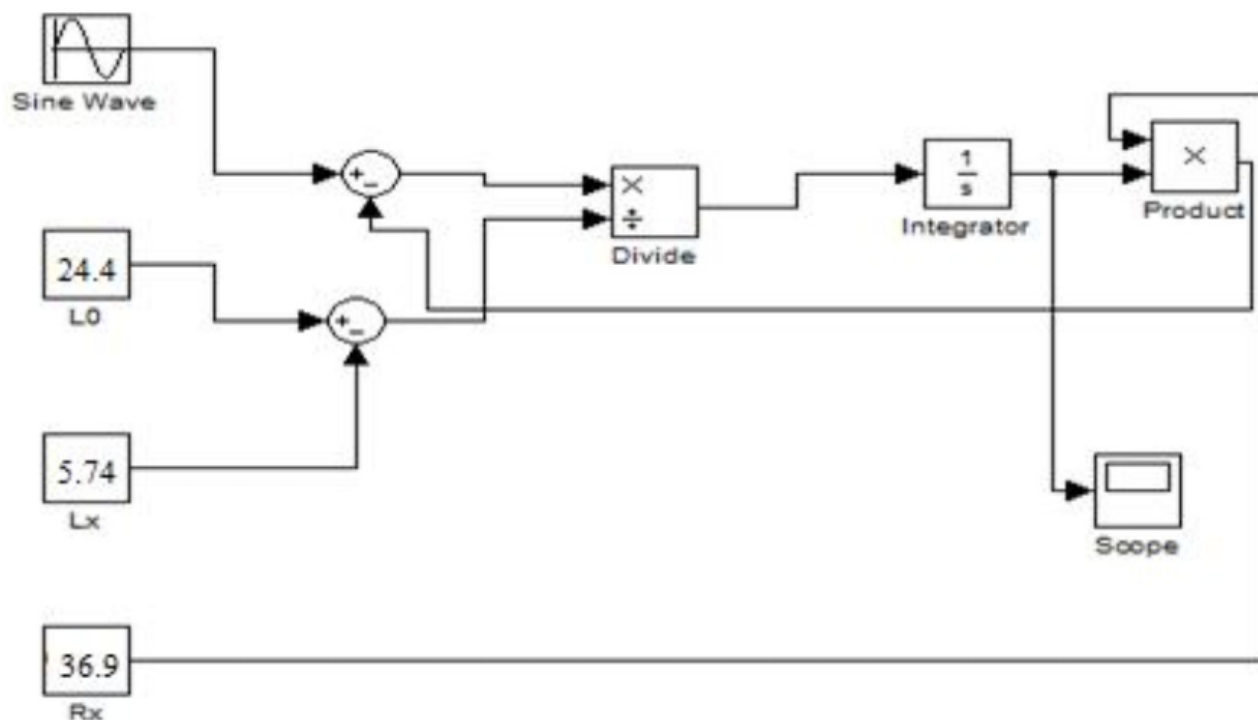


Рисунок 2.6 – Модель двокомпонентної схеми в Simulink пакета Matlab

Значення амплітуди струму для двокомпонентної схеми складає 0,17 мА, а під час зміни змінюється до 0,142 мА.

