

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»  
Кафедра (автоматизації, метрології та енергоефективних технологій)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

«Вимірювальна система для дослідження магнітного поля постійних магнітів  
електромеханічних перетворювачів енергії»  
(тематика кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 курсу, групи ДЕА-Ів23мг  
спеціальності: 175 Інформаційно-вимірні технології

(підпис) (ім'я та прізвище)

Дмитро АЛІШКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник Олена БЛИЗНИЧЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент Олег КОНДРАТЮК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

*«До захисту допущено»*

Завідувач кафедри Геннадій КАНЮК  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль Євген КЛЮЧКА  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК Євген КЛЮЧКА  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. В.Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»  
Кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій  
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології  
Освітньо-професійна програма «Якість, стандартизація та сертифікація»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

(підпис)

д.т.н., проф. Геннадій КАНЮК  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу (дипломну роботу/дипломний проєкт)  
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу (ці) вищої освіти Дмитру АЛЄШКО  
(ім'я, прізвище)

- Тема «Вимірювальна система для дослідження магнітного поля постійних магнітів електромеханічних перетворювачів енергії»  
затверджена наказом по університету № 4801-5/3345 від «12» жовтня 2024 р.
- Термін здачі закінченої роботи «05» грудня 2024 р.
- Вихідні дані до роботи/проєкту: Об'єктами дослідження є методи вимірювання магнітного поля постійних магнітів, розробка алгоритму вимірювань та обробки отриманих даних за допомогою програмного середовища LabVIEW.
- Зміст роботи/проєкту (перелік питань, що їх належить розробити): аналіз вимірювального комплексу; - визначення та аналіз наукових досліджень магнітного стану електромеханічних перетворювачів; - визначення джерел невизначеності вимірювання магнітного поля; - обробка результатів вимірювань магнітної індукції постійного магнітного поля;
- Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал): Презентація, виконана в програмі Microsoft PowerPoint
- Консультант:

| Розділ | Консультант              | Підпис, дата      |                     | Оцінка (бали) |
|--------|--------------------------|-------------------|---------------------|---------------|
|        |                          | Завдання<br>видав | Завдання<br>прийняв |               |
| 1-4    | <u>Олена БЛИЗНИЧЕНКО</u> |                   |                     |               |

7. Дата видачі завдання «02» вересня 2024 р.

Керівник роботи

(підпис)

Олена БЛИЗНИЧЕНКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Дмитро АЛЄШКО

(ім'я, прізвище)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК**  
**виконання кваліфікаційної роботи**  
**(дипломної роботи/дипломного проєкту)**

| № з/п | Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання                                                                      | Термін виконання           | Позначки керівника про виконання завдань |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| 1     | Вивчення постійних магнітів, їхніх переваг і недоліків, принципу дії, сфери застосування і матеріалу, що застосовується в магнітоелектричних машинах | 12.10.2024-<br>19.10.2024  |                                          |
| 2     | Вивчення експлуатаційної документації та характеристик засобів вимірювань і допоміжного обладнання, що входять до складу вимірювального комплексу    | 19.10.2024 –<br>30.10.2024 |                                          |
| 3     | Вивчення та аналіз публікацій у галузі магнітного стану електромеханічних перетворювачів                                                             | 30.10.2024 –<br>07.11.2024 |                                          |
|       | Вивчення джерел невизначеності вимірювання магнітного поля під час проведення експерименту                                                           | 08.11.2024-<br>15.11.2024  |                                          |
|       | Автоматизувати обробку результатів вимірювань магнітної індукції постійного магнітного поля.                                                         | 15.11.2024-<br>22.11.2024  |                                          |
|       | Оформлення повноцінної записки та презентації                                                                                                        | 22.11.2024-<br>30.11.2024  |                                          |

**Здобувач (ка) вищої освіти**

  
(підпис)

Дмитро АЛЄШКО  
(ім'я, прізвище)

**Нормоконтроль**

  
(підпис)

Євген КЛЮЧКА  
(ім'я, прізвище)

(підпис)

(ім'я, прізвище)

## **РЕФЕРАТ**

до магістерської роботи на тему

**«Вимірювальна система для дослідження магнітного поля постійних магнітів електромеханічних перетворювачів енергії»**

**Дмитро АЛЄШКО**

Магістерська робота складається з 64 сторінки, 14 рисунків, 2 таблиць, список літератури містить 12 джерел.

Дослідження зосереджене на розробці та аналізі вимірювальної системи для вивчення магнітного поля постійних магнітів, які використовуються в електромеханічних перетворювачах енергії.

У процесі дослідження було вивчено публікації з проблематики економічної ефективності використання електромеханічних перетворювачів енергії.

Дослідження надалі застосовуватимуться для фізичних випробування моделей, макетних і дослідних зразків нових електромагнітних пристроїв, які виробляють з метою перевірки й уточнення характеристик, отриманих розрахунковим шляхом під час проектування нового пристрою.

КАЛІБРУВАННЯ З ВІДДАЛЕНИМ ДОСТУПОМ,  
ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС, КАЛІБРУВАННЯ,  
МЕТРОЛОГІЯ, ЗАСІБ ВИМІРЮВАНЬ, ЕЛЕКТРИЧНІ ВЕЛИЧИНИ,  
LABVIEW, ВИМІРЮВАННЯ.

## ABSTRACT

for the Master's thesis on the topic

«Measuring system for studying the magnetic field of permanent magnets of electromechanical energy converters»

Dmytro ALYESHKO

The Master's thesis consists of 64 pages, 14 figures, 2 tables, and the reference list contains 12 sources.

The research focuses on the development and analysis of a measurement system for studying the magnetic field of permanent magnets used in electromechanical energy converters.

In the course of the research, publications on the issue of the economic efficiency of the use of electromechanical energy converters were studied.

Further research will be used for physical testing of models, prototypes and prototypes of new electromagnetic devices, which are produced for the purpose of checking and clarifying the characteristics obtained by calculation during the design of a new device.

CALIBRATION WITH REMOTE ACCESS, SOFTWARE AND  
HARDWARE COMPLEX, CALIBRATION, METROLOGY,  
MEASURING INSTRUMENT, ELECTRICAL QUANTITIES,  
LABVIEW, MEASUREMENT.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПОЗНАЧЕННЯ, СКОРОЧЕННЯ.....                                                                                                  | 8  |
| ВСТУП.....                                                                                                                   | 9  |
| 1 ПОСТІЙНІ МАГНІТИ .....                                                                                                     | 12 |
| 1.1 Переваги та недоліки постійних магнітів .....                                                                            | 14 |
| 1.2 Принцип дії постійних магнітів.....                                                                                      | 15 |
| 1.3 Область застосування постійних магнітів .....                                                                            | 17 |
| 1.4 Матеріал, застосовуваний для експерименту .....                                                                          | 21 |
| 1.5 Магніти, що застосовуються в магнітоелектричних<br>машинах .....                                                         | 23 |
| 1.5.1 Магнітотверді ферити стронцію, барію, кобальту....                                                                     | 24 |
| 1.5.2 Магнітне поле досліджуваного магніту .....                                                                             | 25 |
| <b>Висновок по розділу</b> .....                                                                                             | 26 |
| 2. ВИВЧЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ТА<br>ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ І<br>ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ ..... | 27 |
| 2.1 Тесламетр-веберметр універсальний ТПУ-2В .....                                                                           | 27 |
| 2.2 Котушки Гельмгольца КГ-ЗЕТ-1 і КГ-ЗЕТ-2.....                                                                             | 30 |
| 2.3 Промисловий робот.....                                                                                                   | 32 |
| 2.4 Основа вимірювального комплексу .....                                                                                    | 34 |
| <b>Висновок по розділу</b> .....                                                                                             | 36 |
| 3. ВИВЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ<br>МАГНІТНОГО СТАНУ .....                                                          | 38 |
| ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ .....                                                                                       | 38 |
| 3.1 Ефективність постійного магніту й асинхронного двигуна .                                                                 | 38 |
| 3.2 Діагностика електромеханічних перетворювачів за<br>зовнішньому магнітному полю.....                                      | 40 |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Висновок по розділу .....</b>                               | <b>42</b> |
| <b>4.    ВИЯВЛЕННЯ    ДЖЕРЕЛ    НЕВИЗНАЧЕНОСТІ</b>             |           |
| <b>ВІМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....</b>                        | <b>43</b> |
| 4.1 Методична похибка .....                                    | 43        |
| 4.2 Інструментальна похибка .....                              | 43        |
| 4.2.1 Відносна похибка визначення постійної котушок            |           |
| Гельмгольца .....                                              | 43        |
| 4.2.2 Відносна похибка вимірювань магнітної індукції           |           |
| тесламетром-веберметром універсальним ТВУ-2В .....             | 44        |
| 4.3 Похибка калібрування робота промислового .....             | 45        |
| 4.4 Похибка прецизійності .....                                | 50        |
| 4.5 Похибка позиціонування постійного магніту .....            | 51        |
| 4.6 Похибка геометричних параметрів .....                      | 53        |
| <b>Висновок по розділу .....</b>                               | <b>54</b> |
| <b>5.    ОБРОБКА    РЕЗУЛЬТАТІВ    ВІМІРЮВАНЬ    МАГНІТНОЇ</b> |           |
| <b>ІНДУКЦІЇ ПОСТІЙНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....</b>                | <b>56</b> |
| 5.1 Автоматизація розрахунку відносної похибки вимірювання     |           |
| магнітної індукції на кожну точку .....                        | 56        |
| <b>Висновок по розділу .....</b>                               | <b>60</b> |
| <b>ВИСНОВОК.....</b>                                           | <b>62</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>                        | <b>63</b> |

## **ПОЗНАЧЕННЯ, СКОРОЧЕННЯ**

У цій роботі застосовано такі позначення та скорочення:

МІ - магнітна індукція;

ГДУ - гранично-допустимий рівень;

БД - безконтактне діагностування;

НД - нормативні документи;

ПМП - постійне магнітне поле;

ЕД – експлуатаційна документація;

р.у. - робочі умови;

ЗВ - засіб вимірювань;

ВО - допоміжне обладнання;



## ВСТУП

Згідно з енергетичною стратегією України на період до 2050 року основними завданнями розвитку науково-технічної та інноваційної діяльності в галузях паливно-енергетичного комплексу та схожих із ними галузях промисловості є:

- розвиток науково-технічного потенціалу;
- підвищення інноваційної активності організації паливно-енергетичного комплексу;
- модернізація та підвищення конкурентоспроможності галузей паливно-енергетичного комплексу переважно на базі технологій, обладнання та матеріалів вітчизняного виробництва.

