МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА
ФІЗИКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій і екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

«Уніполярна індукція М.Фарадея»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-61
Паскевич М.В. _____
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Прикладна фізика
енергетичних систем
Керівник: доцент, к. ф-м.н.
Кудрявцев І.М. _____

Рецензент: _____

Харків - 2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Факультет _____фізико-енергетичний_____
Кафедра __ фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології ____
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) _магістр_
Напрям підготовки _____6.040204 прикладна фізика _____
Спеціальність _____105. Прикладна фізика та наноматеріали__ _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ __Ткаченко В.І.___
підпис ініціали, прізвище

“____”_____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

_____Паскевича Максима Володимировича_____
(прізвище, ім’я, по батькові студента)

1. Тема роботи «Уніполярна індукція М.Фарадея»,

керівник роботи ___Кудрявцев Ігор Миколайович,доцент, к. ф.-м.н. _,
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “___”_____20__року №___

2. Строк подання студентом роботи_____

3. Перелік питань, які потрібно розробити
- Літературний огляд досліджень М. Фарадея з уніполярної індукції та їх аналіз на основі теоретичної моделі Максвела.
- Розробка експериментального стенду для комплексного дослідження явища електромагнітної індукції.
- Експериментальні дослідження явища уніполярної індукції та теоретична обробка отриманних результатів.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вивчення науково-технічної літератури
2	Розробка та збір експериментальної установки.
3	Експериментальне дослідження явища уніполярної індукції Фарадея.
4	Теоретична обробка отриманих експериментальних результатів.
5	Аналіз результатів та складання висновків.

5. Дата видачі завдання_____

Студент _____ **Паскевич М. В.**
підпис ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ **Кудрявцев І.М.**
підпис ініціали, прізвище

Реферат

«Уніполярна індукція Фарадея». Виконав студент фізико-енергетичного факультету, другого курсу магістратури, групи НФ-61, Паскевич Максим Володимирович, Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, 2018 р

Метою даної дипломної роботи було вивчення явища уніполярної індукції М. Фарадея.

З метою проведення експерименту, був розроблений і сконструйований експериментальний стенд. Була побудована комп'ютерна модель стенду. Для цього використовувалася система комп'ютерного моделювання, дизайну і розробки – SolidWorks 2016. Були виміряні індуковані ЕРС при різних режимах роботи установки.

Дипломна робота виконана на п'ятдесяти восьми сторінках. Складається зі вступу, чотирьох розділів і висновку; містить тридцять шість рисунків, нуль таблиць, нуль додатків, список використаних джерел з двадцяти п'яти найменувань.

Перший розділ роботи присвячений розгляду теоретичних основ магнітної і електромагнітної індукції.

У другому розділі виконаний аналіз науково-технічної літератури з явищу уніполярної індукції.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень.

Четвертий розділ присвячений теоретичної обробці експериментальних даних.

Ключові поняття: електромагнітна індукція; уніполярна індукція; електрорушійна сила

Реферат

«Униполярная индукция Фарадея». Выполнил студент физико-энергетического факультета, второго курса магистратуры, группы НФ-61, Паскевич Максим Владимирович, Харьковского Национального Университета имени В.Н. Каразина, 2018 г.

Целью данной дипломной работы было изучение явления униполярной индукции М.Фарадея.

С целью проведения эксперимента, был разработан и сконструирован экспериментальный стенд. Была построена компьютерная модель стенда. Для этого использовалась система компьютерного моделирования, дизайна и разработки - SolidWorks 2016. Были измерены индуцированные ЭДС при различных режимах работы установки.

Дипломная работа выполнена на пятидесяти восьми страницах. Состоит из введения, четырех глав и вывода; содержит тридцать шесть рисунков, ноль таблиц, ноль приложений, список использованных источников из двадцати пяти наименований.

Первый раздел работы посвящен рассмотрению теоретических основ магнитной и электромагнитной индукции.

Во втором разделе выполнен анализ научно-технической литературы по явлению униполярной индукции.

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований.

Четвертый раздел посвящен теоретической обработке экспериментальных данных.

Ключевые понятия: электромагнитная индукция; униполярная индукция; электро-движущая сила

Abstract

"Faraday unipolar induction". Completed by a student of Physics and Energy Department, the second year of the master's program, the NF-61 group, Maxim Paskevich, V.N. Karazin Kharkiv National University, 2018.

The purpose of this graduate work was to study the phenomenon of unipolar induction M. Faraday.

In order to conduct the experiment, an experimental stand was designed and constructed, a computer model of the stand was built. We used computer simulation system design and development - SolidWorks 2016. We measured the induced emf in different modes of the unit.

The graduate work has been completed on fifty eight pages. Consists of introduction, four chapters and conclusion; contains thirty-six figures, zero tables, zero appendices, a list of references from twenty-five names.

The first section of the work is devoted to the consideration of the theoretical foundations of magnetic and electromagnetic induction.

In the second section, the analysis of scientific and technical literature on the phenomenon of unipolar induction is performed.

The third section presents the results of experimental studies.

The fourth section is devoted to theoretical processing of experimental data.

Key concepts: electromagnetic induction; unipolar induction; electromotive force

Зміст

Вступ 8

1. Розділ 1.Аналітичний огляд магнітної та електромагнітної індукції 9
   1.1. Магнітна індукція 9
   1.2.Електромагнітна індукція 15
2. Розділ 2. Уніполярна індукція 22
   2.1. Уніполярна індукція Фарадея 24
   2.2. Нікола Тесла про уніполярну індукцію 26
   2.3. Уніполярні генератори 35
3. Розділ 3.Постановка и проведение эксперимента 39
   3.1. Розробка експериментального стенду 39
   3.2. Виконання експериментальних 45
4. Розділ 4.Теоретична обробка отриманих результатів 53

Висновки 56

Список використаних джерел 57

Вступ

Явище електромагнітної індукції при відносному русі магнітного поля і провідника добре відомо в сучасній фізиці і описується законом електромагнітної індукції М. Фарадея.

На основі цього закону було сконструйовано велику кількість різних генераторів постійного і змінного струму, розроблені індукційні нагрівачі і індукційні печі.

Однак, явище уніполярної індукції, відкрите експериментально також М.Фарадеем, до сих пір залишається недостатньо вивченим в науковій літературі і є актуальним напрямком досліджень, як в області традиційної, так і альтернативної енергетики.

Метою цієї дипломної роботи є розробка лабораторного стенду та експериментальне дослідження даного явища з використанням магнітів різної конструкції і провідників різного типу.

1. Аналітичний огляд магнітної та електромагнітної індукції

1.1. Магнітна індукція

Магнітна індукція B, є силовою характеристикою магнітного поля в обраній точці простору. Дана векторна величина визначає силу, з якою магнітне поле діє на рухому в ньому заряджену частинку [1]. Якщо заряд частинки дорівнює q, її швидкість дорівнює v, а індукція магнітного поля в даній точці простору дорівнює B, то на частку в даній точці з боку магнітного поля діє сила, яка дорівнює:

$$\vec{F} = q\left[\vec{v} \times \vec{B}\right] \tag{1.1}$$

Отже, B – це вектор, його напрямок і величина є такими, що сила Лоренца, що діє на рухомий заряд з боку магнітного поля, дорівнює [1]:

$$F = qvB\sin(\alpha) \tag{1.2}$$

α – це кут між вектором швидкості і вектором магнітної індукції. Вектор сили Лоренца F перпендикулярний вектору швидкості і вектору магнітної індукції. Напрям сили Лоренца F у випадку руху позитивно зарядженої частинки в однорідному магнітному полі визначається правилом лівої руки [1]:

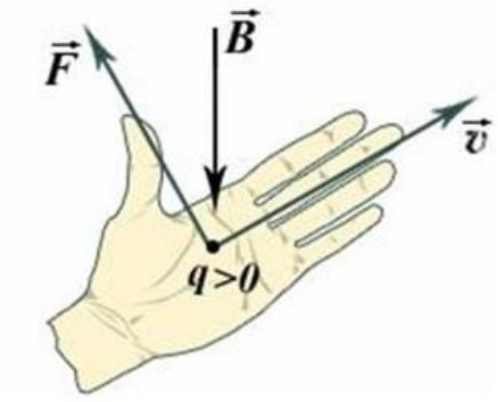


Рис. 1.1.1.Правило лівої руки

«Якщо ліву руку розташувати так, щоб вектор магнітної індукції входив в долоню, а чотири витягнутих пальці були спрямовані у напрямку руху позитивно зарядженої частинки, то відігнутий на 90 градусів великий палець покаже напрям сили Лоренца» [2].

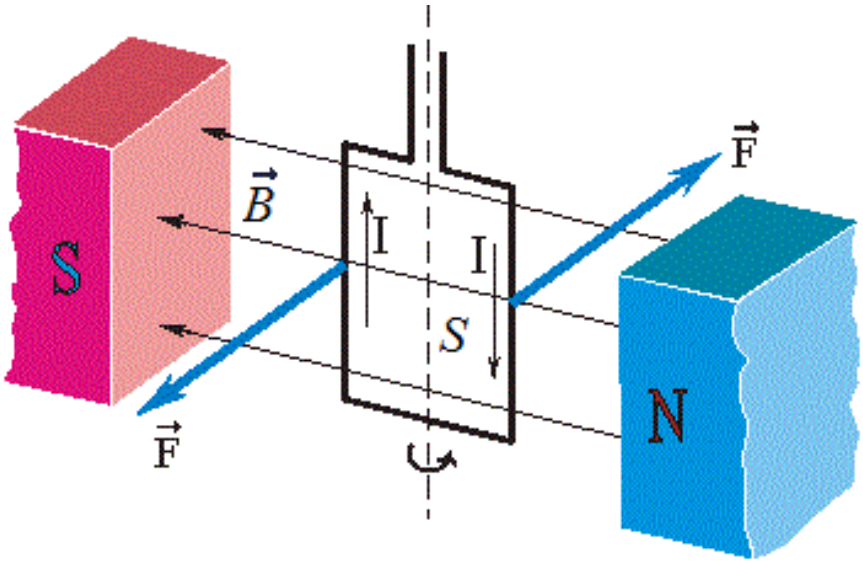


Рис. 1.1.2 Вектор магнітної індукції

Магнітну індукцію можна визначити як відношення максимального механічного моменту, що діє з боку однорідного магнітного поля на рамку із струмом (рис. 1.1.2), до добутку сили струму в рамці на площу рамки, бо струм в провіднику є рухом заряджених частинок [1].

$$B = \frac{M}{IS} \tag{1.3}$$

Магнітна індукція – є фундаментальною характеристикою магнітного поля**.** Магнітна індукція вимірюється в системі СГС - в гаусах (Гс), а системі СІ вимірюється в тесла (Тл), 1 тесла = 10000 гаус. 1 Тл - це індукція такого однорідного магнітного поля, в якому на рамку площею 1 м^2, по якій тече струм

в 1 А, діє максимальний крутний механічний момент сил, що дорівнює 1 Н•м [1].