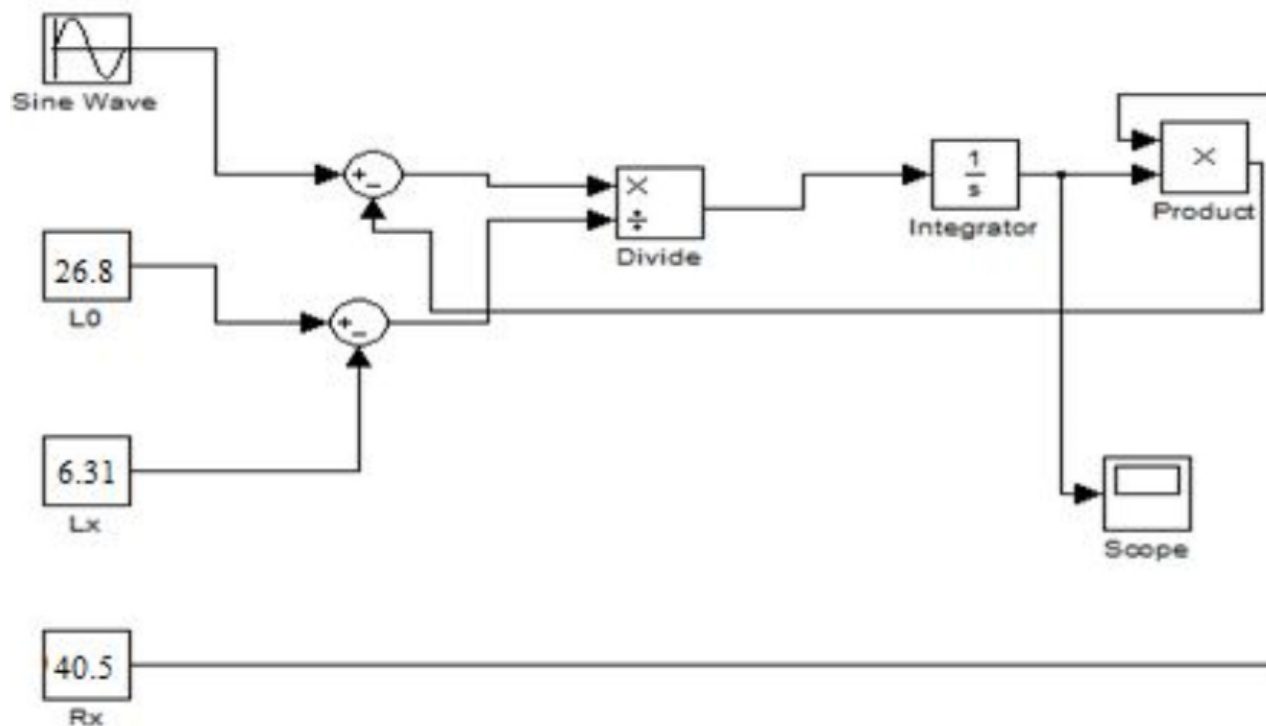


Рисунок 2.7 – Модель двокомпонентної схеми в Simulink пакета Matlab з впливом зміни температури

Результати імітаційного моделювання температурного дрейфу вихідного сигналу вихрострумowego сенсора за двома схемами заміщення наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати імітаційного моделювання температурного дрейфу вихідного сигналу вихрострумowego сенсора

Схема заміщення	Нормальні умови експлуатації	Зміна вихідного сигналу під час зміни, $t^{\circ}\text{C}$	Зміна вихідного сигналу, %
Двокомпонентна, I , мА	0,17	0,142	16,12
Трьохкомпонентна, ΔI , мА	0,032	0,028	9,38

Отже, похибка вихрострумowego сенсора, що обумовлено зміною температури, для трьохкомпонентної схеми зменшено у порівнянні з двокомпонентною в 1,72 рази:

$$K = \frac{\Delta_{\text{двокомп}}}{\Delta_{\text{трёхкомп}}} = \frac{16,12}{9,38} = 1,72.$$

3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ОСЬОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

3.1 Розробка схеми пристрою вимірювання осьових переміщень

Під час виконання випускної кваліфікаційної роботи розроблено пристрій вимірювання осьових переміщень на основі методів зменшення додаткової похибки під час зміни температури та термоудару, схему електричну функціональну якого наведено на рис. 3.1.