А також згідно з державною програмою "Енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності на період до 2030 року" одними з основних завдань енергетичної галузі України є завдання підвищення надійності та забезпечення високої енергоефективності електрообладнання.

Одним із найважливіших чинників підвищення надійності та економічної ефективності використання електромеханічних перетворювачів енергії є впровадження засобів їхньої діагностики та врахування всіх невизначеностей вимірювання магнітного поля на старті розроблення імітаційної моделі деталі. Призначення діагностики та виявлення невизначеності дасть змогу попередити відмову та несправність, підтримати експлуатаційні показники у

встановлених межах, прогнозувати стани з метою повного використання ресурсу.

У зв'язку з вищесказаним, варто зазначити, що двигуни з постійними магнітами явно перевершують інші двигуни. Оскільки магніти намагнічені постійно, ротор може працювати синхронно зі змінним струмом перемикавання. Прослизання, необхідне для асинхронних двигунів, усунуто, що підвищує теплову ефективність.

Конструкція двигунів із постійними магнітами забезпечує питому потужність (крутний момент) у 2-3 рази вищу, ніж у, наприклад, асинхронних двигунів, із меншими втратами в осерді приблизно на 50 %. Незалежно від того, як ви вигинаєте або формуєте асинхронний двигун, добре спроектований синхронний двигун з постійними магнітами забезпечить збільшений діапазон, кращу продуктивність і так далі.

Наразі ситуація з популярністю електричних машин з постійними магнітами кардинально змінюється в бік розвитку, після появи так званих супермагнітів або неомагнітів системи Nd-Fe-B з високими значеннями запасеної енергії. Розкид тільки за величиною потужності становить від декількох Ватт до десятків МегаВатт. Різноманітність конструктивних рішень і виконань також дуже велика. Найбільш затребуваними з точки зору високих питомих характеристик є моделі, де ротор має сегментовану або збірну/закриту конструкцію. Всі ці фактори і породжують необхідність діагностики та виявлення всіх невизначеностей вимірювання магнітного поля постійних магнітів.

Мета мого дослідження полягає у вивченні вимірювального комплексу, виявленні джерел невизначеностей вимірювань магнітного поля постійних магнітів і розробленні проекту інструкції вимірювань на основі отриманих експериментальних даних. Варто зазначити, що проєкт інструкції вимірювань надалі підлягатиме коригуванню, у зв'язку з удосконаленням як вимірювального комплексу, так і методу дослідження постійних магнітів.

Для досягнення поставленої мети в цій роботі було сформульовано низку завдань:

- вивчення постійних магнітів, їхніх переваг і недоліків, принципу дії, сфери застосування і матеріалу, що застосовується в магнітоелектричних машинах;
- вивчення експлуатаційної документації та характеристик засобів вимірювань і допоміжного обладнання, що входять до складу вимірювального комплексу;
- вивчення та аналіз публікацій у галузі магнітного стану електромеханічних перетворювачів;
- виявлення джерел невизначеності вимірювання магнітного поля під час проведення експерименту;
- автоматизувати обробку результатів вимірювань магнітної індукції постійного магнітного поля.

## 1 ПОСТІЙНІ МАГНІТИ

Феромагнітні матеріали, які можуть зберігати велику намагніченість, якщо виключити зовнішнє магнітне поле, називається постійним магнітом.

Постійні магніти виробляють із різноманітних металів, таких як кобальт, залізо, нікель, сплави рідкоземельних металів (для неодимових магнітів), а ще з природних мінералів, таких як магнетити.

Зовнішній вигляд постійних магнітів може бути різної форми, кілька варіантів представлено на рис. 1.1



Рис. 1.1 - Зовнішній вигляд постійних магнітів

Постійний магніт - це частина магнітних систем електротехнічних матеріалів. Робота обладнання з постійними магнітами заснована на перетворенні:

- механічної енергії в електромагнітну енергію;
- електромагнітної енергії в механічну енергію;
- механічної енергії у внутрішню енергію.
- До постійних магнітів існують певні вимоги:
- висока питома магнітна енергія;
- мінімальні габаритні розміри за заданої намагніченості поля;
- збереження працездатності у великому радіусі температур;
- стійкість до впливу зовнішніх магнітних полів;
- технологічність;
- низька собівартість початкової сировини;
- стійкість магнітних параметрів.

Для проведення експерименту було використано постійний магніт із висококоерцитивного сплаву типу NdFeB[1] з параметрами, наведеними в табл..1.1.

Табл. 1.1 - Характеристики магніту

| Залишкова індукція, Тл | Коерцитивна сила за індукцією, кА/м | Коерцитивна сила за намагніченістю, кА/м | Робоча температура, °С |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|
| 1,31                   | 925                                 | 1300                                     | 150                    |

## 1.1 Переваги та недоліки постійних магнітів

Оскільки електричний струм і його властивості - це наслідок руху електричних зарядів (крайні рухаються відносно інших нерухомих зарядів), то виникають різні електричні взаємозв'язки. Що бажано розуміти під "справжнім" електричним струмом?

Справжній струм можна розглядати, коли є заряди, далекі від інших, що складаються з рівного числа негативних і позитивних заряджених частинок, деякі з яких рухаються порівняно з іншими в переважному напрямку. Цей рух зарядів різного знака відносно один одного є нейтральним струмом. Інші варіанти руху заряду, наприклад, з переважанням зарядів того ж знака, будуть по-своєму виведені з струму нейтралітету і, відповідно, почнуть мати деякі особливості електричних взаємодій.

У деяких ситуаціях ми далекі від того, щоб мати справу з нейтральними струмами, тому що існує різний розподіл зарядів за площею провідників зі струмом, а також збільшення напруженості електричного поля на границях деяких дротів (наявність збудливої струмової ЕРС і т.д.). Отже, для освоєння властивостей нейтрального струму слід використовувати або кільцевий суперпровідник зі струмом, або постійні магніти, які в цьому випадку можна розглядати як систему з кільцевим нейтральним струмом.

## 1.2 Принцип дії постійних магнітів

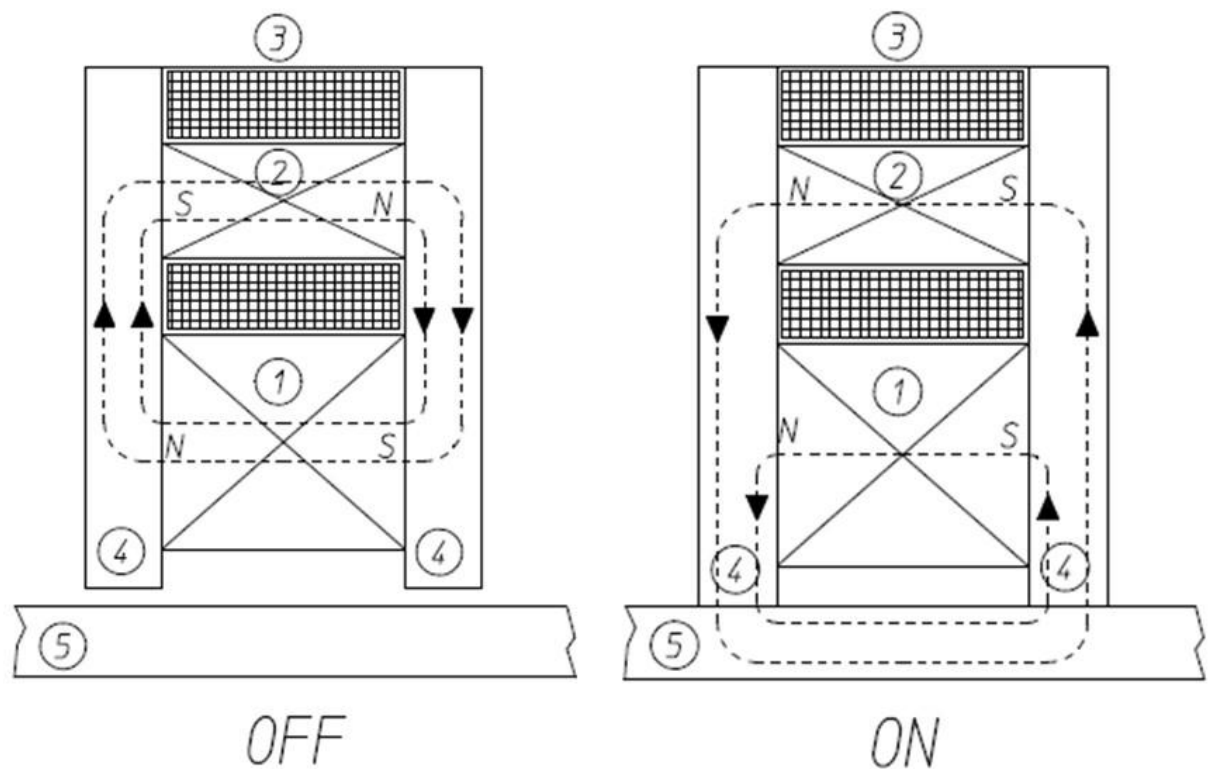
Перший патент на електромагніт було видано понад півстоліття тому у Франції 1958 року. Це був підйомний магніт, що складався з двох однакових постійних магнітів, один з яких був оточений котушкою.

Електричний імпульс дав змогу змінити намагніченість половини магнітів і, отже, закрити і відкрити магнітне поле.

Інакше кажучи, після цього не було необхідності в переміщенні частин усередині магнітного захоплення, і сама конструкція стала простішою, надійнішою і довговічнішою. При цьому було збільшено вантажопідйомність.

Далі, як вони кажуть. Використовуючи магнітні характеристики матеріалів, які стали доступні завдяки дослідженням і технологіям у цій галузі, індустрія промислового устаткування просунулася набагато далі, внаслідок чого з'явилися кілька магнітних груп із різними характеристиками.

Електропостійний магніт - проста магнітна схема, представлена на рис. 1.2, яка дає змогу легко зрозуміти роботу постійного магніту. Група (1), пов'язана з групою (2). Навколо знаходиться котушка (3). Дві ці групи допомагають подачі обов'язкової енергії, а друга виконує функцію управління досліджуваним магнітним ланцюгом.



1 - Група необоротних магнітів NdFeB/SmCo; 2 - Група оборотних магнітів AlNiCo V; 3 - Котушка; 4 - Наконечники полюса; 5 - Навантаження

Рис. 1.2 - Принцип дії електропостійних магнітів

Система запускається коротким імпульсом струму відповідного знака. Струм намагнічує оборотну групу в тому самому напрямку, що й намагнічування необоротної групи, і обидва працюють паралельно. Сума всього потоку проходить через наконечники полюса (4), закриваючись при навантаженні (5), яке притягується.