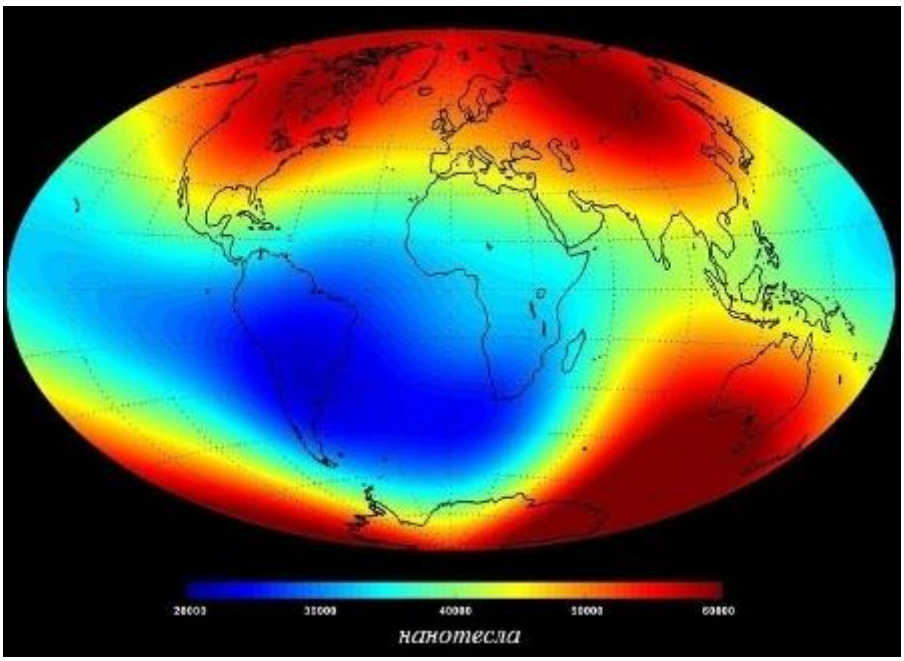


Рис. 1.1.3. «Знімок» головного магнітного поля на поверхні Землі в червні 2014 на основі даних із супутників Swarm. Червоним кольором позначено області сильного магнітного поля, а синім – ослабленого [3]

На широті 50° індукція магнітного поля Землі становить близько 0,00005 Тл, а на екваторі приблизно 0,000031 Тл. Вектор магнітної індукції завжди спрямований по дотичній до магнітної силової лінії [1].

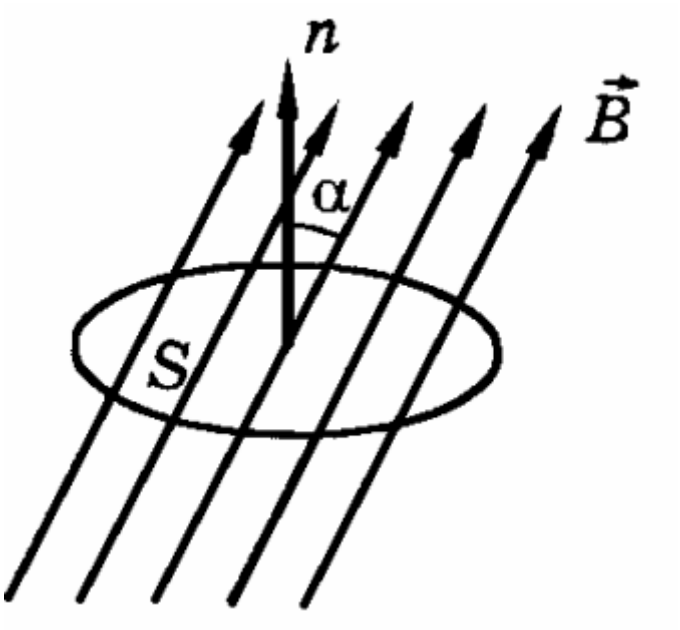


Рис. 1.1.4. Однорідне магнітне поле

$$\Phi = BS\cos\alpha \tag{1.4}$$

Контур, поміщений в однорідне магнітне поле (Рис. 1.1.4), пронизує магнітний поток Ф, - поток вектора магнітної індукції. Від напрямку вектора магнітної індукції відносно контуру, від його площі, і від велечени контуру, пронизуємого лініями магнітної індукції, залежить величіна магнітного потоку Ф. Магнітний потік Ф, що пронизує контур, буде максимальним, якщо вектор В буде перпендикулярний площі контуру [1].

Термін індукція походить від латинського «індукціо», що означає «наведення». Синоніми: наведення, виникнення, утворення.

Провідник із струмом має навколо себе магнітне поле (рис.1.1.5). Магнітне поле електричного струму було відкрито датським фізиком Хасом Крістіаном Ерстед в 1820 році. Правилом гвинта або правилом правої руки користуються, щоб визначити напрямок силових ліній індукції магнітного поля В електричного струму I, поточного по прямолінійним провіднику:

«Напрямок обертання рукоятки гвинта показує напрямок ліній магнітної індукції B, а поступальний рух гвинта тоді відповідає напрямку струму в провіднику» [4].

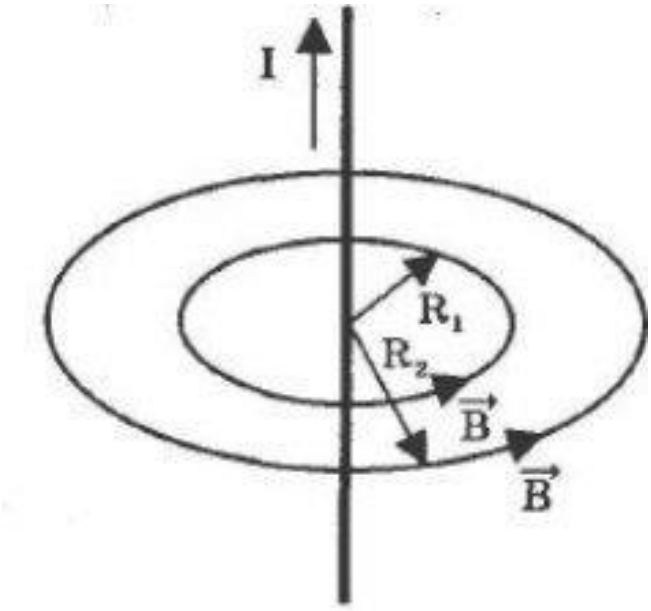


Рис. 1.1.5. Провідник із струмом

Величина магнітної індукції B на відстані R від провідника зі струмом I може бути знайдена за формулою[1]:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \tag{1.5}$$

де магнітна постійна:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{B \cdot c}{A \cdot м} \tag{1.6}$$

Лінії магнітної індукції B замкнуті в тому випадку, коли лінії напруженості електростатичного поля E починаючись на позитивних зарядах, закінчуються на негативних. Магнітні заряди, які б створювали полюса подібно

електричним зарядам, в природі не виявлено, це одна з особливостей електричних зарядів [1].



Рис.1.1.6. Дискові магніти

Андре-Марі Ампер, французький дослідник і фізик-натураліст, висунув гіпотезу про молекулярні токи, на початку 19 століття. Відповідно до Ампера, рух електронів навколо атомних ядер породжують елементарні струми, які в свою чергу створюють навколо себе елементарні магнітні поля. І якщо шматок феромагнетику помістити в зовнішнє магнітне поле, то ці мікроскопічні магніти визначаться в зовнішньому полі, і шматок феромагнетику стане магнітом[1].

Для отримання потужних постійних магнітів використовують речовини з великим значенням залишкової намагніченості, такі як сплав неодим-залізо-бор. За 10 років неодимові магніти втрачають не більше 1-2% своєї намагніченості, проте їх можна легко розмагнітити, нагрів до температури + 70° С та більше [1].

1.2. Електромагнітна індукція

Один з найважливіших фактів, який вдалося виявити – це найтісніший взаємозв'язок між магнітним і електричним полями. Як з'ясувалося, магнітне поле, яке змінюється в часі, породжує електричне поле, а електричне поле, що змінюється – магнітне. Виключивши даний зв'язок між полями, різноманітність проявів електромагнітних сил не було б настільки велике, яким воно спостерігається насправді. Не існувало б ні радіохвиль, ні світла.

1.2.1. Відкриття електромагнітної індукції

Майкл Фарадей був першим, хто зробив крок у відкритті нових властивостей електромагнітних взаємодій. Він основоположник уявлень про електромагнітне поле, який був упевнений в єдиній природі електричних і магнітних явищ. Внаслідок цього М.Фарадей і зробив відкриття, яке увійшло в основу пристрою генераторів всіх електростанції світу, що перетворюють механічну енергію в енергію електричного струму (джерела, які працюють на інших принципах: гальванічні елементи, акумулятори та інші, дають мізерну частку виробленої електричної енергії.) [5]

М. Фарадей міркував так: електричний струм здатний намагнітити шматок заліза, у свою чергу, можливо, щоб магніт, викликав появу електричного струму [5] ?

Тривалий час цей зв'язок виявити не вдавалося. Важко було зрозуміти, що рухомий магніт, або мінливе у часі магнітне поле, може порушити електричний струм в котушці [5].

Майже в один час з Фарадеєм отримати електричний струм в котушці за допомогою магніту намагався інший учений – швейцарський фізик Колладон. Він використовував гальванометр, легка магнітна стрілка якого містилася всередині котушки приладу. Кінці котушки, куди Колладон вводив магніт,

сподіваючись отримати в ній струм, були виведені в сусідню кімнату, щоб магніт не чинив безпосереднього впливу на стрілку, і там приєднані до гальванометра. Колладон йшов в сусідню кімнату, вставивши магніт в котушку, і з прикрістю переконувався, що гальванометр не вказує струму. Якби він попросив кого-небудь зайнятися магнітом, а сам весь час спостерігав за гальванометром, то відкриття було б зроблено. Але цього не сталося. Магніт, що спочиває відносно котушки, не викликає в ній струму [5].