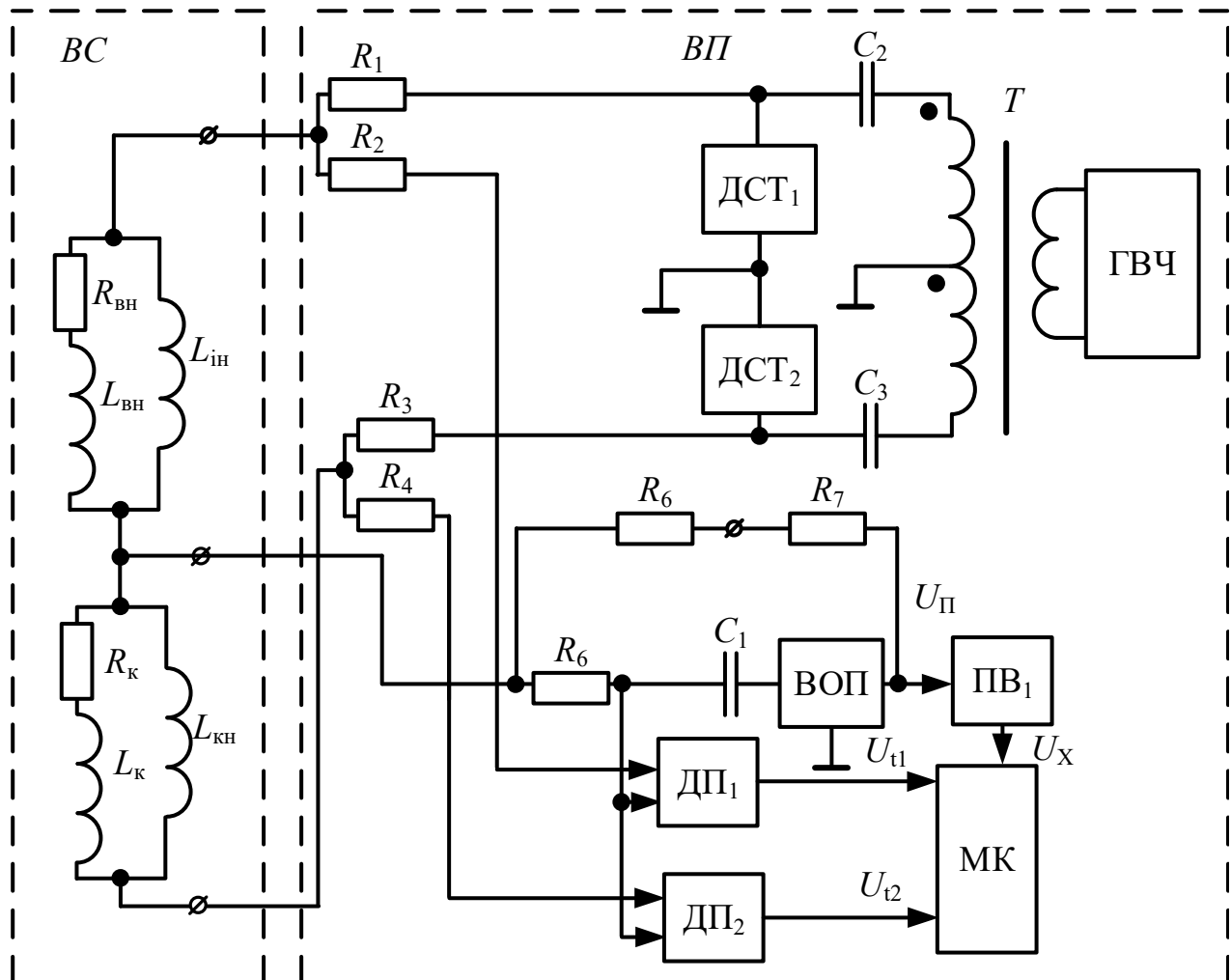


Рисунок 3.1 – Схема електрична функціональна пристрою вимірювання осьових переміщень з компенсацією температурного дрейфу його вихідного сигналу

Пристрій вимірювання осьових переміщень має в своєму складі вихрострумний сенсор (ВС) та вимірювальний перетворювач. Вихрострумний сенсор є паралельним з'єднанням двох котушок вимірювальної та компенсаційної, компенсаційну розташовано на відстані 15 мм від вимірювальної. Корпус сенсора виготовлено з титану та кераміки, що з'єднуються між собою зі застосуванням високотемпературної пайки.

Компенсаційна та вимірювальна котушки намотуються проводом ПНЕТ з ТУ 16-505.489-78. Це провід є нікельованим (мідним), який має високу стійкість до нагрівання, жили проводу покриті ізоляцією з емаллю.

Котушки намотуються з навалюванням, вони мають п'ять шарів, по десять витків у кожному. Вихрострумний сенсор підключено до вимірювального перетворювача зі застосуванням кабельної перемички. Ця перемичка має в своєму складі дрот марки МСЕ 16-13, що розміщено в фторопластовій трубці типу Ф-4ДЕ.

Довжина кабельної перемички може бути різною, її довжина може складати від 1 до 10 м. У корпусі вихрострумного сенсора розташовано пластину екранування з матеріалу, з якого виготовлено об'єкт вимірювального контролю, що дозволяє виконувати компенсацію неінформативного фактору.