Для вимкнення на котушку подається імпульс струму з різним напрямком до попереднього, і дві групи йдуть послідовно одна за одною: магнітний потік однієї групи, проходячи через розширення



(4), замикається на іншій групі, яка перебуває всередині підіймача, внаслідок чого навантаження звільняється.

Оскільки імпульс струму триває зовсім короткий проміжок часу, то він надає обладнанню дві переваги - це: • економія електроенергії; • зниження перегріву.

Оскільки подібні магніти не залежні від зовнішніх впливів енергії, вони не здатні звільнити навантаження, якщо немає напруги або електричний кабель несправний, і тому створюють безпеку в разі виникнення несподіваних ситуацій.

### **1.3 Область застосування постійних магнітів**

Однією з особливостей двигунів з активним використанням постійних магнітів є можливість використання електричного резонансу. Оскільки керуючий електромагніт періодично змінює свою полярність, тобто живиться змінним струмом, частота якого залежить від швидкості (у разі роторного двигуна), електромагніти можуть бути включені в коливальний контур з ємністю. З'єднання електромагнітів може бути послідовним, паралельним або комбінованим, а ємність обирають резонансом на робочій частоті двигуна, при цьому середнє значення струму, що проходить через електромагніти, буде більшим, а зовнішнє джерело струму компенсуватиме переважно активні втрати.

Цей режим буде найпривабливішим з погляду економії, а двигун, у якому він використовується, називатиметься

magneticresonancestepping. Частота обертання двигуна в цьому випадку практично не залежить від навантаження і визначається частотою електричного резонансу, поділеною на кількість полюсів, незважаючи на збільшення споживаного струму зі збільшенням навантаження. Для збільшення числа обертів можна використовувати багатофазні силові ланцюги для електромагнітів двигуна. Середнє очікуване зниження енергоспоживання за даними магнітно-резонансних крокових двигунів може досягати 60-75 % порівняно зі звичайними електродвигунами. Такі двигуни характеризуються високим крутним моментом, доволі жорсткими навантажувальними характеристиками, стабільною швидкістю обертання, високою надійністю (якір не має струмових елементів), відсутністю рухомих контактів та іскор тощо. Таким чином, сфера їх застосування матиме свої особливості.

Незважаючи на це, у деяких відношеннях вони можуть перевершити як трифазні асинхронні та синхронні машини, так і колекторні двигуни постійного струму. Однією з головних переваг є низьке енергоспоживання.

Використання постійних магнітів ефективно, наприклад, під час проєктування електрогенератора з нерухомим ротором. Перевагою таких генераторів є відсутність рухомих частин, висока надійність, економічність, простота конструкції. Використання магнітних матеріалів з особливими властивостями дасть ще більш економічний результат. Середнє зниження для генераторів цього типу може досягати 50 % і більше.

Їх конструкція заснована на принципі модуляції сумарного магнітного поля трьох постійних магнітів. Використання постійних магнітів дає змогу знизити енерговитрати на вироблення електроенергії.

Магнітна система цього генератора загалом являє собою "хрест у кільці", де одна з поперечок являє собою постійний магніт, а інша - керуючий електромагніт, котушку якого можна розділити на дві частини або використовувати як одну котушку. Кільце виконано у вигляді магнітопроводу з малими втратами на вихрові струми, на якому розташовано 4 робочі обмотки (вихідні обмотки), з'єднані попарно. Вихідна напруга має подвійну частоту відносно частоти струму, що живить керуючий електромагніт.

Якщо під час роботи звичайного генератора (з обертовим ротором) постійний магнітний потік ротора (постійних магнітів або електромагнітів), що обертається від зовнішнього приводного двигуна, періодично змінює магнітний потік в обмотках статора, збільшується механічна вартість приводного двигуна.

У разі нерухомого ротора відсутні втрати на тертя і відсутній протидіючий крутний момент приводного двигуна. По суті, це особливий тип трансформаторного перетворювача з додатковою зарядкою від магнітного поля постійних магнітів. У процесі перетворення вхідного змінного струму вихідна частота струму подвоюється.

Оскільки магнітне поле постійних магнітів не змінює свого напрямку - відбувається лише періодичний перерозподіл його

секторами кільця, воно активно працює, роблячи свій "внесок" у генерацію ЕРС.

Магнітний потік регулятора або первинної обмотки електромагніту змінює знак, тобто відбувається процес, аналогічний процесу простого трансформатора. Ефективність перетворення трансформатора досить висока. Іншими словами, ми отримуємо подвоєну частоту трансформатора з підвищеним ККД.

Що це в кінцевому підсумку дає вам? Виходить, що вхідна потужність, принаймні, менша за вихідну. Перевищення вихідної потужності над вхідною відбувається за рахунок енергії постійних магнітів, які, на відміну від звичайної схеми генерації, є стаціонарними.

Додаткові характеристики цього генератора можуть бути отримані шляхом нанесення магнітних матеріалів зі спеціальними властивостями на кільцевий сердечник статора.

Недоліками пристрою є: подвоєння частоти вихідної напруги, деяка складність у виготовленні магнітопроводів і обмоток, необхідність компенсації обмоток для вказівки необхідних характеристик несучої. Максимальна потужність визначається в основному енергією використовуваних постійних магнітів, від якої залежать всі інші параметри.

Для створення трифазного струму можна використовувати або 3 аналогічні перетворювачі (живлення керуючих обмоток синхронізовано), або аналогічну конструкцію, виконану в трифазному виконанні.

## 1.4 Матеріал, застосовуваний для експерименту

Першим штучним магнітним матеріалом була вуглецева сталь, що містила приблизно (1,2 - 1,5) % вуглецю.

Магнітні властивості сталі схильні до механічних і температурних впливів. У результаті використання постійних магнітів на основі вуглецевої сталі його магнітними властивостями, як повідомляється, є "старіння".

Доктор Хонд з Університету Тохока створив новий тип сталі - KS з високою намагнічуваністю і значною силою примусу, з хромом і вольфрамом, що легує до 3 %, і кобальтом з хромом до 6 %.

Високу залишкову індукцію в постійних магнітах з KS сталі було досягнуто за рахунок зменшення розмагнічувального чинника. Для цього було виготовлено постійні магніти в подовженій, підковоподібній формі.

У 1932 році доктор Т.Міскіма створив новий тип сталі МК шляхом легування сталі KS нікелю, міді та алюмінію. Це якісний стрибок у розвитку постійних магнітів, які пізніше стали відомі як Alnico (за українськими стандартами) [2].

Японські вчені Такесі Takeй і Йооро Като з Токійського технологічного інституту, які створили постійні феритові магніти, зробили значний крок у цій галузі за ці роки. Ферити, виготовлені за керамічною технологією, мають примусову силу (48 - 72) кА/м (600-900 Е).

У U.S. AirForceMaterialResearch було виявлено інтерметалеву сполуку самарію і кобальту ( $\text{SmCo}_5$ ). Це значний технологічний прорив у виробництві постійних магнітів.

Постійний магніт, виготовлений зі сплаву  $\text{SmCo}_5$ , досяг (НВ) тах, що дорівнював (16-24) MGcE, а при з'єднанні  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  - 32 MGcE, сила опору було збільшено до (560-1000) кА/м.

Постійні магніти зі сплаву Самарія-Кобальт виробляються промисловістю з 1980-х років. Приблизно в той самий час неодимові магніти були виявлені в США і Японії з матеріалів Neodymium-IronBor ( $\text{Nd-Fe-B}$ ).

В Японії неодимові магніти виробляли за аналогією з магнітами  $\text{SmCo}$ : виробництво порошкового литого сплаву, подальше стиснення магнітного поля і спікання.

У США неодимові магніти виробляють за такою технологією: спочатку створюється аморфний сплав, потім він подрібнюється і виготовляється композитний матеріал.

Магнітний порошок змішується з гумою, вінілом, нейлоном або іншими пластмасами в композитну масу, з якої після пресування виготовляються різні продукти.

Магніти з композитного матеріалу мають нижчі магнітні властивості, ніж спечені матеріали, легко обробляються і не потребують гальванічних покриттів.

Магніти  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  були представлені на ринку постійних магнітів у 1990-х роках, і дуже швидко досягли 400 кДж/м<sup>3</sup> енергії

на спечених зразках. Неодимові магніти мають широкий спектр застосування:

Магніт має дуже велику притискну (знімну) силу, NeodymeIronBor (NdFeB) широко використовується в промисловості, а також вирішує низку завдань у побутовій (домашній) сфері.

Неодимові магніти виявилися більш затребуваними на ринку порівняно з іншими видами постійних магнітів, особливо в мікроелектроніці.

### **1.5 Магніти, що застосовуються в магнітоелектричних машинах**

Найчастіше використовувані енергетичні матеріали ТЗР ТЧ являють собою інтерметалічні сполуки на основі рідкоземельних матеріалів. До них належать сполуки кобальту (Co) із самарієм (S), а також відносно недавно виявлений бор (B), неодим (Nd) і залізо (Fe).

Головною перевагою ТЧ є висока питома енергія магнітів. Також високим значенням сили опору, високим коефіцієнтом форми кривої розмагнічування є похила лінія, низькотемпературний коефіцієнт нестабільності характеристик. На додаток до названих властивостей, ці матеріали мають хороші технологічні характеристики, що зварюються в конструкціях машин, наприклад, вакуумна дифузія та склеювання [3].

### **1.5.1 Магнітотверді ферити стронцію, барію, кобальту**

Магнітотверді ферити (оксидні магніти) - це феримагнетики з великою кристалографічною анізотропією.

Ферити і феромагніти - це пресовані, керамічні, феритобарієві та феритостроніцеві магніти.

З точки зору електричних властивостей ферити є напівпровідниками, провідність яких зростає з температурою.

Мають дуже високий електричний опір (отже, ферит барію використовується в колах, що піддаються впливу високочастотних полів).

Переваги:

- можливість здійснювати багатополюсне намагнічування на цілісному компактному виробі;
- низька електропровідність;
- низька ціна;
- висока корозійна стійкість;
- можливість застосування за високих частот.

Недоліки:

- істотна залежність коерцитивної сили від температури, яка обмежує використання таких магнітів за негативних температур (нижче - 20 C°);
- низька механічна міцність, висока крихкість і твердість.



### 1.5.2 Магнітне поле досліджуваного магніту

Експеримент проводили із застосуванням як джерела магнітного поля постійного магніту з висококоерцитивного сплаву типу NeFeB. Вимірювання виконували в площині перпендикулярній до намагнічування з урахуванням сітки, представленій на рис. 1.3.