Явище електромагнітної індукції було відкрито 29 серпня 1831 року. Воно полягає у виникненні електричного струму в провідному контурі, який або покоїться в змінному в часі магнітному полі, або рухається в постійному магнітному полі таким чином, що число ліній магнітної індукції, що пронизують контур, змінюється [5].

На початку М. Фарадей відкрив електромагнітну індукцію в нерухомих відносно один одного провідниках при замиканні і розмиканні ланцюга. Після цього,ясно розуміючи, що зближення або видалення провідників зі струмом повинно приводити до того ж результату, що і замикання і розмикання ланцюга, Фарадей за допомогою дослідів довів: струм виникає при переміщенні котушок відносно один одного. Так як М. Фарадей був знайомий з працями Ампера, він розумів, що магніт - це сукупність маленьких струмів, що циркулюють в молекулах. Як зареєстровано в його лабораторному журналі, 17 жовтня було виявлено індукційний струм в котушці під час введення (або видалення) магніту [5].

По закінчені одного місяця Фарадей експериментальним шляхом встановив всі основні особливості явища електромагнітної індукції. В даний час немає проблем, що б повторити досліди Фарадея. Дві котушки, магніт, батарея елементів і високо чутливий гальванометр, це все, що вам знадобиться для експериментів [5].

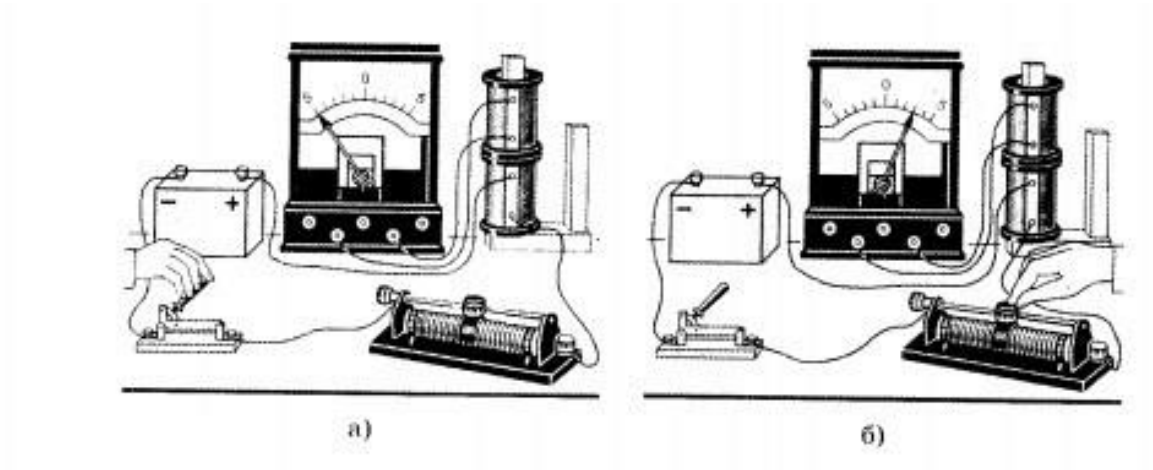


Рис. 1.2.1. Індукційний струм виникає: а – в момент замикання, або розмикання електричного кола, б – при зміни сили струму за допомогою реостата

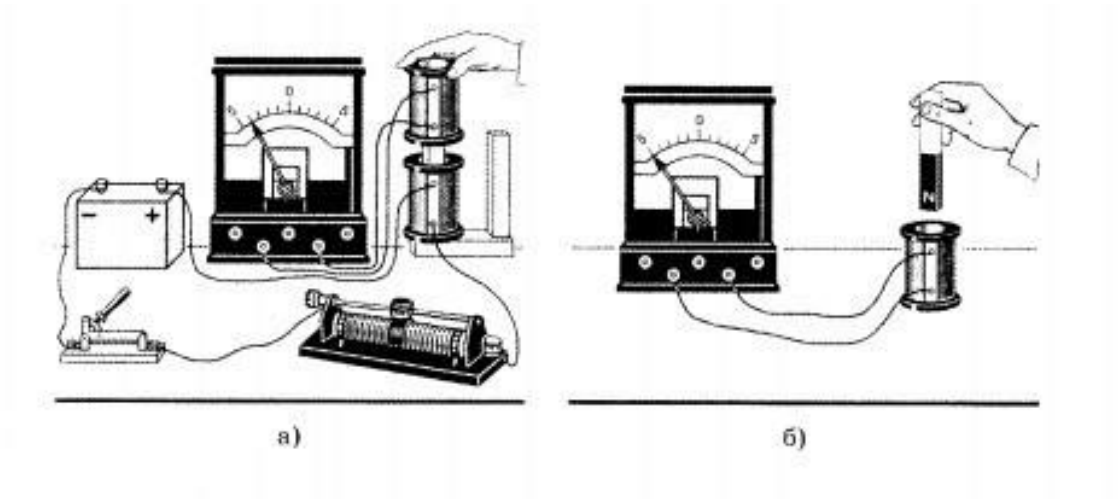


Рис. 1.2.2. Індукцій струм виникає: а – при русі котушок, б – при русі постійного магніту

В установці, зображеній на рисунку 1.2.1, а, індукційний струм виникає в одній з котушок в момент замикання або розмикання електричного кола іншої котушки, нерухомої щодо першої. В інших дослідах індукційний струм виникає при зміні сили струму в одній з котушок за допомогою реостата (рис. 1. 2.1, б),

при русі котушок відносно один одного (рис. 1.2.2, а), при русі постійного магніту щодо котушки (рис.1.2.2, б) [5].

М. Фарадей помітив, від чого залежить поява індукційного струму в дослідах, які поставлені по-різному.

У замкнутому провідному контурі виникає струм при зміні числа ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню, обмежену цим контуром. І чим швидше змінюється число ліній магнітної індукції, тим більше виникає індукційний струм . При цьому причина зміни числа ліній магнітної індукції не суттєва. Це може бути і зміна числа ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню, обмежену нерухомим провідним контуром, внаслідок зміни сили струму в сусідній котушці (див. рис.1.2.1, б), і зміна числа ліній індукції внаслідок руху контуру в неоднорідному магнітному полі, густота ліній якого змінюється в просторі (рис.1.2.3) [7].

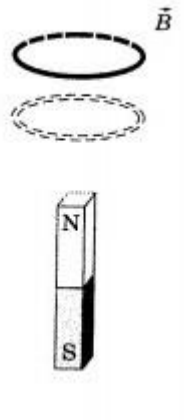


Рис. 1.2.3. Зміна густоти ліній індукції

У провідному контурі виникає електричний струм, якщо контур знаходиться в змінному магнітному полі або рухається в постійному в часі

магнітному полі так, що число ліній магнітної індукції, що пронизують контур, змінюється [7].

1.2.2. Закон Фарадея

Фарадей встановив, що величина індукційного струму отже і ЕРС індукції однозначно визначаються швидкістю зміни магнітного потоку. Дана залежність показана в законі електромагнітної індукції Фарадея, виведеному Максвеллом: ЕРС електромагнітної індукції чисельно дорівнює взятій з протилежним знаком швидкості зміни магнітного потоку, зчепленого з даним контуром [7],

$$\varepsilon_i = \frac{-d\Phi}{dt} \tag{1.7}$$

У формулі (1.7) знак «-» є математичним виразом правила Ленца: індукційний струм в контурі завжди має такий напрямок, при якому створюється їм магнітне поле перешкоджає зміні магнітного потоку, що викликає цей індукційний струм [7].

Закон Фарадея можна отримати із закону збереження енергії. Розглянемо провідник зі струмом I, який поміщений в однорідне магнітне поле, перпендикулярне провіднику, і може вільно переміщатися [7]. Робота по переміщенню провідника $-dA = Id\Phi$,де $d\Phi$ – пересічений провідником магнітний потік. Якщо повний опір контуру R, то відповідно до закону збереження енергії робота джерела струму за час $dt - (\mathcal{E}Idt)$ буде складатися з роботи, яку витратили на джоулеву теплоту (I^2Rdt), та роботи по переміщенню провідника в магнітному полі $(Id\Phi)$, тобто:

$$\mathcal{E}Idt = I^2Rdt + Id\Phi, \tag{1.8}$$

звідти:

$$I = (\mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt})\frac{1}{R} \quad (1.9)$$

Де $-\frac{d\Phi}{dt} = \mathcal{E}_i$ і є ЕРС електромагнітної індукції згідно закону Фарадея [7].

ЕРС електромагнітної індукції (як і будь-яка ЕРС) повинна мати розмірність |В|.

Це легко перевірити. Згідно рівнянню (1.7):

$$\mathcal{E}_i = \frac{|d\Phi|}{|dt|} = \frac{\text{Вб}}{\text{с}} = \frac{\text{Тл·м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Н·м}^2}{\text{А·м·с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{А·с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В} \quad (1.10)$$

Як приклад, найбільш широкого практичного застосування явища електромагнітної індукції, розглянемо пристрій для перетворення механічної енергії в електричну – принцип дії генератора змінного струму на прикладі плоскої рамки, рівномірно обертовою в однорідному магнітному полі B = Const с кутовий швидкістю ω = const [7].

Магнітний потік, зчеплений з рамкою площею S в будь-який момент часу t, дорівнює $\Phi = BS\cos\alpha = BS\cos\omega t$, де $\alpha = \omega t$ – кут повороту рамки в момент часу t(начало відліку вибрано так, що при t = 0, α = 0). При обертанні в рамці буде виникати відповідно до закону Фарадея змінна ЕРС індукції $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega\sin\omega t$, що змінюється з часом за гармонічним законом. При sinωt= 1, $\mathcal{E}_i$ – максимальна, тобто $(\mathcal{E}_i)_{max} = BS\omega$. Таким чином, якщо в однорідному магнітному полі рівномірно обертається рамка, то в ній виникає змінна ЕРС, що змінюється за гармонійним законом $\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{max} sin\omega t$. $(\mathcal{E}_i)_{max}$, а значить, і $\mathcal{E}_i$ прямо залежать від величин B,S, ω. Використовується стандартна промислова частота змінного струму ω.

Для збільшення магнітної індукції *B* застосовують потужні постійні магніти або в електромагнітах пропускають значний струм, а також всередину електромагніту поміщають сердечник з матеріалів з великою магнітною проникністю μ. *S* збільшується в тому випадку, якщо обертати не один, а кілька витків, з'єднаних послідовно [7].