Вимірювальний перетворювач представлено блоком з роз'ємом для забезпечення підключення вихрострумного сенсора, а також для підключення джерела живлення. Вимірювальний перетворювач має в своєму складі канал вимірювання осьового переміщення, а також вимірювальні канали температури для вимірювальної та компенсаційної котушок. За різницею вихідних сигналів вимірювальних каналів температури вимірювальної та компенсаційної котушок визначають відсутність чи наявність термічного удару. Вихідний струм вихрострумного сенсора ΔI передається до високочастотного операційного підсилювача (ВОП), який здійснює його перетворення до вихідної напруги:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\Pi} &= \dot{U}_D \frac{R_5 + R_7}{\sqrt{\left(R_{01}^2(h) + (j\omega L_1(h))^2\right) - \left(R_{02}^2(h) + (j\omega L_2(h))^2\right)}} = \\ &= \dot{U}_D \frac{R_5 + R_7}{\sqrt{\left(R_{\text{BH}}^2(h) + (j\omega L_{\text{BH}}(h))^2\right)}},\end{aligned}$$

де $\dot{U}_D$ – напруга, яка подається до обмоток сенсора;

R_5 – опір кабельної перемички;

R_7 – опір зразкового резистора;

Напруга $\dot{U}_D$ передається до входу прецизійного випрямляча (ПВ₁) та перетворюється до вихідної напруги:

$$\dot{U}_X = \dot{U}_{\Pi} \cdot K_{B1} = \dot{U}_D \frac{R_7 \cdot K_{B1}}{\sqrt{\left(R_{\text{BH}}^2(h) + (j\omega L_{\text{BH}}(h))^2\right)}},$$

де K_{B1} – коефіцієнт передачі за напругою ПВ₁.

Величина зміни напруги U_X є прямо пропорційною від добутку опору зразкового резистора та коефіцієнта передачі за напругою прецизійного випрямляча та є обернено пропорційною від модулю комплексного опору котушки вимірювання.

Конденсатори C_1 , C_2 , та C_3 застосовуються для виключення постійної складової напруги. Падіння напруги, що утворюється від струмів джерел постійного струму ДСТ₁ та ДСТ₂, передається до входів диференціальних підсилювачів ДП₁ та ДП₂. Значення напруги U_{t1} і U_{t2} є пропорційною від зміни температури вимірювальної та компенсаційної котушок, ці напруги надходять до мікроконтролеру. Якщо значення напруги U_{t1} та U_{t1} не дорівнюють між собою, то має місце термоудар, який коригується алгоритмічно. Усі типи аналогової напруги перетворюються мікроконтролером типу МК1986BE93У до двійкового коду та обробляються його програмною компонентною, а результат

вимірювання формується як цифровий код, який надходить від мікроконтролера до виходу пристрою вимірювання осьових переміщень.

Базові технічні характеристики мікросхем типу 1986 наведено в табл. 3.1 де позначено АЦП – аналого-цифровий перетворювач, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

Таблиця 3.1 – Базові технічні характеристики мікросхем типу 1986

Умовне позначення мікросхеми	1986BE91T	1986BE92Y	1986BE93Y
Основне функціональне призначення	32-разрядний однокристальний мікроконтролер з Flash-пам'яттю		
32 розрядна RISC архітектура	ARM Cortex-M3		
Вбудована пам'ять програм	128 Кбайт		
Зовнішня шина	32 розряду	8 розрядів	–
Виводи користувача USER IO	96	45	30
АЦП 12 розрядів	16 каналів	8 каналів	4 канали
ЦАП 12 розрядів	2	1	1
Інтерфейс UART	2	2	2
USB	Device Host FS (до 12 Мбіт/с) вбудований PHY		
Інтерфейс I2C	1	1	1
Інтерфейс CAN	2	2	2
Синхронний послідовний приймач-передавач SPI	2	2	2
Компаратор	3 входи	2 входи	2 входи

Частота дискретизації АЦП може бути до 500 кГц. Період цифрового перетворення дорівнює 28 тактів. Частота імпульсів для АЦП складає $14 \text{ МГц} / 28 = 500 \text{ кГц}$, це дозволить здійснювати високоточне вимірювання осьових переміщень під час дії термоудару.

3.2 Розробка протоколу взаємодії сенсора за інтерфейсом

Протокол взаємодії визначає порядок обміну інформаційними даними за допомогою інтерфейсу RS-485 між пристроєм вимірювання осьових переміщень та персональним комп'ютером. Під час запису чисел застосовується десяткова система числення. Префікс 0x можна використати для позначення чисел у 16-річній системі числення. Для позначення системи числення застосовується нижній індекс. Зіставлення символів байтам здійснюється у відповідності до таблиці ASCII кодування CP1251. У тексті одиночні символи розміщуються в апострофи, а рядки – в лапки. Для позначення символів, що не потрібно друкувати, застосовується екрануюча послідовність.