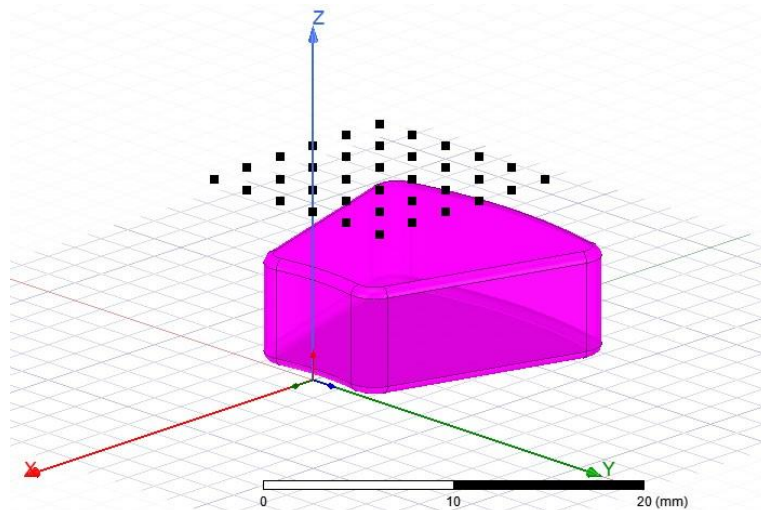


Рис. 1.3 - Сітка досліджуваного об'єкта

Розподіл магнітного поля імітаційної моделі з урахуванням геометричних параметрів представлено на рис. 1.4.

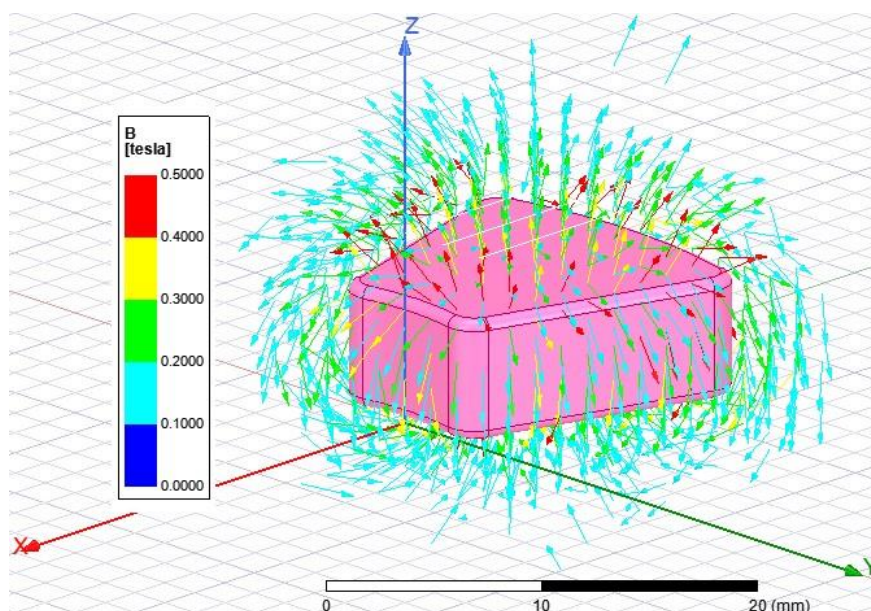


Рис. 1.4 - Розподіл магнітного поля досліджуваного магніту

### Висновок по розділу

У першому розділі мною було проведено повний аналіз феромагнітних матеріалів.

Постійні магніти створюють стабільне магнітне поле без необхідності зовнішнього живлення. Їх магнітні властивості зумовлені внутрішньою структурою матеріалів, які зберігають магнітну орієнтацію.

Розглянуто переваги та недоліки магнітів. Принцип дії та область застосування постійних магнітів. А також наведені матеріали для експериментів, які найчастіше використовуються для експериментів.

## **2. ВИВЧЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ І ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ**

### **2.1 Тесламетр-веберметр універсальний ТПУ-2В**

Відповідно до керівництва з експлуатації Тесламетр-веберметр універсальний ТПУ-2В (далі - ТВУ) застосовують для вимірювань магнітної індукції постійних магнітних полів, максимальних значень магнітної індукції змінних та імпульсних магнітних полів, потокозчеплення з під'єднаною до приладу вимірювальною котушкою.

ТВУ можна застосовувати під час точних досліджень магнітних полів, що створюються магнітними системами та електричними апаратами різного призначення, і під час вимірювань магнітних характеристик магнітних матеріалів у замкненому й розімкнутому ланцюзі.

ТВУ виготовляють відповідно до вимог ТУ 4222-00186487402-2014 [3], він містить у собі блок вимірювальний, блок підсилювача, вимірювальні зонди "М", "С", "И", а в комплекті з ТВУ постачають: кабель підсилювача; кабель зв'язку з ПЕОМ, інтерфейс USB; мережевий кабель електроживлення; компакт-диск із програмним забезпеченням "Флюкс-У".

Зовнішній вигляд ТВУ представлений на рис. 2.1.

ТВУ забезпечує вимірювання магнітної індукції постійних магнітних полів, максимальних значень магнітної індукції змінних та імпульсних магнітних полів.



Рис. 2.1 - Зовнішній вигляд ТВУ

Основні технічні характеристики ТВУ:

|                                                                       |                                |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Діапазон вимірювань:                                                  | від 0,01 до 2000 мТл;          |
| - на межах вимірювань                                                 | 1; 10; 100 мТл; 1; 10; 100 Тл; |
| Діапазон показань:                                                    | від 1 мкТл до 100 Тл;          |
| Нормальна область частот магнітної індукції змінного магнітного поля: | від 5 до 2000 Гц;              |
| Тривалість імпульсів                                                  |                                |

|                                          |                            |
|------------------------------------------|----------------------------|
| імпульсного магнітного поля              | від 100 мкс до 2           |
| с;                                       |                            |
| при цьому тривалість фронту імпульсів:   | від 10 мкс до 1с;          |
| Робоча область частот магнітної          |                            |
| індукції змінного магнітного поля:       | від 2 до 5                 |
| кГц;                                     |                            |
| Частотний діапазон показань магнітної    |                            |
| індукції змінного магнітного поля:       | від 5 до 35                |
| кГц;                                     |                            |
| Діапазон вимірювань максимальних значень |                            |
| магнітної індукції змінного магнітного   |                            |
| поля, приведений до частоти 50 Гц:       | від 10 мкТл до 1           |
| Тл;                                      |                            |
| -на межах вимірювань                     | 1; 10; 100 мТл; 1; 10; 100 |
| Тл;                                      |                            |
| -у діапазоні частот                      | від 10 до 10000            |
| Гц;                                      |                            |
| Діапазон вимірювань потокозчеплення:     | від 1 мкВ·с до 10 В·с;     |

Межі допустимої відносної похибки вимірювань  $\delta$ , %, не більше значень, розрахованих за формулою:

$$\delta = \pm [0,5 + 0,1 \cdot (B_{\text{п}} / B_{\text{и}} - 1)],$$

(2.1)

де  $B_{\text{п}}$  - виміряне значення магнітної індукції, мТл;

$B_H$  - встановлена межа вимірювань, мТл.

## **2.2 Котушки Гельмгольца КГ-ЗЕТ-1 і КГ-ЗЕТ-2**

Відповідно до паспорта Котушки Гельмгольца [4] КГ-ЗЕТ-1 і КГЗЕТ-2 (далі - КГ) призначені для вимірювань спільно з веберметром, наприклад, ТВП-2, магнітного моменту і намагніченості постійних магнітів і зразків феромагнітних матеріалів відповідно до рекомендацій стандарту ІЕС 60404-14 "Магнітні матеріали. Частина 14. Методи вимірювання магнітного дипольного моменту зразка феромагнітного матеріалу висмикуванням або поворотом" [5], а також МІ 2806-2003 "ГСИ. Потокозчеплення магнітного поля постійного магніту з котушкою Гельмгольца. Методика виконання вимірювань" [6], та для відтворення магнітної індукції.

Зовнішній вигляд КГ представлений на рис.2.2.

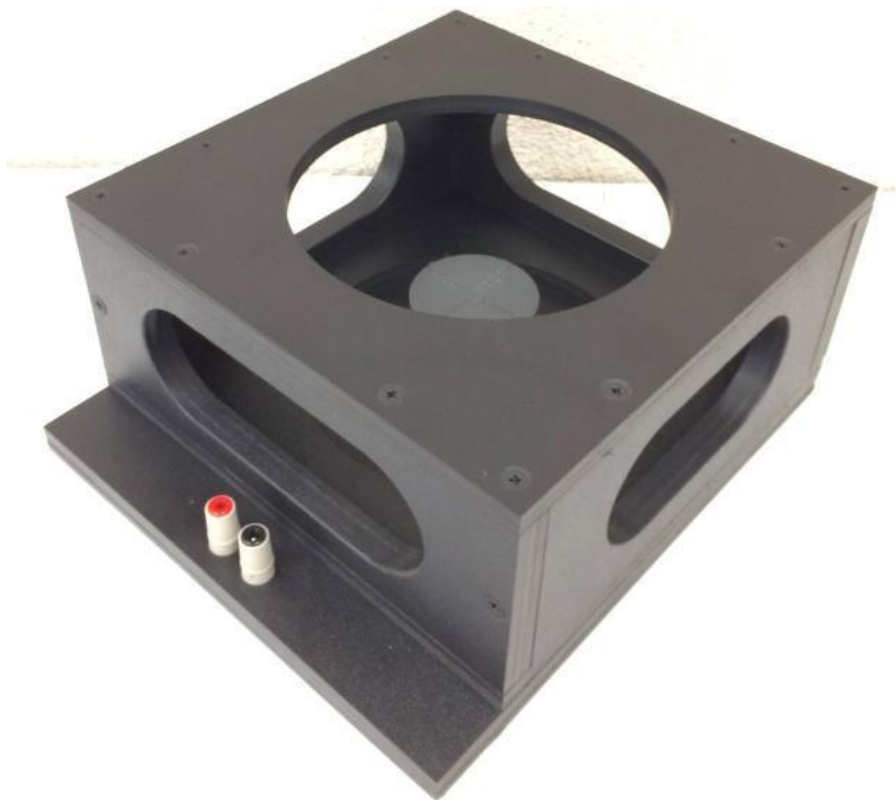


Рис. 2.2 - Зовнішній вигляд КГ

Постійні КГ за напруженістю магнітного і за магнітною індукцією пов'язані між собою співвідношенням  $K_v = 4\pi \cdot 10^{-4} \cdot K_H$  (тобто,  $K_H = 795,8 K_v$ ).