Процес перетворення механічної енергії в електричну зворотній. Якщо через рамку, вміщену в магнітне поле, пропустити електричний струм, то на неї буде діяти обертовий момент і рамка почне обертатися. На цьому принципі заснована робота електродвигуна, призначеного для перетворення електричної енергії в механічну[7].

2. Уніполярна індукція

Уніполярна індукція – окремий випадок електромагнітної індукції; виникає при обертанні провідних тіл, які мають власну намагніченість або поміщених в зовнішнє магнітне поле. Традиційна схема досвіду, що ілюструє уніполярну індукцію,наведена на рис. 2.1 [9]. До обертового з постійною кутовою швидкістю W однорідно намагніченому провідному циліндру за допомогою двох ковзних контактів *(O* – на осі і *C* – на утворюючій циліндра) і нерухомих проводів приєднаний вольтметр *(V),* який вимірює наводимо в замкнутому ланцюзі ЕРС. Якщо вольтметр ідеальний, тобто має нескінченний внутрішній опір, струм в ланцюзі відсутній і Лоренца сила, діюча на рухливі носії заряду в циліндрі, дорівнює нулю [8, 10]:

$$eE(r) + \frac{e}{c}[v(r)B] = 0 \qquad (2.1)$$

Де r – відстань від осі обертання до точки спостереження (вектор r направлений від осі); $v(r) = [\Omega r]$ – швидкість точки спостереження; *B*-вектор магнітної індукції, який в нерелятивіському наближенні ($v \ll c$) для постійної намагніченості *M* можна вважати постійним *(B= 4πM* при *r<R, R* – радіус циліндра); E – напруженість електричного поля, індукованого в обертовому магнетику. З (2.1) випливає, що $E = -(1/c)\Omega Br$. Вольтметр реєструє різницю потенціалів між поверхнею і віссю циліндра Df= (1/2*c)***WBR**^{2,}, що збігається в такому без струмовому режимі з ЕРС уніполярній індукції. При підключенні кінцевого опору (навантаження) під дією цієї ЕРС з'являється струм індукції, величина якого залежить від розподілу його об'ємної щільності по тілу циліндра і від якості ковзких контактів [11].

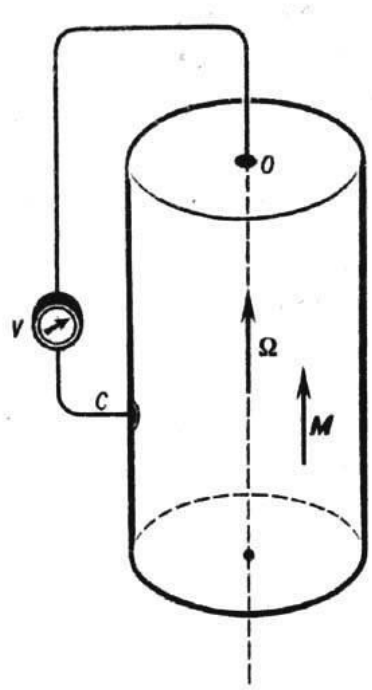


Рис. 2.1. Схема експерименту уніполярної індукції

До ефектів уніполярної індукції відносять виникнення радіальної електричної поляризації P^e всередині обертового магнетика, характеризується аксіальною намагніченістю ***M.*** При цьому сумарний електричний заряд залишається рівним нулю, але його щільність перерозподіляється: всередині циліндра індукується заряд з об'ємною щільністю, а на бічній поверхні з'являється індукований поверхневий заряд с щільністю $r^e{}_{\text{п}} = -(1/2)r^e R$. Поділ зарядів в рухомому магнетику можна трактувати як релятивістське перетворення електричного і магнітного дипольних моментів [10].

$$\rho^e = -\text{div}\left\{\frac{[vM]}{c}\right\} = -(2/c)\Omega M, \qquad (2.2)$$

Вперше явища, пов'язані з уніполярної індукцією, спостерігав в 1824 Д. Араго (D. Arago) – обертання мідної пластини під картушкою компаса приводило в рух його стрілку [9]. Ефект Араго застосовується, наприклад, для гальмування диска в побутових лічильниках електроенергії. Першу уніполярну машину (тобто електричну машину, засновану на явищі уніполярної індукції) виготовив в 1832 М.Фарадей (M. Faraday); вона відрізнялася від наведеної на

рис. 2.1 тим, що якорем служив диск, що обертається у зовнішньому магнітному полі підковоподібного магніту [8]. Машина Фарадея стала першим генератором, що перетворює механічну енергію в електричну. Уніполярні машини застосовуються для отримання великих постійних струмів при низькій напрузі. Типові параметри уніполярних машин, використовуваних для харчування електролізерів сила струму 125 кА, напруга 12 В. Найпотужніша уніполярна машина (1989, Австралія) працює в короткочасному режимі і дає струм 1500 кА при напрузі 800 В [8].

2.1 Уніполярна індукція Фарадея

Відкривши закон електромагнітної індукції в 1831 році Майкл Фарадей (рис. 2.2), крім інших експериментів, побудував наочний пристрій перетворення механічної енергії в електричну - диск Фарадея (рис. 2.3). Даний генератор містить провідний диск, постійне магнітне поле, паралельне осі обертання диска, 1 токос'емник на осі диска і 2-й токос'емник на краю диска. Дана уніполярна машина була надзвичайно неефективним пристроєм, однак вона мала значну цінність для подальшого розвитку науки.

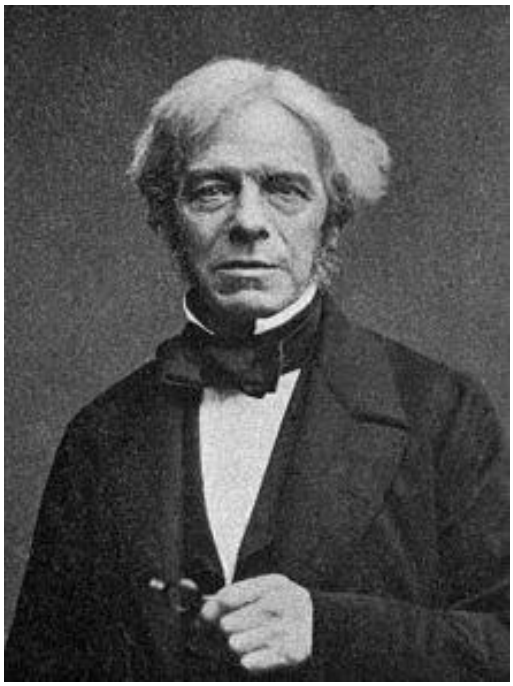


Рис.2.2. Майкл Фарадей

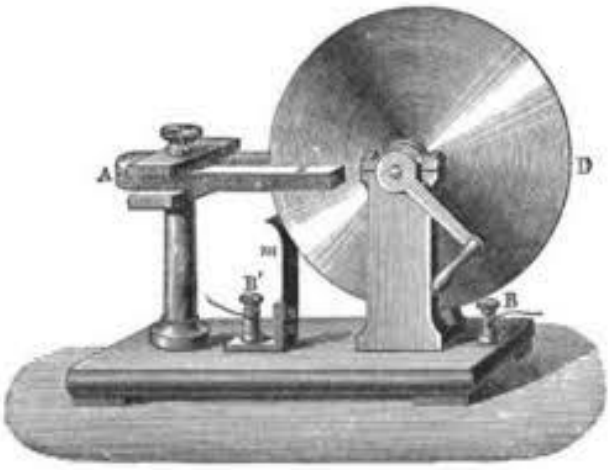


Рис. 2.3. Уніполярний генератор Фарадея

Сформульований Фарадеєм закон електромагнітної індукції, розглядав провідний контур, який перетинає лінії магнітного поля. У разі диска Фарадея магнітне поле було направлено вздовж осі обертання, контур щодо поля не переміщує. Найбільше здивування викликав той факт, що обертання магніту разом з диском також призводило до появи ЕРС в нерухомому зовнішньому ланцюзі. Так з'явився парадокс Фарадея, вирішений тільки через кілька років після його смерті з відкриттям електрона – носія електричного заряду, рух якого обумовлює електричний струм в металах [12].

На електрони, що знаходяться в диску, діє Сила Лоренца, що є векторним добутком напруженості магнітного поля і швидкості переміщення електрона разом з провідником в результаті обертання диска. Сила ця спрямована уздовж радіуса диска. В результаті при обертанні диска виникає ЕРС між його центром і краєм [12].

На відміну від інших електричних машин, такий генератор має:

- При низькому внутрішньому опорі і великому струмі надзвичайно низьку ЕРС (від часткою до одиниць вольт);
- рівномірність одержуваного струму, відсутність необхідності комутувати його колектором ротора, або випрямляти отриманий іншими машинами змінний струм зовнішніми коммутирующими або електронним приладами [12];

- великі власні втрати енергії через протікаючи по диску зворотні струми, які його марно нагрівають (вищезазначена проблема частково вирішується в конструкції двигунів і генераторів з рідким провідним токос'емником по всьому периметру диска) [12];

Поєднання цих якостей зумовило дуже вузькі сфери застосування цього типу генераторів.

У наш час розроблено безліч промислових моделей уніполярних машин, ефективно використовуються в різних областях людської діяльності [12].

2.2 Нікола Тесла про уніполярну індукцію

Для фундаментальних відкриттів, для великих досягнень інтелекту, характерно те, що вони зберігають велику владу над уявою мислителя. Я маю на увазі незабутній експеримент Фарадея з обертанням диска між двома полюсами магніту. Даний експеримент дав такий чудовий результат, який довго перевірявся в щоденних дослідах; все ж є деякі топологічні елементи в цьому зародку існуючих динамо і двигунів, які навіть сьогодні звертають на себе увагу, і гідні обережного вивчення [13-15].