Вимірювальний перетворювач сенсора оснащений цифровий канал з інтерфейсом типу RS-485. Цей інтерфейс забезпечує прийом даних, керування пристроєм вимірювання осьових переміщень, а також здійснення налаштування цього пристрою. Інтерфейс типу RS-485 можна застосувати в напівдуплексному режимі. Як ведучий пристрій використовується персональний комп'ютер, а як ведений пристрій – пристрій вимірювання осьових переміщень. Пристрій не здійснює передачу до персонального комп'ютера інформаційних даних до того, поки не одержить відповідну команду.

У одному байті можна передавати 8 біт даних, біт парності не застосовується, тривалість стоп-біт складає 1 бітовий інтервал. Біти даних можна передавати від молодшого до старшого. Формат байту інформаційних даних наведено на рис. 3.2.

Швидкість обміну інформаційних даних між пристроєм та персональним комп'ютером може бути до 9600 біт/с.

Пристрій вимірювання осьових переміщень може працювати в трьох режимах: налаштування, перевірки та робочому. Під час налаштування та перевірки пристрій працює в одному сегменті мережі. У робочому режимі робота пристроїв різних типів здійснюється на різних сегментах мережі. Переведення пристрою на різні режими виконується командами керування від

персонального комп'ютера. Встановлений режим зберігається також після зникнення живлення від вихрострумowego сенсора.

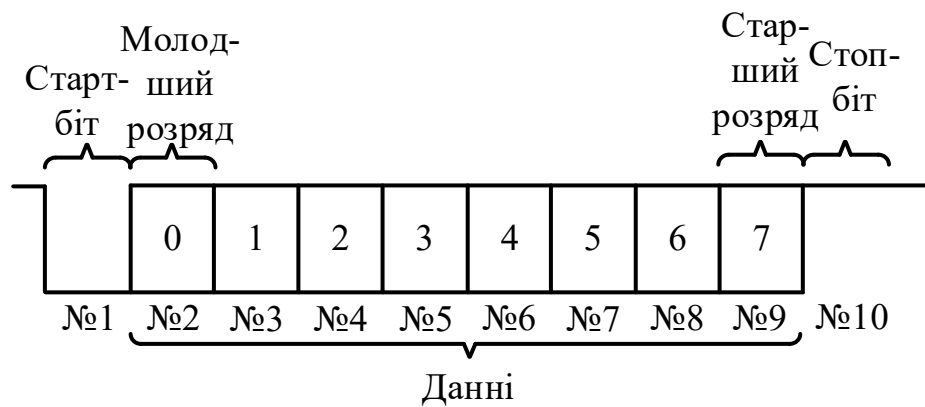


Рисунок 3.2 – Формат байту передачі інформаційного повідомлення

Команди від персонального комп'ютера складаються з чотирьох частин (див. табл. 3.2):

1. Старт-байт '#' (0x23) та його код (1 символ).
2. Розділювач ' %' (0x25) и адреса пристрою, до якого призначено команду (від 1 до 19 символів).
3. Для команд, які приймають параметри – перелік параметрів:
 - 3.1. Розділювач '&' (0x26).
 - 3.2. Данні параметрів (не більш 79 символів для всіх параметрів).
4. Стоп-байт '!' (0x21).

Таблиця 3.2 – Команда від персонального комп'ютера

'#'	код команди	' %'	адреса пристрою	'&'	П1	'&'	П2	...	'!'
старт-байт		розділювач		перелік параметрів (0 та більше)					стоп-байт

Відповіді від пристрою вимірювання осьових переміщень також складаються з чотирьох частин (див. табл. 3.3):

1. Старт-байт '#' (0x22) та код відповіді (1 символ).
2. Розділювач ' %' (0x25) та адрес пристрою, яка виконує команду (крім команд, що запитують або змінюють адресу пристрою датчика – для цих команд адреса передається в параметрах).
3. Для команд, які повертають параметри:
 - 3.1. Розділювач '&' (0x26).
 - 3.2. Данні параметри.
4. Стоп-байт '!' (0x21).

Таблиця 3.3 – Команда відповіді від персонального комп'ютера

"	код команди	' %'	адреса пристрою	'&'	П1	'&'	П2	...	'!'
старт-байт		розділювач		перелік параметрів (0 та більше)					стоп-байт

Усі інформаційні дані, що передаються, кодуються так, щоб пакети мали в своєму складі лише друковані символи з таблиці ASCII. Це відповідає байтам у діапазонах зміни від 0x20 до 0x7E, а також від 0x80 до 0xFF. Байти від 0x00 до 0x1F, а також 0x7F, відповідають символам керування таблиці ASCII, їх не застосовують.