Фактичне значення постійної за магнітною індукцією  $K_v$  конкретного екземпляра котушки Гельмгольца вказується у свідоцтві про приймання котушки.

Відносна похибка визначення постійної: не більше  $\pm 3,0 \%$ .

Допустима сила струму при довготривалому ввімкненні в режимі відтворення магнітної індукції: 0,1 А.

Для розміщення випробовуваних зразків котушка комплектується знімним циліндричним столиком, на робочу поверхню якого нанесені дві взаємно перпендикулярні лінії з

поділками через 5 мм. Ця поверхня зміщена від центру котушки на 3 мм.

Можливе виготовлення котушок Гельмгольца з горизонтальною орієнтацією осі.

Технічні характеристики наведено в табл. 2.1

Табл. 2.1-Технічні характеристики

| Виконання | Габаритні розміри, мм | Маса кг | Опір лежать постійний ому струму, Ом | Постійна по магнітної індукції, Кв, мТл/А | Постійна за напруженістю магнітного поля, Кн, м-1 | Висота і діаметр обсягу, мм |
|-----------|-----------------------|---------|--------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|
| КГ-ЗЕТ-1  | 180X150X95            | 1,1     | ~30                                  | ~1,3                                      | 1000                                              | ~30                         |
| КГ-ЗЕТ-2  | 270X240X130           | 2,8     | ~60                                  | ~1,5                                      | 1200                                              | ~40                         |

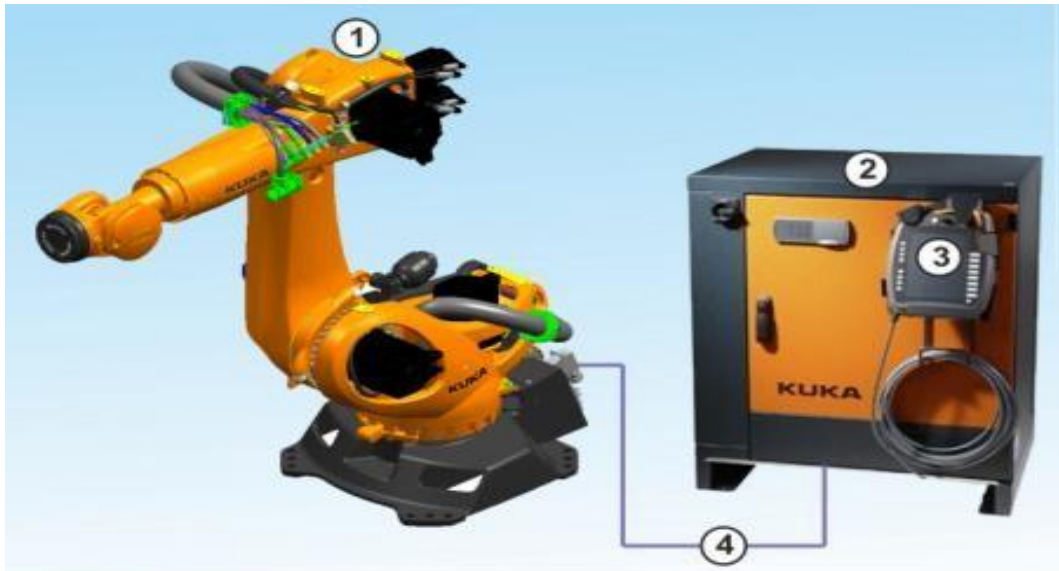
## 2.3 Промисловий робот

Відповідно до інструкції з експлуатації промисловий робот KUKA (KSS) (далі - робот) складається з таких компонентів:

- маніпулятор (1);
- система управління роботом (2);
- переносний програмувальний пристрій (3);
- з'єднувальні кабелі (4);
- програмне забезпечення (далі - ПЗ);
- додаткове обладнання, приладдя.

На рис. 2.3 представлено зовнішній вигляд робота.





1 - Маніпулятор; 2 - Система керування роботом; 3 - Переносний програмувальний пристрій; 4 - З'єднувальні кабелі

Рис. 2.3 - Зовнішній вигляд робота

Системне програмне забезпечення робота KUKA (KSS) виконує всі основні функції для експлуатації:

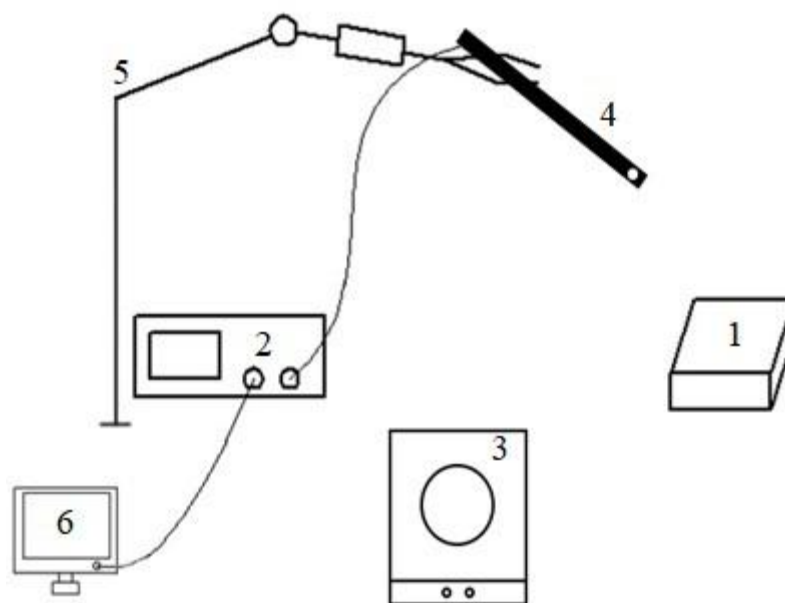
- проектування траєкторії;
- диспетчерські функції введення-виведення;
- управління даними та файлами.

Промисловий робот виготовлений відповідно до рівня розвитку обладнання та загальних правил безпеки. Однак у разі неправильного використання, яке не відповідає його меті, існує небезпека для життя і здоров'я, а також ризик пошкодження промислового робота та матеріальних збитків.

Експлуатація промислового робота допускається тільки в бездоганному технічному стані, а також відповідно до призначення і з урахуванням рекомендацій з техніки безпеки та наявних ризиків. Експлуатація здійснюється згідно з інструкцією з експлуатації [7] та декларацією виробника, що входить до комплексу постачання промислового робота. Будь-які дефекти, які можуть негативно вплинути на безпеку, необхідно усувати негайно.

## **2.4 Основа вимірювального комплексу**

Основу вимірювального комплексу, представленого на рисунку 8, становить робот-маніпулятор (1) із шістьма ступенями свободи. На фланці робота закріплюється щуп із чутливим елементом (2) для вимірювання напруженості магнітного поля або вектора магнітної індукції об'єкта, що випускає магнітне поле (4). Сигнали первинного перетворювача зчитуються і перетворюються цифровим пристроєм ТВУ (3). Запуск перетворення, конфігурація ТВУ і обробка результатів вимірювань здійснюється персональним комп'ютером (5), підключеного до вимірювача (6) за допомогою цифрового інтерфейсу. Для синхронізації процесу позиціонування і процесу вимірювання.



1 - Постійний магніт; 2 - Тесламетр-веберметр універсальний ТВУ-2В; 3 - Котушка Гельмгольца; 4 - Чутливий елемент; 5 - Робот-маніпулятор; 6 - Персональний комп'ютер. 5 - Персональний комп'ютер; 6 - Вимірювач цифрового інтерфейсу

Рис. 2.4 - Схематичне зображення вимірювального комплексу

Сенсорний елемент датчика ґрунтується на ефекті Холла і може вимірювати тільки поперечну частину магнітного поля. Як наслідок, для отримання об'ємного зображення необхідно провести три вимірювання в одній точці із взаємно ортогональною орієнтацією вимірювального зонда. Очевидно, що робот має прибути до цільової точки до початку процесу вимірювання і залишатися там доти, доки він не буде завершений. Для цього в системі має бути передбачений сигнал синхронізації. Сучасні промислові маніпулятори оснащені мережевими інтерфейсами Ethernet, за допомогою яких можна спілкуватися зі сторонніми пристроями через протокол TCP, який

відкриває можливість організації сигналу синхронізації на основі цього інтерфейсу.

Припустимо, що процес вимірювання роботом відбувається в статичному ізольованому середовищі, що зумовлює положення в робочому просторі об'єкта, магнітне поле якого має бути виміряно, і його геометричну форму. Також задано положення і форми всіх твердих об'єктів у робочій зоні робота, які так чи інакше впливають на роботу робота (наприклад, виступають як перешкоди). Тоді завдання розрахунку траєкторії робота може бути вирішене до його початку і не змінитися під час роботи.

### **Висновок по розділу**

У другому розділі проведено детальне дослідження вимірювального комплексу та експлуатаційної документації засобів вимірювання і допоміжного обладнання.

Розглянуто основні компоненти комплексу, зокрема:

- Тесламетр-веберметр універсальний ТПУ-2В, призначений для точного вимірювання магнітної індукції та магнітного потоку.
- Котушки Гельмгольца КГ-ЗЕТ-1 і КГ-ЗЕТ-2, які використовуються для створення однорідного магнітного поля.
- Промисловий робот, що забезпечує автоматизацію процесів позиціонування й переміщення зразків і приладів.

Також було детально розглянуто конструкцію основи вимірювального комплексу, проаналізовано експлуатаційну

документацію, а також визначено призначення й сфери застосування комплексу.

### **3. ВИВЧЕННЯ ТА АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МАГНІТНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

#### **3.1 Ефективність постійного магніту й асинхронного двигуна**

Існує сильний аргумент, що двигун із постійним магнітом перевершує асинхронний двигун. Невід'ємні переваги порошкової металургії - потенціал для підвищення продуктивності двигуна і зниження загальної вартості - можуть бути ефективним інструментом у виробництві цих приводних систем [8].

Постійні магніти використовуються в двигуні постійного магніту на роторі. Змінний струм, що подається на статор, обертає ротор. Оскільки магніти постійно намагнічені, ротор може синхронізуватися зі змінним струмом перемикавання. Було усунуто прослизання, необхідні для асинхронних двигунів, що призвело до підвищення теплової ефективності.