Рис. 2.4. Нікола Тесла 1896 рік

Розглянемо, наприклад, випадок диска з заліза або іншого металу, що обертається між двома протилежними полюсами магніту, і полярними поверхнями, які повністю покривають обидві сторони диска, і приймемо, що електричний струм знімається і передається контактами рівномірно від усіх точок краю диска. Візьміть спочатку випадок двигуна. У всіх звичайних двигунах обертання ротора залежить від деякого зміщення або зміни загального магнітного тяжіння, що діє на ротор, це досягається технологічно або деяким механічним пристосуванням на двигуні або впливом електричних струмів належної полярності. Ми можемо пояснити обертання такого двигуна так же, як ми можемо це зробити для водяного зубчастого колеса. Але в вищезгаданому прикладі диска, оточеного повністю полярними поверхнями, немає ніякого зміщення магнітної дії, ніякої зміни взагалі, наскільки ми знаємо, все ж обертання відбувається. Тут не працюють звичайні доводи;ми не можемо дати навіть поверхове пояснення, як в звичайних двигунах, і принцип дії буде ясний нам тільки тоді, коли ми зрозуміємо саму природу задіяних сил, і осягнемо таємницю невидимої взаємодії [13-15].

Розглянутий як динамо машина, диск – досить цікавий об'єкт вивчення. На додаток до його особливості породження електричних струмів одного напрямку без використання комутуючих приладів, така машина відрізняється від звичайних динамо, в яких немає ніякої взаємодії між ротором і полем статора. Струм ротора викликає намагнічування перпендикулярне напрямку електричного струму, але так як електричний струм закінчується рівномірно з усіх точок краю, а так само якщо бути точним, зовнішня схема може також розміститися абсолютно симетрично до постійного магніту, ніяка взаємодія просто не може відбутися. Це, однак, істинно тільки для слабких магнітів, оскільки, коли магніти більш потужні, обидва намагнічування під прямим кутом, мабуть, взаємодіють один з одним [13-15].

За вищезгаданої причини, логічним є висновок, що для такої машини, тієї ж самої ваги, віддача повинна бути набагато більше, ніж для будь-якої іншої машини, в якій висока напруга, яка в роторі має тенденцію розмагнічувати поле, створюване статором. Екстраординарний висновок Форбеса про уніполярному динамо і досвід з пристроєм підтверджують це уявлення [13-15].

Отже, головний принцип, виходячи з якого, така машина може бути зроблена саме збудливою – разючий, але це може бути природним – оскільки в наявності відсутності взаємодії ротора, і відповідно вільний від збурень протягом електричного струму і відсутність самоіндукції. Якщо полюса не закривають (не охоплюють) диск повністю з обох сторін, то, звичайно, якщо диск належним чином не поділений, механізм буде дуже неефективний. Знову ж таки, в цьому випадку є моменти, цікаві. Якщо диск обертається і польовий потік перерваний (розірвана ланцюг, яка живить електромагніт), потік через диск ротора продовжить текти і поле магнітів втратить силу порівняно повільно. Причина для цього відразу знайдеться, коли ми розглянемо напрямок струмів в диску [13-15].

Погляньте на рис.2.5, d являє диск зі легкими контактами B і B' на осі і периферії. N і S являють два полюси магніту. Якщо полюс N вище, як позначено на малюнку, диск, припускаємо знаходиться в площині паперу, і обертається в напрямку стрілки D. Струм, що встановився в диску, буде текти від центру до периферії, як позначено стрілкою A. Так як магнітна дія більш-менш обмежена зазором між полюсами N і S, інші частини диска можна вважати бездіяльними. Сталий струм не буде повністю проходити через зовнішній контур I', але замкнеться через диск безпосередньо, і взагалі, якщо розташування подібно показаному, безумовно, велика частина виробленого потоку не буде проявлятися зовні, оскільки контур F фактично коротко замкнутий бездіяльними частинами диска [13-15].

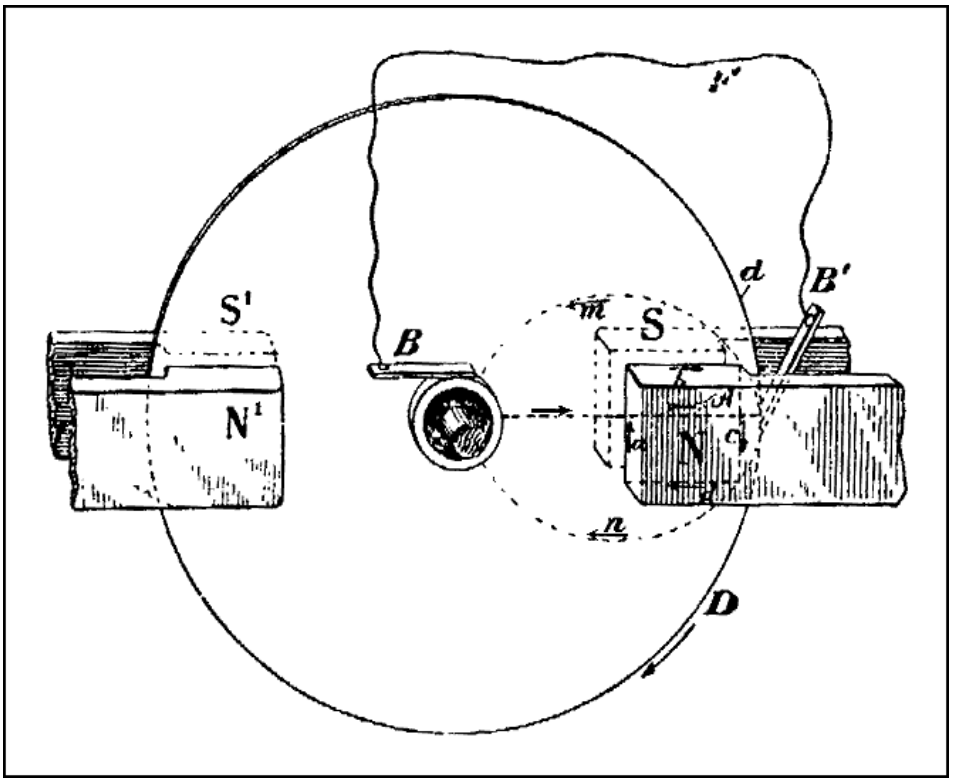


Рис. 2.5. Уніполярний генератор Фарадея

Напрямок результуючих струмів в диску може бути прийнято таким, щоб бути, як позначено пунктиром і стрілками m і n; і напрямок потоку поля

збудження, що позначається стрілками a, b, c, d, аналіз фігури показує, що одне з цих двох відгалужень вихрового струму, тобто A-B'-mR, матиме тенденцію розмагнічувати поле, в той час як інше відгалуження , тобто A-B'-nB, буде виробляти протилежний ефект. Тому, відгалуження A-B'-mB, тобто те, яке наближається до поля, відштовхне лінії, в той час як відгалуження A-B'-nB, тобто залишає поле, збере силові лінії на себе. Через це є постійна тенденція зменшення течії струму в доріжці B'-mB, в той час як з іншого боку така опозиція не буде існувати в доріжці, B'-nB, і ефект відгалуження або доріжки буде більш-менш переважний над першим. Об'єднаний ефект обох відгалужень потоків міг би бути представлений одним єдиним потоком того ж самого напрямку як збудження поля. Іншими словами, вихрові струми, що циркулюють в диску, будуть додатково посилювати магніт. Цей результат вельми суперечить тому, що можна було б припустити спочатку, оскільки ми природно очікували, що результуючі роторні струми будуть протидіяти току навіяного магнітами, оскільки так зазвичай відбувається, коли первинний і вторинний провідник мають індуктивну взаємодію. Але слід пам'ятати, що це наслідок специфічного взаємного розташування, а саме, наявності двох шляхів, що надаються навіяного і протидії току, кожен з них вибирає той шлях, який пропонує найменшу кількість протидії. Від цього ми бачимо, що вихровий струм, впадає в диск, частково збуджує поле магніту, і з цієї причини, коли наведений струм перериваючи струми в диску, продовжить текти, і польовий магніт буде втрачати свою силу порівняно повільно і може навіть зберегти деяку силу, поки обертання диска триває [13-15].

Результат буде, звичайно, в значній мірі залежати від опору і геометричних вимірів шляху вихрового струму і від швидкості обертання;- і саме ці елементи визначають уповільнення цього струму і його позицію по відношенню до поля. Для певної швидкості існує максимум, збудливої дії; тоді як при більш високих швидкостях, воно поступово зменшилася б, прагнучи до

нуля і нарешті повністю змінило напрямок, тобто, ефект вихрового струму повинен буде послабити поле [13-15].

Реакцію можна краще продемонструвати експериментально, маючи в своєму розпорядженні полюси N і S, а також N 'і S', на вільно рухомій осі, концентричною з віссю диска. Якби останній обертався як раніше в напрямку стрілки D, поле діяло б в тому ж самому напрямку з моментом, який, до деякого значення, буде рости зі швидкістю обертання, потім зменшуватися, і, проходячи через нуль, нарешті стає негативним; тобто магніт почав би обертатися в протилежному напрямку до диска [13-15].

В експериментах з альтернативними електродвигунами, в яких поле змінюється струмами різних фаз, спостерігався цікавий результат. Для дуже низьких швидкостей обертання поля двигун показав момент 900 фунтів, або більше, заміряний на шківі 12 дюймів в діаметрі. Коли швидкість обертання полюсів була збільшена, момент зменшувався і, нарешті, убував до нуля, і ставав негативним, а потім якір починав обертатися в протилежному керівництві напрямку до поля [13-15].

Повертаючись до основної ідеї, прийміть, що умови такі, що вихрові струми, вироблені обертанням диска підсилюють поле, і припускають що останнє, поступово збільшується, в той час як диск залишається, що обертається по наростаючій. Струм колись почався, і може бути достатній, щоб підтримати себе і навіть збільшитися в силі, і потім ми маємо випадок "акумулятора струму сера Вільяма Томсона". Але з вищезазначених міркувань, здавалося б, випливає, що для успіху експерименту опір суцільного диска буде істотно, оскільки, якби було радіальне розбиття, вихрові струми не могли б формуватися, і їх шкідливий вплив припинилося б. Якби використовувався, такий зіркоподібний радіально складовою диск було б необхідно з'єднати спиці по краю провідником або будь-яким іншим чином, щоб формувати симетричну систему замкнутих ланцюгів [13-15].

Дія вихрових струмів може використовуватися, щоб порушити машину будь-якої конструкції. Наприклад, на рис. 2.6 , показані пристрої, в яких машина з ротором-диском могла б бути порушена вихровими струмами [13-15].