У залежності від типу інформаційних даних використовується одна з схем кодування. Ця схема застосовується для обміну даними між пристроєм вимірювання осьових переміщень та персональним комп'ютером у вигляді значень вимірюваної величини, а також кодів аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворювачів. Над кожною цифрою вихідного десяткового числа виконується кодування двома двійковими тетрадами (одним байтом), які відповідають таблиці 3.4.

Застосування в десяткових числах байт, який відрізняється від тих, що наведено в табл. 3.4, є заборонено. Результат виконання декодування десяткового числа, який має в своєму складі заборонені байти, не визначено.

Таблиця 3.4 – Кодове представлення десяткових чисел ASCII-формі

Цифра десяткового числа	Кодове представлення		
	двійкова	шістнадцятирічна	символьне
0	0011 0000	0x30	'0'
1	0011 0001	0x31	'1'
2	0011 0010	0x32	'2'
3	0011 0011	0x33	'3'
4	0011 0100	0x34	'4'
5	0011 0101	0x35	'5'
6	0011 0110	0x36	'6'
7	0011 0111	0x37	'7'
8	0011 1000	0x38	'8'
9	0011 1001	0x39	'9'

Переважає більшість команд має адресу, вони виконуються тільки тип пристроєм, адреса якого збігається з тією, що передається в команді. Пристрій працює тільки з коротким і довгим адресом. Довга адреса є довільним рядком, довжина якого становить від 1 до 19 символів, що є унікальним для кожного пристрою. Для уніфікації адрес необхідно включати до складу довгої адреси номер пристрою, що розділено дефісом "Пристрій-020001". Довгі адреси – це такі, в яких збігаються їх довжина, а також усі символи в її межах. Коротка адреса – це двійково-десятькове число в межах від 0 до 255. Якщо є нульове значення, що коротка адреса є неprisвоєною, а під час дії порівняння адрес це значення не використовується. Значення 255 є зарезервованим для широкомовних команд. Усі інші значення від 1 до 254 можуть застосовуватися для адресації пристроїв вимірювання осьових переміщень. Короткі адреси є такими, що співпадають, якщо вони знаходяться в межах від 1 до 254 та збігаються з їх чисельними значеннями.

Під час обробки команд від вимірювальний пристрій спочатку інтерпретує передану в пакеті адресу як коротку, перетворює їх до числа. Якщо

перетворення здійснено успішно, то під час порівняння адреси пристрою спочатку виконується порівняння чисельних значень власної короткої адреси та тієї, що передано в пакеті. Якщо зазначені данні збігаються, то вимірювальний пристрій фіксує збігання адрес та здійснює виконання команди, що надійшла. Якщо ці значення не співпадають чи перетворення адреси до числа виконати неможливо, то пристрій сприймає передану в адресу як довгу та переходить до порівняння довгих адрес. Якщо довга адреса пристрою збігається з переданою, то пристрій ідентифікує збігання цих адрес та переходить до виконання команди, що надійшла. Якщо під час перевірок не зафіксовано збігання адрес, то пристрій не переходить до виконання команди. У 110 пакетах вимірювальний пристрій передає коротку адресу, якщо вона має значення від 1 до 254. Якщо коротка адреса дорівнює 0, то у відповідь передається довга адреса. Отже, має місце обробка команд, що надійшли.

ВИСНОВКИ

Виконано аналіз способів і засобів зменшення величини додаткової похибки вимірювання переміщень від зміни температури під час впливу термічного удару, а також нестационарній температурі.

Під час аналізу виявлено, що зі застосуванням технологічних і конструктивних способів не може бути досягнуто зниження величини додаткової похибки вимірювання переміщення від зміни температури. Отже, увагу потрібно приділити схмотехнічним способам з використанням мікроконтролерів.

Актуальність та необхідність виконання досліджень, що спрямовані на зменшення величини додаткової похибки вимірювання переміщень під час впливу термоудару, що підтверджується високими вимогами до показників точності й технічних характеристик сенсорів на базі вихрових струмів.

Виявлено, що зі застосуванням інваріантного вимірювання параметрів перетворювачів можна істотно підвищити точність та знизити вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів, зміна яких впливає на результати вимірювання.