Характеристики двигуна з постійним магнітом вищі, ніж у асинхронного двигуна. Обидва двигуни мають трифазну конструкцію завдяки повністю оптимізованій продуктивності. Однак, асинхронні двигуни були розроблені для роботи в основному на 60 Гц. Зі збільшенням частоти у високочастотних асинхронних двигунах втрати на вихрових струмах будуть значно вищими, ніж у добре виготовлених двигунах постійного магніту.

Конструкція безщіткових двигунів постійного магніту забезпечує питому потужність (крутний момент) у 2-3 рази вищу,

ніж у асинхронних двигунів, з меншими втратами ядра приблизно на 50 %. Незалежно від того, як ви деформуєте або сформуєте асинхронний двигун, добре спроектований синхронний двигун із постійними магнітами забезпечить збільшений діапазон, кращу продуктивність тощо.

Нікола Тесла розробив асинхронний двигун 1883 року. По суті, це той самий базовий статор, що й постійний двигун, але без постійних магнітів.

Його основний принцип полягає в тому, що магнітне поле, створене в статорі, створює протилежний струм у стрижнях ротора. Потім індукований струм ротора генерує магнітне поле в пластинах ротора. Це поле протидії змушує ротор обертатися - при перемиканні струму статора, ротор завжди відстає і змушує ротор обертатися.

Переваги цього індукованого магнітного поля полягають у тому, що конструкція ротора асинхронного двигуна більше не вимагає щіток і обмоток ротора. Керування змінною швидкістю та асинхронним крутним моментом легше під час прискорення, оскільки напруга може бути зменшена на високій швидкості.

Незважаючи на те, що асинхронний двигун змінного струму був уперше розроблений понад 100 років тому, він, як і раніше, актуальний через підвищення ефективності та продуктивності в XX і XXI століттях. Двигун постійного магніту є відносно новим, але обіцяє більш високу продуктивність і, можливо, меншу вагу.

Основною проблемою при використанні двигунів з постійними магнітами є їхня потенційно висока вартість, зумовлена ціною магнітних матеріалів. Проте, з'являються перспективні розробки, які можуть значно зменшити цей недолік у майбутньому.

### **3.2 Діагностика електромеханічних перетворювачів за зовнішньому магнітному полю**

Електричні машини застосовуються в приводах у всіх галузях виробництва технологічного обладнання. Їх раптові зупинки або незаплановані відмови супроводжуються серйозними економічними втратами. Особливо високі втрати великих електростанцій і об'єктів, тому технічна діагностика і виявлення всіх невизначеностей у цій галузі розвинені та необхідні для запобігання аваріям і своєчасного ремонту. Для ретельного дослідження вимірювального комплексу та магнітного поля постійних магнітів був проведений експеримент, описаний у п.2.

Під час експерименту застосовано і запропоновано метод безконтактної діагностики, виходячи з вищевикладеного, метою вимірювального комплексу є можливість аналізу магнітних полів електромагнітних пристроїв, на основі даних про параметри магнітного поля, що отримані на основі прямих вимірів і математичного моделювання розподіленого магнітного поля.

Згідно з проектом статті пропонується метод полягає у вивченні магнітного поля електромагнітних пристроїв. Об'єктом дослідження можуть бути фізичні моделі пристроїв, що утворюють



магнітні поля, аналогічні полям окремих елементів або всього пристрою; прототипи, експериментальні або серійні копії електромагнітних пристроїв. Основою для розроблення дослідницької програми є проєктна документація для випробуваного електромагнітного пристрою, виконаного в одній із систем САПР автоматизованого проєктування. Дані САПР передаються в програмний модуль програмно-апаратного комплексу, який дає змогу користувачеві з автоматизованого робочого місця, застосовуючи вбудовані інструменти інтерфейсу програмного модуля, встановлювати поле дослідження магнітного поля. Для цього використовується об'ємна геометрична модель електромагнітного пристрою, реалізована в системі САПР. У цьому разі область дослідження може бути визначена як обмежена площа об'єму або окремі секції, що охоплюють як внутрішній простір випробуваного пристрою, так і простір у безпосередній близькості від нього. Вибір області дослідження здійснюється користувачем залежно від розв'язуваних завдань. Під час вибору області дослідження користувач враховує необхідність використання якомога більшої кількості прямих вимірювань параметрів магнітного поля в межах даного дослідницького району. При цьому доцільно передбачити прямі вимірювання параметрів поля в прикордонних точках досліджуваного району, поблизу поверхонь досліджуваного пристрою і в точках усередині досліджуваного району. Етап вимірювання визначається користувачем. Очевидно, що область дослідження буде також охоплювати внутрішній простір випробуваного пристрою, який не може використовуватися

для прямих вимірювань магнітного поля. Геометрична модель випробуваного пристрою і поле магнітних досліджень відображаються на моніторі автоматизованого робочого місця користувача.

### **Висновок по розділу**

У третьому розділі було проведено дослідження магнітного стану електромеханічних перетворювачів, що дозволяє глибше зрозуміти процеси, які впливають на їхню роботу, та визначити шляхи підвищення їх ефективності. Двигуни з постійними магнітами мають значний потенціал завдяки високій ефективності, однак їхнє використання обмежується високою вартістю магнітів.

Аналіз зовнішнього магнітного поля є перспективним методом діагностики, який дозволяє виявляти несправності на ранніх стадіях і, таким чином, покращувати експлуатаційні характеристики електромеханічних пристроїв.

## **4. ВИЯВЛЕННЯ ДЖЕРЕЛ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ**

### **4.1 Методична похибка**

Методична похибка визначається недосконалостями методу вимірювань або методикою вимірювання МВ ПМП чи спрощеннями, що допущені під час вимірювань. Таким чином, вона виникає у зв'язку з використанням наближених формул під час підрахунку результату. Похибка методу вимірювань притаманна всім методам, що ґрунтуються на даних експериментів або дослідів, які не мають суворого теоретичного обґрунтування.

Також причиною методичної похибки може бути взаємний вплив об'єкта вимірювань і СІ, що не враховується, або недостатня точність цього обліку.

### **4.2 Інструментальна похибка**

#### **4.2.1 Відносна похибка визначення постійної котушок Гельмгольца**

Котушки Гельмгольца КГ-ЗЕТ-1, КГ-ЗЕТ-2 призначені для вимірювань спільно з веберметром магнітного моменту і намагніченості постійних магнітів і зразків феромагнітних матеріалів висмикуванням або поворотом, а також для відтворення магнітної індукції. Саме під час проведення нашого досліді було використано постійний магніт, але в разі використання іншого

об'єкта, якому потрібно задати магнітну індукцію, можна використовувати Котушки Гельмгольца.

Відповідно до опису типу на котушки Гельмгольца відносна похибка визначення сталої дорівнює не більше  $\pm 3,0 \%$ ; допустима сила струму при довготривалому ввімкненні в режимі відтворення магнітної індукції дорівнює 0,1 А.

#### **4.2.2 Відносна похибка вимірювань магнітної індукції тесламетром-веберметром універсальним ТВУ-2В**

ТВУ забезпечує вимірювання максимальних значень магнітної індукції змінних та імпульсних магнітних полів.

Межі допустимої відносної похибки вимірювань обчислюються за формулою (1).

Робота ТВУ в режимі вимірювань МІ "Тесламетр" заснована на перетворенні складової вектора магнітної індукції, перпендикулярної до площини первинного вимірювального перетворювача Холла, в ЕРС Холла. Робота ТВУ в режимі вимірювань "Веберметр" з вимірювальними котушками ґрунтується на цифровому інтегруванні за заданий відрізок часу ЕРС самоіндукції, що наводиться у вимірювальній котушці під час зміни потоку магнітної індукції, перпендикулярного до площини котушки, за вказаний відрізок часу.

Зонд "М" з плоскою робочою частиною призначений для вимірювання складової вектора магнітної індукції, яка перпендикулярна площині робочої частини зонда. Пластина перетворювача Холла розташована в площині робочої частини

зонда, центр пластини розташований на відстані  $(4,0 \pm 0,5)$  мм від торця робочої частини і на відстані  $(3,0 \pm 0,5)$  мм від її бічної грані.

#### **4.3 Похибка калібрування робота промислового**

Виміряні значення магнітного поля в просторі мають бути представлені в координатах моделі об'єкта. Для цього необхідно знати положення локальної системи координат, пов'язаної з об'єктом вимірювання в робочому просторі робота. Знаючи положення локальної системи координат за допомогою однорідних матриць перетворення, слід виконати координатний перехід від системи координат робота до системи координат об'єкта.

Для калібрування системи координат пропонується скористатися електроконтактним способом. Суть способу полягає в такому:

- постамент, на якому розташовується вимірюваний об'єкт, забезпечується контактними провідними пластинами, на які подається напруга;
- до фланця робота маніпулятора кріпиться щуп зі струмопровідним стрижнем усередині. Стрижень забезпечується пружиною, для того щоб уникнути деформації під час контакту щупа з пластинами;
- струмопровідний стрижень під'єднується до модулів дискретного вводу/виводу контролера робота;

- здійснюється калібрування щупа з метою визначення його
- робочої точки;
- здійснюється вимірювання положення в просторі струмопровідних пластин за допомогою щупа;
- на підставі геометрії постаменту і пластин обчислюється положення локальної системи координат об'єкта, що вимірюється.

Постамент, на якому розміщено вимірюваний об'єкт (у цій роботі - постійний магніт), наведено на рис. 4.1. На поверхні постаменту розташовані мідні пластини, до яких підводиться напруга 24 вольти. Пластини на постаменті ортогонально орієнтовані і належать площинам  $OXY$ ,  $OYZ$ ,  $OXZ$  локальної системи координат постаменту.

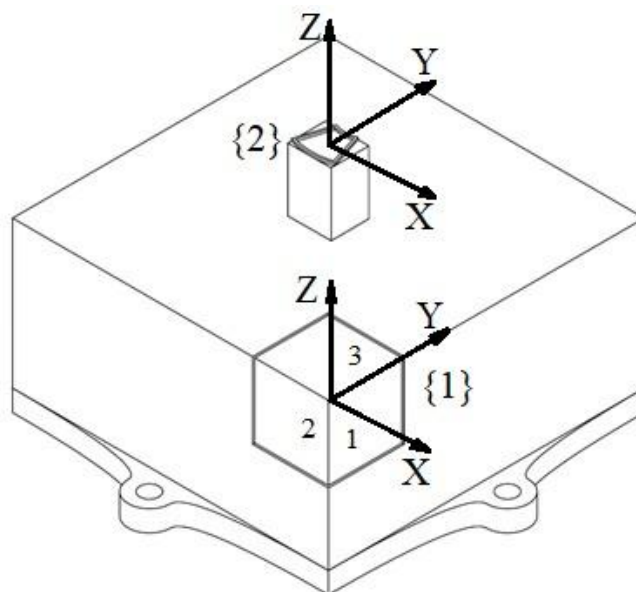


Рис. 4.1 - Постамент із контактними пластинами

Вимірювальний щуп зі струмоведучим стрижнем представлений на рис. 4.2.