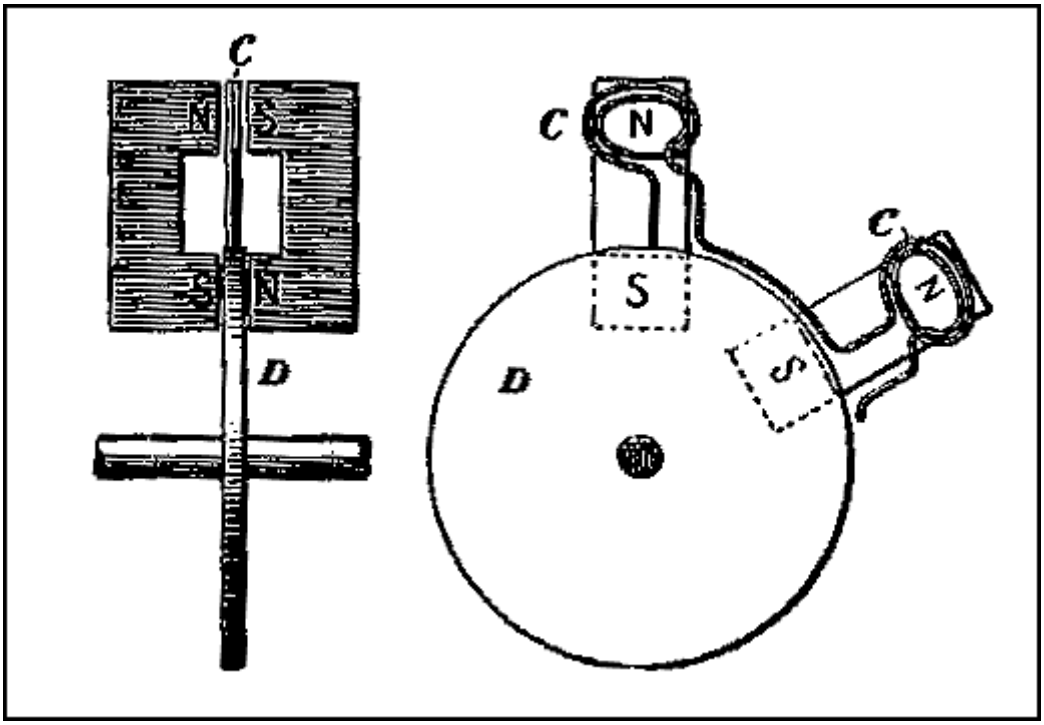


Рис. 2.6. Пристрої, в яких машина з ротором-диском могла б бути порушена вихровими струмами

Тут безліч магнітів, NS, NS, вміщено зірковоподібно радіально на кожній стороні металевого диска D і в продовження його периферії набір ізольованих котушок, CC. Магніти формують дві окремі області, внутрішню і зовнішню. Є твердий диск, що обертається на осі, і котушки в області віддаленої від неї. Приймемо що магніти, трохи порушені при запуску; вони могли б підсилити дію вихрових струмів в твердому диску, щоб надати більш сильну область для периферійних котушок. Хоча немає сумніву, що при таких умовах машина могла б бути порушена цим або подібним чином, досить експериментальних свідчень, щоб гарантовано стверджувати, що такий режим збудження буде марнотратний. Але уніполярний генератор з самозбудженням або двигун

конструкції, показаної на рис.2.5 можуть бути порушені ефективно, просто за допомогою поділу диска або циліндра, в якому наводяться струми, і видалення котушок збудження, які зазвичай використовуються [13-15]. Така схема показана на рис. 2.7.

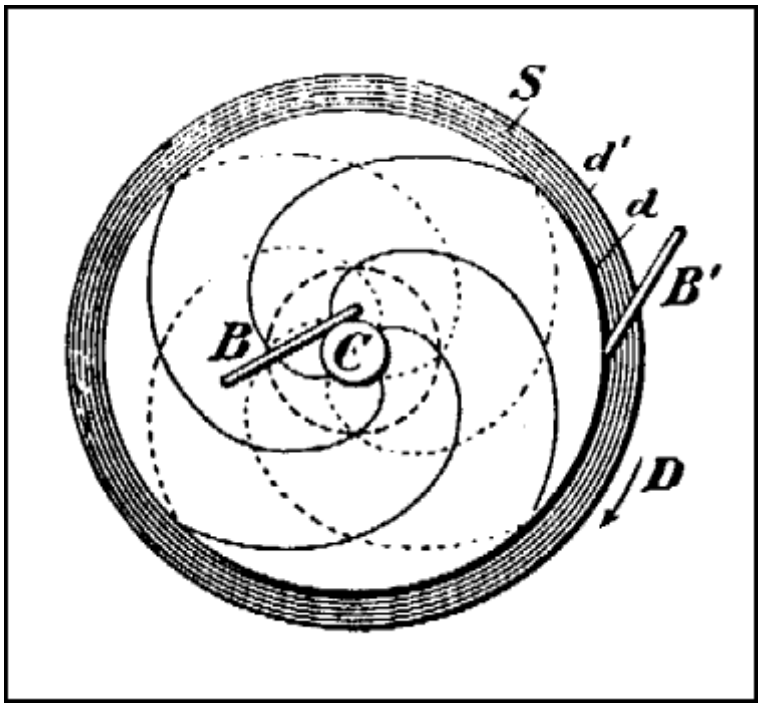


Рис. 2.7 Уніполярная машина Тесла

Диск або циліндр D, як передбачається, будуть обертатися між цими двома полюсами N і S магніту, які повністю охоплюють диск з обох сторін, контури диска і полюсів, що подаються колами d і d' відповідно, верхній полюс, не показаний для наочності. Сердечники магніту, як передбачається, мають отвори в центрі, вал C диска пронизує їх. Якщо немаркований полюс - нижче, і диск обертається, струм гвинтовий форми, буде, як раніше, текти від центру до периферії, і може бути знятий відповідними легкими контактами, B і B ', на валі і периферії відповідно [13-15]. У цьому пристрої струм, поточний крізь диск і зовнішня ланцюг не матимуть ніякого помітного впливу на збудливий магніт.

А тепер припустимо, що диск розділений на сектори, по спіралі, як позначено суцільними або пунктирними лініями на рис. 2.7.Різниця потенціалу між точкою на валі і точкою на периферії залишиться незмінною, в знаку так само як в кількості. Єдина відмінність буде в тому, що опір диска буде збільшено і буде більше падіння потенціалу від точки на валі до точки на периферії, коли той же струм буде проходити по зовнішньому контуру. Але так як струм змушений дотримуватися розділових ліній, ми бачимо, що він буде або сприяти полю збудження або чинити опір йому і це буде залежати, при інших рівних умовах, від напрямку лінії розбиття. Якщо розбиття таке, як позначено суцільними лініями в рис. 2.7, то очевидно, що, якщо струм має те ж саме напрямок як раніше, тобто від центру до периферії, його ефект повинен буде підсилити збудливий магніт; тоді як, якщо розбиття реалізовано як позначено пунктиром, вироблений струм буде мати тенденцію послаблювати магніт. У першому випадку машина буде здатна до порушення, коли диск обертається в напрямку стрілки D; в останньому випадку напрямок обертання повинно бути зворотним. Два таких диска можуть бути об'єднані, однак, як зазначено вище, ці два диска, можуть, як обертатися в протилежні сторони, так і в одну [13-15].

Подібне розташування може, звичайно ж, бути реалізовано в машині, в якій, замість цього диска, обертається циліндр. У таких уніполярних машинах, подібного типу, звичайні котушки збудження і полюси можуть бути опущені, і машина може бути зроблена, так щоб складатися тільки з циліндра або двох дисків, оточених металевим корпусом [13-15].

Замість того щоб поділяти диск або циліндр по спіралі, як позначено на рис. 2.7, більш зручно вставити один або більше витків між диском і контактним кільцем на периферії, як показано на рис. 2.8

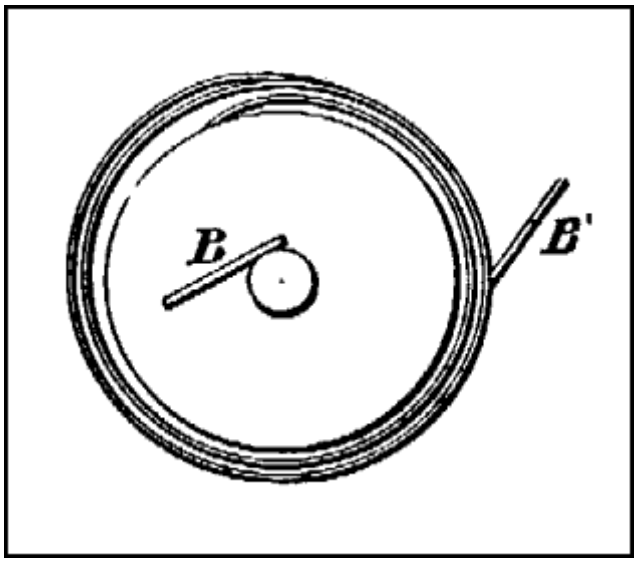


Рис. 2.8. Покращений уніполярний генератор Тесла

Наприклад, генератор Форбеса може, працювати за таким принципом. В результаті дослідів автор прийшов до висновку, що замість зняття струму з двох таких дисків легкими контактами, як зазвичай, використовувався гнучкий приводний проводить ремінь для підвищення ефективності. Диски в такому випадку, забезпечуються широкими бортиками, надаючи великий контакт з поверхнею. Пояс повинен бути зроблений, таким чином, щоб спиратися на бортики в натяг, щоб компенсувати нещільність прилягання. Кілька машин з контактним поясом були побудовані автором два роки тому, і працювали задовільно; але через відсутність часу робота в цьому напрямку була тимчасово зупинена. Ряд цікавих особливостей, зазначених вище також було використано автором у деяких типах двигунів, що працюють від змінного струму [13-15].

2.3 Уніполярні генератори

Як було відмічено раніше, перший уніполярний генератор винайшов Майкл Фарадей. Суть ефекту, відкритого Фарадеєм, полягає в тому, що при обертанні диска в поперечному магнітному полі, на електрони в диску діє сила Лоренца, яка зміщує їх до центру або до периферії, в залежності від напрямку

поля і обертання, рис. 2.9 а. Завдяки цьому, виникає електрорушійна сила, і через струмознімальних щітки, що стосуються осі і периферії диска, можна знімати значний струм і потужність, хоча напруга невелика (зазвичай, частки Вольта) [22].