Під час аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що має місце висока ефективність апроксимації експериментальних даних зі застосуванням трьохкомпонентної схеми заміщення у порівнянні з двохкомпонентною. Значення середньоквадратичного відхилення для трьохкомпонентної схеми заміщення, якщо $h = 0,1$ мм в 1,48 рази менше ніж с.к.в. для двохкомпонентної, а для $h = 2,8$ мм воно є меншим у 1,68 рази.

Пропонується застосовувати диференціальний метод включення котушок, які є вимірювальні та компенсаційні, що дозволяє зменшити вплив неінформативної складової вихідного сигналу вимірювача. Для забезпечення повної компенсації неінформативного параметра необхідно доволі високу точність виготовлення котушок для вимірювання та компенсації.

Під час імітаційного моделювання встановлено, що трьохкомпонентна схема заміщення сенсора з обліком компенсації початкової індуктивності дозволяє підвищити величину чутливості вимірювання переміщення на 26 %.

Під час розрахунку визначено, що величина методичної похибки для трьохкомпонентної схеми заміщення зменшено у порівняно з двокомпонентною на 45 %.

Похибка вихрострумового сенсора, що обумовлено зміною температури, для трьохкомпонентної схеми зменшено у порівнянні з двокомпонентною в 1,72 рази.

Під час виконання роботи розроблено пристрій вимірювання осьових переміщень на основі методів зменшення додаткової похибки під час зміни температури та термоудару.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Неразрушающий контроль: справочник / под ред. В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2001. – 642 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2003. – 893 с.
3. Тихонов, А.И. Пути обеспечения устойчивости датчиков давления к воздействию термоудара / А.И. Тихонов, Е.А. Васильев, Е.А. Мокров и др. // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2004. – С. 120 – 122.
4. Карпов, В. М. Уменьшение температурной погрешности ВТП / В.М. Карпов, В.Г. Запускалов // Дефектоскопия. – 1978. – № 4. – С. 102.
5. Батырев, Ю.П. Методы повышения температурной стабильности вихретоковых датчиков / Ю.П. Батырев, Н.П. Полуэктов, В.Н. Харченко и др. // Экология, мониторинг и рациональное природопользование: науч. тр. – М., 2000. – № 307 (2). – С. 103 – 110.
6. Кикот, В.В. Исследование возможностей уменьшения температурной погрешности пьезодатчиков динамического давления жидких и газообразных сред / В.В. Кикот // Измерение, контроль, информатизация : сб. мат. XVII Междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016. – С. 213 – 217.
7. Дунаевский, В.П. Вихретоковые датчики трансформаторного типа / В.П. Дунаевский, А.С. Машков, Ю.Н. Батырев и др. // Научные труды МГУЛ: Экология, мониторинг и рациональное природопользование. – М., 1999. – № 302 (11). – С. 160 – 163.
8. Тихоненков, В.А. Температурные погрешности датчиков механических величин при воздействии нестационарных тепловых полей / В.А. Тихоненков. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 152 с.
9. Беленький, Л.Б. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных

двигателях / Л.Б. Беленький, С.Ю. Боровик, Б.К Райков и др.; под общ. ред. О.П. Скобелева. – М.: Машиностроение, 2011. – 298 с.

10. Андреев, А.Н. Измеритель малых перемещений для машиностроительных производств / А.Н. Андреев, В.И. Чернецов // Вопросы обеспечения точности машиностроительных производств. – Пенза : Изд-во ПГТУ, 1992. – С. 8 – 10.

11. Дорофеев, А.Л. Вихревые токи / А.Л. Дорофеев. – М.: Энергия, 1977. – 72 с.

12. Туз, Ю.М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Ю.М. Туз. – К.: Высшая школа, 1976. – 430 с.

13. Loos, H.R. Wirkungsweise und Berechnung von Meßwertaufnehmer auf Wirbelstrombasis zur berührungsfreie Wegmessung / H.R. Loos // Techn. Mess. Atm. – 1976. – № 43(10). – P. 309 – 315.

14. Казаков, В. А. Прибор для контроля сопротивления изоляции и электрической емкости между проводниками печатных плат и жгутов / В.А. Казаков, С.В. Никишин, А.В. Светлов и др. // Статистическая идентификация, прогнозирование и контроль : тезисы докладов Всесоюзн. науч.техн. семинара. – Севастополь, 1991. – С. 40 – 41.

15. Маланин, В.П. Измерение информативных параметров вихретоковых датчиков с использованием настраиваемых моделей / В.П. Маланин, А.Д. Семенов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4(10). – С. 53 – 58.