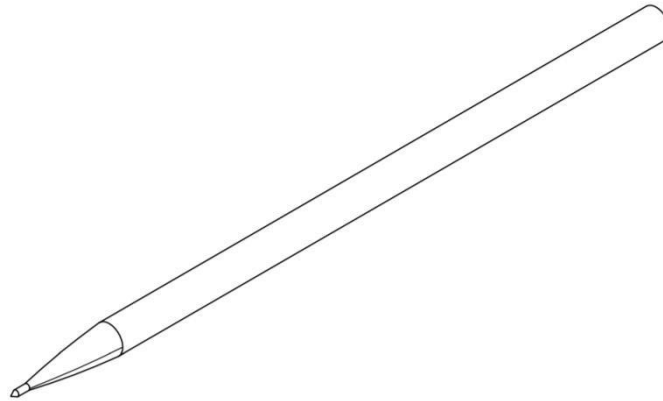


Рис. 4.2 - Щуп зі струмоведучим стрижнем

Під час калібрування зонда необхідно визначити координати його робочої точки - точки дотику зонда з пластинами. Процедура калібрування полягає в тому, що робочу точку зонда приводять у дію в тій самій точці в просторі з різними орієнтаціями, де вимірюють положення фланця робота. Оскільки зонд жорстко закріплений на фланці робота, і його робоча точка перебуває у всіх положеннях в одному місці, фланець робота завжди перебуває на поверхні сфери. Таким чином, знаючи координати фланця робота у всіх вимірах, можна визначити центр і радіус цієї сфери методом найменших квадратів.

Потім необхідно виміряти положення контактних плит у просторі за допомогою каліброваного зонда. Для кожної пластини послідовно проводиться серія вимірювань у різних точках. Для цього на мінімальній швидкості зонд заноситься на пластину доти,

доки не буде досягнуто контакту. Коли електричний ланцюг замкнутий на дискретному вході маніпулятора, подається сигнал логічного блоку. Після прибуття фронту сигналу запускається переривання, у процесорі якого на комп'ютер надсилається поточне положення робочої точки зонда (точки контакту з пластиною). Усі точки накопичуються в пам'яті комп'ютера і далі обробляються.

Таким чином для того, щоб здійснити калібрування початку координат, необхідно провести мінімум два вимірювання за допомогою сенсорів робота. І система рівнянь сумісна тільки тоді, коли вимірювання проводили з різною орієнтацією фланця робота. Для зменшення похибки вимірювання може бути доцільним збільшення кількості вимірювання та складання матриці  $A$  вигляду:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{bmatrix}, \quad \tilde{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

де матриці  $A_i$  і  $b_i$  отримані наведеним вище способом із кожної пари експериментів.

Розв'язок системи  $\tilde{A}x = \tilde{b}$  шукається методом найменших квадратів.

Наступним етапом є калібрування орієнтації системи координат. Виробником у технічній документації регламентується напрямок поперечної осі вимірювального щупа. При цьому сам



датчик монтується на довгій вузькій пластині (рис. 4.3). Приймемо орієнтацію прив'язаної системи координат таким чином, щоб вісь  $Z$  збігалася з поперечною віссю датчика, а вісь  $X$  проходила паралельно довгій грані кріпильної пластини (а).

Під час виготовлення щупа можливе викривлення кріпильної пластини, при цьому можливі два варіанти (рис. 4.4):

- пластина залишається прямою, проте зміщеною на деякий кут  $\varphi$ ;
- пластина згинається.

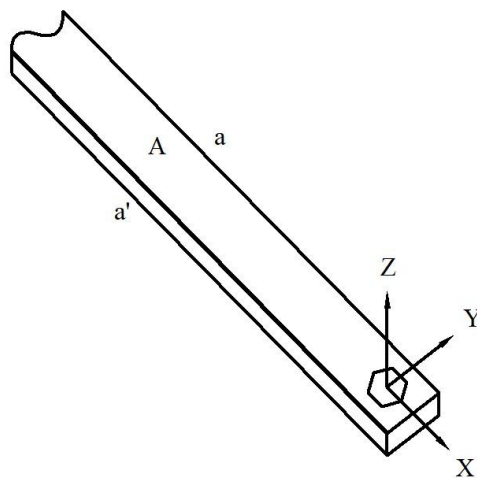


Рис. 4.3 - Зовнішній вигляд пластини з датчиком

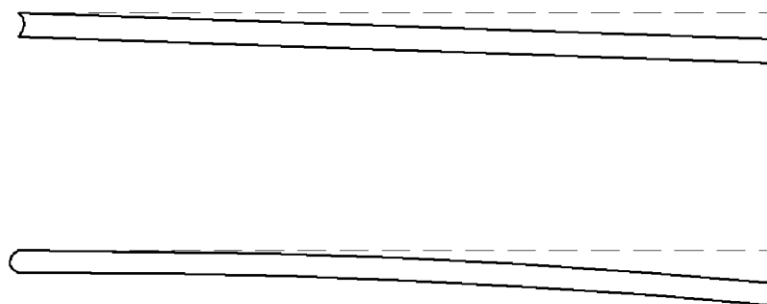


Рис. 4.4- Можливі варіанти викривлення кріпильної пластини

У першому випадку напрямок осі  $X$  пластини може бути розраховано, виходячи з вимірювання координат двох точок уздовж грані  $a$  пластини. Вісь  $Z$  має становити перпендикуляр до площини  $XOY$ . За площину  $XOY$  пропонується прийняти поверхню  $A$ , на якій встановлено датчик. Рівняння цієї площини може бути отримано розв'язанням задачі двовимірної лінійної регресії. Для цього необхідно доповнити вимірювання для точки, що лежить на протилежному ребрі  $a'$ . Після знаходження канонічного рівняння площини, напрямок вектора  $Z$  визначається з вектора нормалі. Вектор  $Y$  доповнює до правої трійки.

У другому випадку пропонується провести низку вимірювань точок, що лежать на грані  $a$ , водночас одна з точок має перебувати в точці початку системи координат. Отримані дані потім інтерполювати за допомогою сплайну, напрямок похідної сплайну в точці початку координат буде відповідати напрямку осі  $X$ . Через точки вимірювання також можна провести площину (оскільки вони не лежать на одній прямій). Перпендикуляр до осі  $X$ , що лежить у цій площині, визначатиме напрямок  $Z$ .

#### **4.4 Похибка прецизійності**

Терміни "правильність" і "прецизійність" у документах з метрології до теперішнього часу не використовувалися. При цьому "правильність" - це ступінь близькості вимірювання до істинного або умовно вірного (дійсного) виміряного значення або, за

відсутності відліку виміряного значення, ступінь близькості середнього значення, отриманого в результаті серії вимірів (або результатів випробувань), до прийнятого вихідного значення. Показником правильності зазвичай є значення систематичної похибки відповідно до ГОСТ Р ІСО 5726-1 [9].

Своєю чергою "прецизійність" - ступінь близькості один до одного незалежних результатів вимірювань, отриманих у конкретних встановлених умовах. Ця характеристика залежить тільки від випадкових факторів і не пов'язана з істинним або умовно істинним значенням вимірюваної величини. Міру прецизійності зазвичай обчислюють як стандартне (середньоквадратичне) відхилення результатів вимірювань, виконаних у певних умовах. Кількісні значення мір прецизійності істотно залежать від заданих умов.

#### **4.5 Похибка позиціонування постійного магніту**

Під похибкою позиціонування ПМ розуміється відхилення дійсного положення деталі від запрограмованого в системі положення. Положення магніту під час проведення експерименту представлено на рис. 4.5.



Рис. 4.5- Положення магніту

Під час проведення експерименту було виявлено, що середня точка відносно сітки на поверхні столу відхиляється залежно від намагнічування деталі або ПМ, встановлених для вимірювання магнітного поля.

Таким чином правильне положення можна визначити після вимірювання всієї поверхні деталі або ПМ, оскільки виявити центр намагніченості всієї поверхні візуально або за ЕД моделі неможливо.

Під час контролю точності позиціонування застосовується статистичний метод оцінки точності за результатами багаторазових

повторних випробувань. При цьому визначаються їхні статистичні характеристики.

#### **4.6 Похибка геометричних параметрів**

Точність геометричних параметрів визначається складною концепцією, яка включає:

- точність розмірів елементів;
- точність геометричних форм поверхонь елементів деталей;
- шорсткість поверхонь деталей;
- хвилястість поверхонь.

Похибки геометричних параметрів оброблюваних деталей, що виникають під дією зазначених чинників, поділяють за характером причинно-наслідкових зв'язків їхнього прояву на систематичні, випадкові та грубі.

Утворення похибок геометричних параметрів зумовлене дією безлічі конструктивно-технологічних чинників, що проявляються в процесі виготовлення виробів, наприклад:

- похибки виготовлення обладнання та технологічної
- оснащення та їхній знос у процесі експлуатації;
- похибки і знос робочих і вимірювальних інструментів;
- пружні деформації та вібрації;
- теплові деформації робочих інструментів і оброблюваних
- деталей;
- похибки базування та встановлення деталей на верстатах;

- похибки налаштування обладнання;
- нестабільність фізико-механічних характеристик матеріалу оброблюваних деталей;
- неоднаковість припусків на обробку;
- характер напруженого стану заготовок;
- форма, розміри та маса оброблюваних деталей;
- кваліфікація робітників-виконавців.

Похибки в геометрії деталей, викликані цими факторами, поділяються за характером їхніх причинно-наслідкових зв'язків на систематичні, випадкові та грубі прояви.

Випадкові помилки визначаються випадковими факторами; вони мають різні значення; кожна частина може змінюватися в межах обробленої поверхні, чисельне значення яких не може бути визначене наперед.

Називаються грубі помилки, які явно спотворюють результати спостережень.

### **Висновок по розділу**

У четвертому розділі було проведено виявлення джерел невизначеності вимірювання магнітного поля.

Було доведено, що у процесі вимірювання магнітного поля існує кілька основних джерел невизначеності, які можуть вплинути на точність результатів. Серед них можна виділити наступні:

1. Методична похибка.
2. Інструментальна похибка.
3. Похибка калібрування роботи промислового робота.
4. Похибка прецизійності.
5. Похибка позиціонування постійного магніту.
6. Похибка геометричних параметрів.