Пізніше, було виявлено, що відносне обертання диска і магніту не є необхідною умовою. Два магніту і струмопровідний диск між ними, що обертаються разом, також показують наявність ефекту уніполярної індукції. Магніт, зроблений з електропровідного матеріалу, при обертанні, також може працювати, як уніполярного генератора: він сам є і диском, з якого щітками знімаються електрони, і він же є джерелом магнітного поля. У зв'язку з цим, принципи уніполярної індукції розвиваються в рамках концепції руху вільних заряджених частинок щодо магнітного поля, а не щодо магнітів. Магнітне поле, в такому випадку, вважається нерухомим [22].

Спори про таких машинах йшли довго. Зрозуміти, що поле є властивість «порожнього» простору, фізики, які заперечують існування ефіру, не могли. Це правильно, оскільки «простір не порожній», в ньому є ефір, і саме він забезпечує середу існування магнітного поля, щодо якого обертаються і магніти, і диск. Магнітне поле можна розуміти, як замкнутий потік ефіру. Тому, відносне обертання диска і магніту не є обов'язковою умовою [22].

У роботах Тесла, як ми вже відзначали, були зроблені удосконалення схеми (збільшений розмір магнітів, а диск сегментований), що дозволяє створювати самовращающійся уніполярні машини Тесла, показані на рис. 2.9 б. Дивно, що немає інформації про сучасні розробників таких генераторів [22].

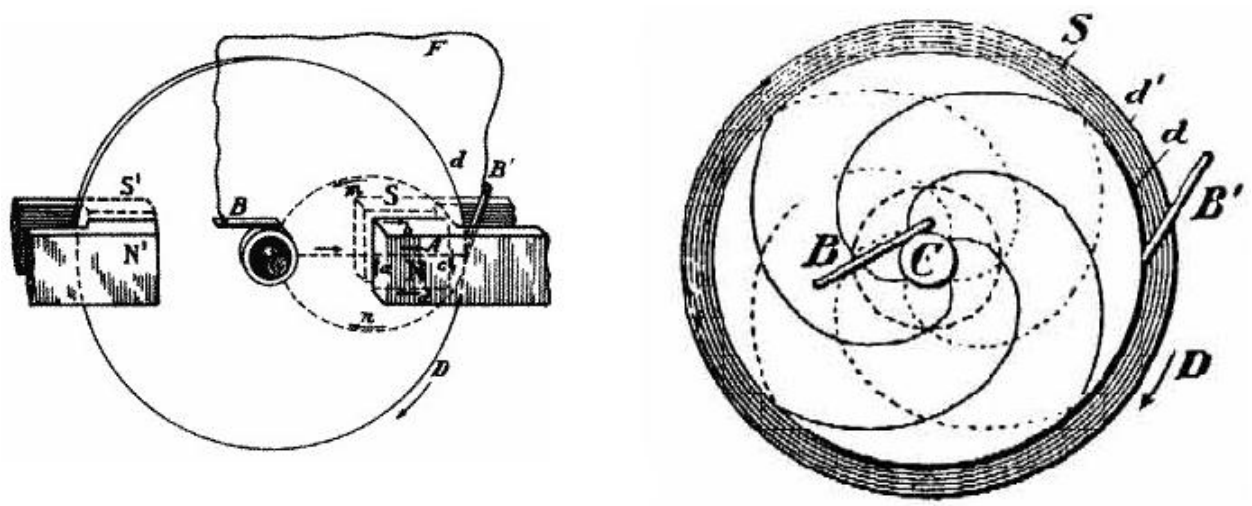


Рис. 2.9 – Уніполярна машина Фарадея, б – Уніполярна машина Тесла

Група дослідників даного напрямку в Індії, під керівництвом Парамаханза Теварі (Paramahansa Tewari), сайт http://tewari.org отримує 250% ефективність зі звичайним електропровідним диском. На рис. 2.10 показаний їх уніполярний генератор з підвищує трансформатором [22].

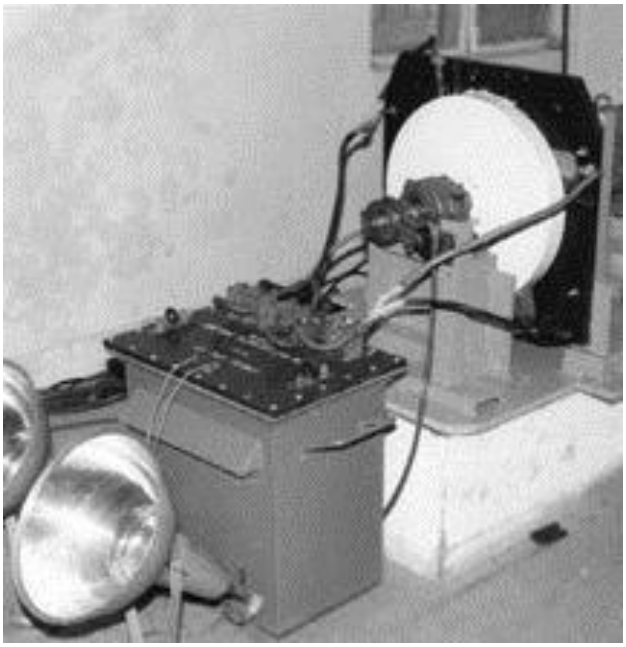


Рис. 2.10.Уніполярний генератор Теварі

Інший автор аналогічних розробок, Брюс Де Палма (Bruce De Palma) називав свій проект N-машина. Брюс був талановитий інженер, закінчив Гарвард і 15 років займався темою уніполярних генераторів. На рис. 2.11 показана його схема, в якій і магніти, і струмопровідний диск обертаються разом [22].

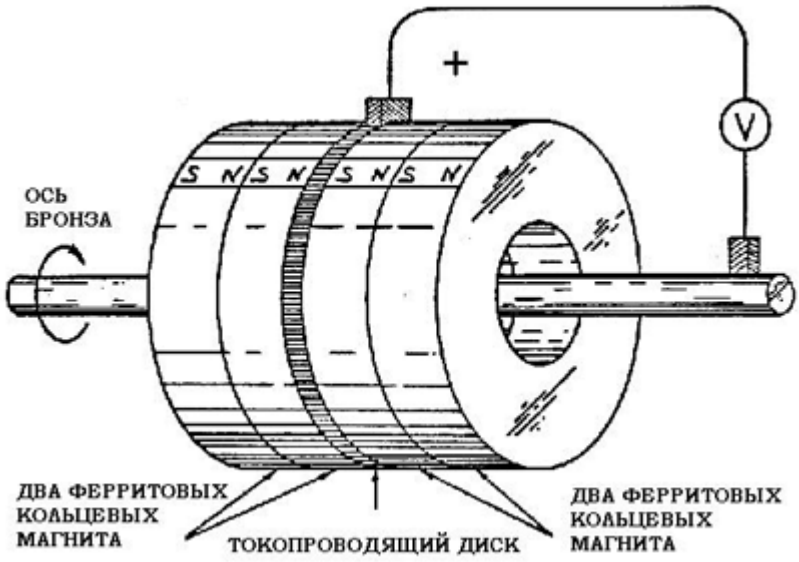


Рис. 2.11. N-машина Брюса де Палма

Випробування різних конструкцій N-машини проводили професіонали, на протязі багатьох років. Метод перспективний, забезпечується ефективність, як співвідношення витраченої потужності приводу і створюваної електричної потужності, не менше 200% [22].

Недоліки, як і у інших уніполярних генераторів, полягають у тому, що потужність на виході має вигляд постійного струму низької напруги. Однак, їх застосування, вже 20 років тому, планувалося в системах низьковольтного електролізу, з метою отримання дешевого водню з води, в тому числі, морської води.

3. Постановка і проведення експерименту

3.1. Розробка експериментального стенду

В результаті виконання роботи був розроблений і виготовлений експериментальний стенд (рис. 3.1.2), який включає в себе наступні компоненти: моторчик потужністю 8 Вт (5), який розкручує магніт, в деяких експериментах разом з металевим диском. Праворуч від моторчика встановлений регулятор оборотів (6). Моторчик заряджається за допомогою 12 V акумулятора (4). Завдяки цифровому тахометру HS 2234 (1) ми, з високою точністю, вимірюємо кількість оборотів магніту (2). На відстані, близько 0.5см., Від магніту на шпильці підвішений металевий диск (3) діаметром 10-11см. Для зняття показань постійного і змінного струму використовувався цифровий мультиметр SDM 3055 (8). Магнітометр HT 201 використовуємо для вимірювання магнітного поля (Рис. 3.1.5).

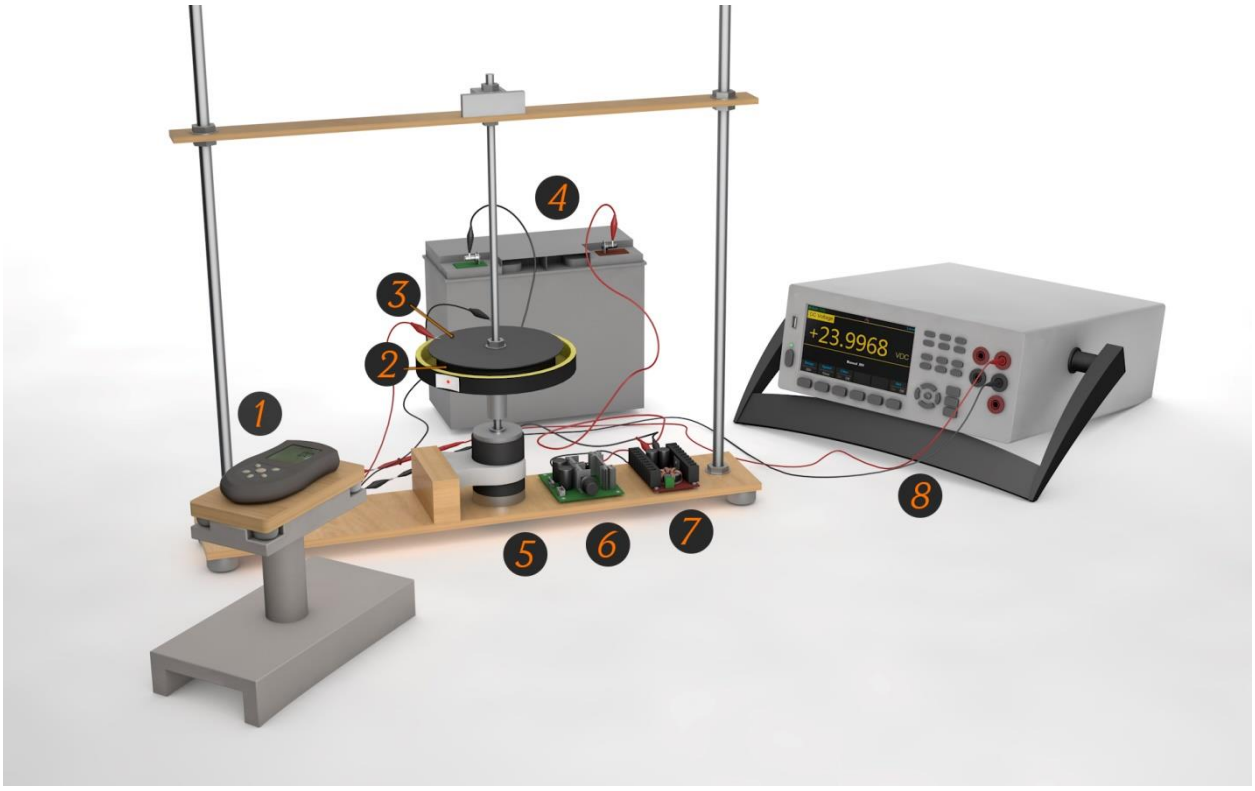


Рис. 3.1.1. Комп’ютерна модель установки

За допомогою системи автоматизованого проектування Solid Works, була побудована тривимірна модель експериментальної установки в натуральну величину. Даний програмний комплекс призначений для автоматизації робіт на етапах конструкторської підготовки проекту, аналізу і на етапі дизайну. Комп'ютерна модель установки представлена на рис 3.1.1