16. Орнатский, П.П. Автоматические измерения и приборы / П.П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1973. – 552 с.

17. Абрамов, С.В. Применение двухчастотного метода выделения информативного сигнала при построении измерительных цепей первичных вихретоковых преобразователей / С.В. Абрамов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3(21). – С. 82 – 90.

ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу та організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце з персональним комп'ютером, повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світових прорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світових прорізів. Віконні прорізи в приміщенні з персональним комп'ютером повинні мати регульовані жалюзі чи занавіски або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць з персональним комп'ютером у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з персональними комп'ютерами рекомендується розміщувати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з персональним комп'ютером повинна складати 6 м², об'єм – 20 м³. Неприпустиме розташування персонального комп'ютера, під час якого працюючий звернений обличчям або спиною до вікон чи кімнати задньої частини персонального комп'ютера, де монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень з персональними комп'ютерами полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери, що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені до «Переліку дозволених, МЗ» 1977-1985 р.

У лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з персональними комп'ютерами розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами 3 м. Екрани моніторів знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення ($S=21 \text{ м}^2$, $V=73,5 \text{ м}^3$) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 м від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650, глибина 550, ширина 450 міліметрів, відповідно. Робочий стілець оснащений підйомно-поворотним пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння та спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

А.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентильовання. Витрати повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаються за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_{\text{В}} - t_{\text{Н}})}, \quad (\text{A.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.;

c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг);

p – об'ємна вага повітря (1,226 кг/м³);

$t_{\text{В}}$ – температура витяжного повітря (30°C);

$t_{\text{Н}}$ – температура приточного повітря (20°C).

Розраховується надлишкове надходження тепла за формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{A.2})$$

де $Q_{\text{уст}}$ – виділення тепла від устаткування;

$Q_{\text{пер}}$ – виділення тепла від персоналу;

$Q_{\text{осв}}$ – надходження тепла від електричного освітлення;

$Q_{\text{ср}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначається виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{\text{уст}} = P \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860, \quad (\text{A.3})$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год;

K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95);

K_6 – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{\text{уст}} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год.} \end{aligned}$$

Визначається виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою формули:

$$Q_{\text{пер}} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.4})$$

де n – кількість працюючих;

g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначається надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{\text{осв}} = E_m \cdot g_1 \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.5})$$

де E_M – нормована освітленість для зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк;

g_1 – питоме тепловиділення на 1 м² підлоги під час освітленості в 1 лк (для люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.);

S – площа приміщення, м².

Визначається надходження тепла від сонячної радіації через вікна за формулою:

$$Q_{CP} = F \cdot g_2 \cdot K_{OCL} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год}, \quad (A.6)$$

де F – площа віконних прорізів (3 x 2,5=7,5 м²);

g_2 – кількість тепла, що надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.);

K_{OCL} – коефіцієнт ослаблення, приймається 0,4.

Визначається кількість надлишкового тепла:

$$Q_{HAД} = Q_{УСТ} + Q_{ПЕР} + Q_{OCB} + Q_{CP} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначаються витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{HAД}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 м³/год., що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати

(22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та (40 – 60) %, відповідно. Під час збереження всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, швидкість руху повітря (0,1 – 0,2) метрів в секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія під час збереження всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

А.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($H=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{\text{стелі}} = 70$ %, $P_{\text{стін}} = 50$ %. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, що розташовано на стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначається висота підвісу світильників над підлогою:

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути в межах (2,5 – 4,0) м, залежно від характеристики світильника. Освітлення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідного відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначається висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,1 - 0,7 = 2,4 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається під час відповідного співвідношення відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначається рекомендована відстань між світильниками:

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,4 = 1,68 \text{ м.}$$

4) Розраховується необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{1,68^2} = 7,4.$$

Приймається 8 світильників, з обліком розмірів приміщення вони розташовуються у два ряди по 4 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника ($\Phi_{\text{л}}$) визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк;

K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп;

S – площа приміщення, що освітлюється, м²;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15);

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світового потоку, що визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та

коефіцієнтів відбиття стін і стелі.

6) Визначається показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 ($i = 2,5$, $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обирається лампа Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої дорівнює 2000 лм. Хоча це значення на 19,2 % більше розрахованого, проте не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{\text{св}} = P \cdot N = 150 \cdot 8 = 1200 \text{ Вт.}$$