Визначення і контроль цих джерел невизначеності є важливим кроком для покращення точності вимірювань і мінімізації впливу зовнішніх факторів на результати досліджень.

## **5. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ ПОСТІЙНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ**

Інтенсивне впровадження інноваційних технологій в усі сфери діяльності людини зажадало розгляд ПЗ у світлі нових ресурсів, що постійно вдосконалюються, з огляду на збільшення інформаційних потоків в одержанні, передаванні та обробленні вимірювальних процесів.

Особливістю застосування ПЗ нині є зростання ресурсів комп'ютерної техніки та широке застосування мережових технологій.

Замість довгого часу, витраченого на налагодження коду або розробку користувацького інтерфейсу, можна скористатися графічним підходом LabVIEW до програмування і сконцентруватися на розробці, без додаткового тиску необхідності вивчити середовище розробки.

### **5.1 Автоматизація розрахунку відносної похибки вимірювання магнітної індукції на кожну точку**

Розрахунок допустимої відносної похибки тесламетравеберметра універсального ТПУ-2В у кожній точці проводиться за формулою (4.1).

У зв'язку з великою кількістю вимірювань, для наочності представлено максимальне і мінімальне значення, а також середнє арифметичне значення допустимої відносної похибки.



LabVIEW містить потужні багатфункціональні інструменти для проведення будь-яких типів вимірювань і розроблення будь-яких додатків.

Дані, отримані від фізичного об'єкта, можуть бути як дані режиму реального часу, так і дані у вигляді файлів. Будучи універсальною системою програмування, LabVIEW має великі бібліотеки для роботи із зовнішніми пристроями (портами), оброблення, аналізу та подання даних.

Реалізації програм LabVIEW називаються віртуальними приладами або віртуальними приладами, оскільки їхнє зовнішнє графічне представлення та режим роботи можуть імітувати роботу реальних фізичних пристроїв і результати вимірювань характеристик.

Програма LabVIEW буде автоматично обробляти результати вимірювання магнітного поля.

Після вибору створення нового приладу розкриваються два вікна: інтерфейсна панель (FrontPanel) і вікно редагування діаграм (BlockDiagram), яке за своєю суттю є програмою в графічному вигляді.

Інтерфейсна панель - це інтерфейс користувача. Ви встановлюєте на інтерфейсну панель графічні елементи керування і всілякі індикаторні прилади, які є відповідно елементами введення і виведення.

Встановлені на передню панель елементи керування та індикатори відображаються відповідними іконками (терміналами)

у другому вікні - вікні редагування діаграм. Тобто кожному встановленому елементу на інтерфейсній панелі відповідає іконка у вікні редагування.

Іконки або термінали показують тип даних елементів керування або індикаторів. Термінали здійснюють зв'язок між інтерфейсною панеллю та діаграмою.

Функції - це об'єкти вікна редагування діаграм, які можуть мати один та/або кілька входів та/або виходів. Функції LabVIEW аналогічні виразам, операторам, процедурам і функціям текстових мов програмування.

Зв'язки - це сполучні лінії між іконками (терміналами). Вони є аналогом змінних у звичайних мовах програмування. Причому дані можуть передаватися тільки в одному напрямку - від терміналу-джерела до одного або кількох терміналів-приймачів. Різний вигляд і колір з'єднань відповідає різним типам переданих даних.

Неправильний зв'язок терміналів або незакінчене з'єднання зображується штриховою лінією.

Структури - це графічне представлення циклів і операторів вибору в тексторієнтованих мовах програмування.

Термінали, функції, зв'язки та структури - це весь синтаксис мови програмування LabVIEW. Лінійка інструментів. Обидва вікна, як інтерфейсне, так і вікно редагування діаграм мають лінійки інструментів, що містять службові кнопки та індикатори стану, призначені для контролю Віртуальних Інструментів. Одна з

лінійок інструментів завжди доступна, і її вигляд залежить від того, в якому вікні Ви перебуваєте.

За основу виконання завдання було взято реальні значення магнітного поля постійного магніту.

TBY записує показання в таблицю на ПК, далі програма LabVIEW зчитує всі значення і проводить обробку вимірювань.

Основні елементи програми для обчислення допустимої відносної похибки TBY:

- ReadFromSpreadsheetFile (елемент, що зчитує значення з файлу Excel або ін.);
- IndexArrayFunction (елемент, що перетворює дані в масив);
- Fract/ExpStringToNumberFunction (елемент, що перетворює строкове значення в числове);
- ForLoop (елемент, що створює цикл, у якому буде проводитися обробка вимірювань за формулою);
- CaseStructure (елемент, що створює умови для виконання вимірювань);
- ArrayMax&MinFunction (елемент, що витягує мінімальне і максимальне значення з масиву);

Також використовувалися стандартні елементи для розрахунків: мінус, плюс, ділення, множення тощо.

На рис. 5.1 показано обробку результатів вимірювань, представлену на лицьовій панелі.

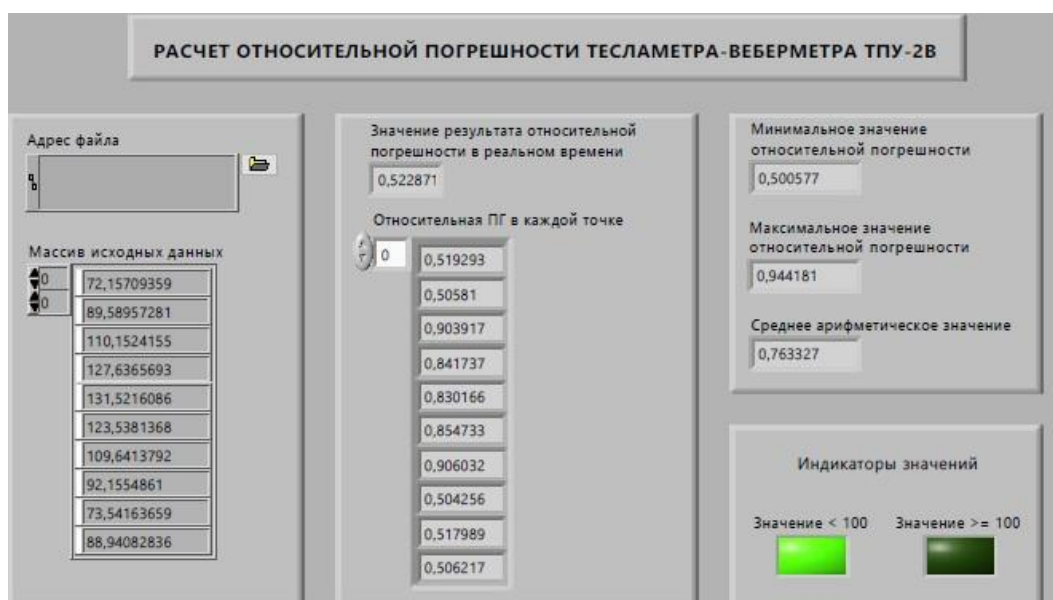


Рис. 5.1- Розрахунок відносної похибки тесламетра-веберметра ТПУ-2В

У результаті виконаної роботи вдалося за допомогою програми LabVIEW обробити вимірювання магнітної індукції постійного магніту і вивести масив похибок.

### Висновок по розділу

У п'ятому розділі представлено обробку результатів вимірювань магнітної індукції постійного магнітного поля. Основною метою було автоматизувати процес розрахунку відносної похибки вимірювання магнітної індукції для кожної точки.

Завдяки використанню програми LabVIEW вдалося успішно обробити вимірювання магнітної індукції постійного магніту. Програма дозволила зібрати дані, провести розрахунки відносних

похибок та вивести масив похибок, що дозволяє чітко оцінити точність вимірювань та виявити можливі джерела невизначеності.

Цей підхід до обробки даних дозволяє значно покращити точність досліджень, автоматизувати обчислювальні процеси та мінімізувати людський фактор, що є важливим кроком у розвитку сучасних методів вимірювань магнітних полів.

## ВИСНОВОК

У рамках роботи над магістерською кваліфікаційною роботою було проведено дослідження супермагнітів або неомагнітів системи Nd-Fe-B з високим значенням запасеної енергії. Також вивчено експлуатаційну документацію засобів вимірювань і допоміжного обладнання, що входять до складу вимірювального комплексу. Виявлено джерела невизначеності вимірювання магнітної індукції постійного магніту.

На основі проведених досліджень було розроблено проєкт інструкції для вимірювання магнітного поля за допомогою конкретного вимірювального комплексу. Проведення експерименту за спеціалізованою інструкцією, з урахуванням усіх джерел невизначеності під час експерименту та оброблення результатів вимірювань, дозволить значно підвищити надійність та економічну ефективність використання електромеханічних перетворювачів енергії на етапі розробки імітаційної моделі деталі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електрика та магнетизм : підручник / Л. Д. Дідух. – Тернопіль : Підручники і посібники, 2020. – 464 с. – Режим доступу : <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31412>.
2. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Г. Г. Власюк, В. М. Співак, К. О. Трапезон, В. Б. Швайченко. – Київ : Освіта України, 2010. – 159 с. – Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19129>.
3. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник / Ю. П. Колонтаєвський. – Київ : Каравела, 2006. – 384 с.
4. Макаренко В. В. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналіз : навч. посіб. для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Акустотехніка» [Електронний ресурс] / В. В. Макаренко, В. М. Співак ; НТУУ «КПІ». – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 314 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19099>.
5. Панчевний Б. І. Загальна електротехніка: теорія і практика / Б. І. Панчевний, Ю. Ф. Свергун. – 2-ге вид. – Київ : Каравела, 2004. – 440 с.
6. <https://www.kmu.gov.ua/news/stratehiia-maibutnoho-ukraina-tse-enerhetychnyi-khab-iakyi-dopomozhe-ievropi-pozbutysia-zalezhnosti-vid-rosii>
7. Поведа Р. А. Моделювання радіоелектронних пристроїв за допомогою комп'ютера / Р. А. Поведа, А. А. Криськов, Ц. А. Криськов // Збірник наукових праць КПДПУ. – 1999. – Вип. 5. – С. 58–61. 12. Фірма National Instruments Electronics Workbench Group розробник програми Electronics WorkBench [Електронний ресурс] // Офіц. сайт фірми. – Режим доступу: [www.interactiv.com](http://www.interactiv.com).
8. Грабко В.В., Розводюк М.П., Грабенко І.В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини

- постійного струму. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 86 с.
9. Півняк Г.Г., Волков О.В. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно-імпульсною модуляцією. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. – 470 с.
10. <https://ips.ligazakon.net/document/DH1A200A>