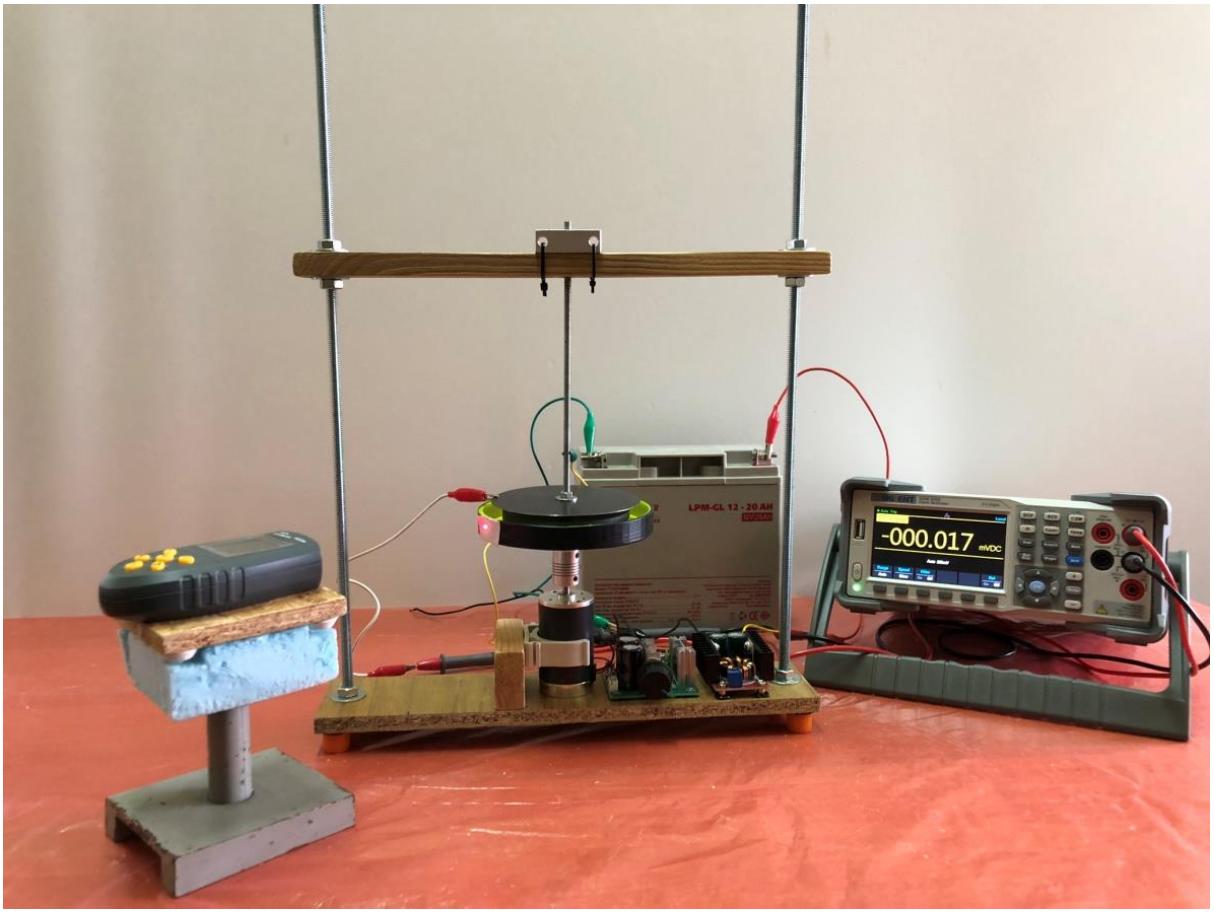


Рис. 3.1.2. Експериментальна установка

Цифровий мультиметр Siglent SDM3055 (Рис. 3. 1. 3) поєднує в собі безліч математичних і статичних функцій, використовується для вимірювання змінного і постійного напруги. Він включає в себе різні комунікаційні інтерфейси із простими налаштуваннями, оснащений 4,3-дюймовим TFT ЖК-дисплеєм, і розроблений для високої продуктивності, має безліч функцій і

автоматичні вимірювання. Siglent SDM3055 - багатофункціональний настільний мультиметр [23].

Технічні характеристики Siglent SDM3055:

- Швидкість вимірювань: до 150 свідчень / сек.
- Загальний обсяг пам'яті 1 ГБ, масове збереження налаштувань і файли даних, підтримка збереження даних на зовнішній диск U.
- Вбудована термопара.
- Англійське і китайське меню.
- Вбудована довідка.
- Різні математичні функції, що включають виміри мінімального / максимального / середнього / стандартного відхилення сигналу. Всі свідчення можуть відображатися в дБм, дБ, Pass / Fail, як відносна величина, гістограма, крива зростання, стовпчаста діаграма та ін.
- Підтримка віддаленого управління, надається разом з програмним EASYSDM.
- 4.3-дюймовий кольоровий широкоформатний ЖК дисплей, настройка для роботи з різними інтерфейсами з портами USB Device, USB Host, LAN.



Рис. 3.1.3. Цифровий мультиметр Siglent SDM 3055

Для вимірювання магнітного поля використовуємо промисловий магнітометр НТ -201 (Рис.3.1.4) – прилад для вимірювання індукції постійного (від 0 до 2000мТл, з роздільною здатністю 0,01 мТл.) та змінного (від 0 до 2000 мТл частотою від 10 до 200 Гц, з роздільною здатністю 0,01 мТл.) магнітного поля моторів, гучномовців, магнітних сенсорів і інших машин і механізмів; вимірювання залишкової намагніченості матеріалів; вимір застосування магнітів для зупинки лічильників комерційного обліку води, газу, електроенергії; вимір намагніченості інструменту до і після демагнітізації (наприклад, вимір намагніченості викруток). Точність вимірювання постійного магнітного поля 2%, змінного 5% [24].

Технічні характеристики:

- Екран 4,5 розряду.
- Вимірюваний діапазон від 0 до 2000 мТл.
- Точність вимірювання постійного магнітного поля 2%, змінного 5%.
- Робоча температура: від 5 до 50 С. Зберігання -20 ... 70 С.
- Харчування: 9В від батареї або від блоку живлення.

- Габарити: 160x88x36 мм.
- Вага 300 г.



Рис. 3.1.4. Магнітометр HT-201

Тахометр HS2234 (Рис. 3.1.5) – лазерний (безконтактний) прилад для вимірювання частоти обертання механізмів. Лазерний тахометр на відміну від контактного тахометра не потребує прямого контакту з елементом, що обертається, це має ряд важливих переваг: менший знос приладу, можливість роботи з об'єктами, що швидко обертаються (потенційно небезпечними), можливість роботи на значній відстані від обертового елемента. Для роботи з безконтактним лазерним тахометром потрібно приклеїти на обертовий елемент, що відображає переривник (будь-який блискучий матеріал) [25].

Особливості тахометра HS2234:

- Два режиму лазера: 25 мА і 40мА, що дозволяє економити заряд батарейок якщо вимірювання проводяться на відстані менше 200 мм.
- Два режими роботи: автоматичний і ручний. У моделі HS2234 є автоматичний режим, в якому прилад можна навести на обертовий вал і залишити і він буде прочитувати свідчення. А якщо при цьому вибрати режим максимальна швидкість (MAX), то можна дізнатися яка була максимальна швидкість обертання.
- Пам'ять на 50 вимірювань.



Рис. 3.1.5. Цифровий лазерний тахометр HS2234

3.2. Виконання експериментальних робіт

У першому експерименті використовувався однорідний феритовий дисковий магніт діаметром 10 см і мідний диск діаметром 11 см. Магніт розкручувався від 200 до 3000 об/хв, а мідний диск знаходився в нерухомому стані в лабораторній системі відліку.В результаті проведення експерименту були виміряні напруги, що виникають між віссю і периферією диска, які представлені на рис.3.2.3.



Рис. 3.2.1. Дисковий магніт

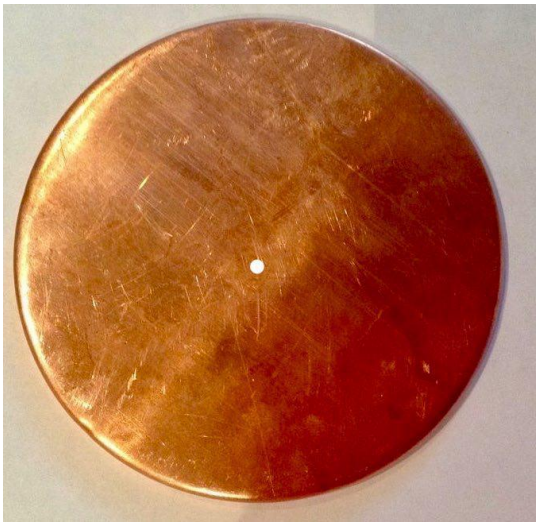


Рис. 3.2.2. Мідний диск

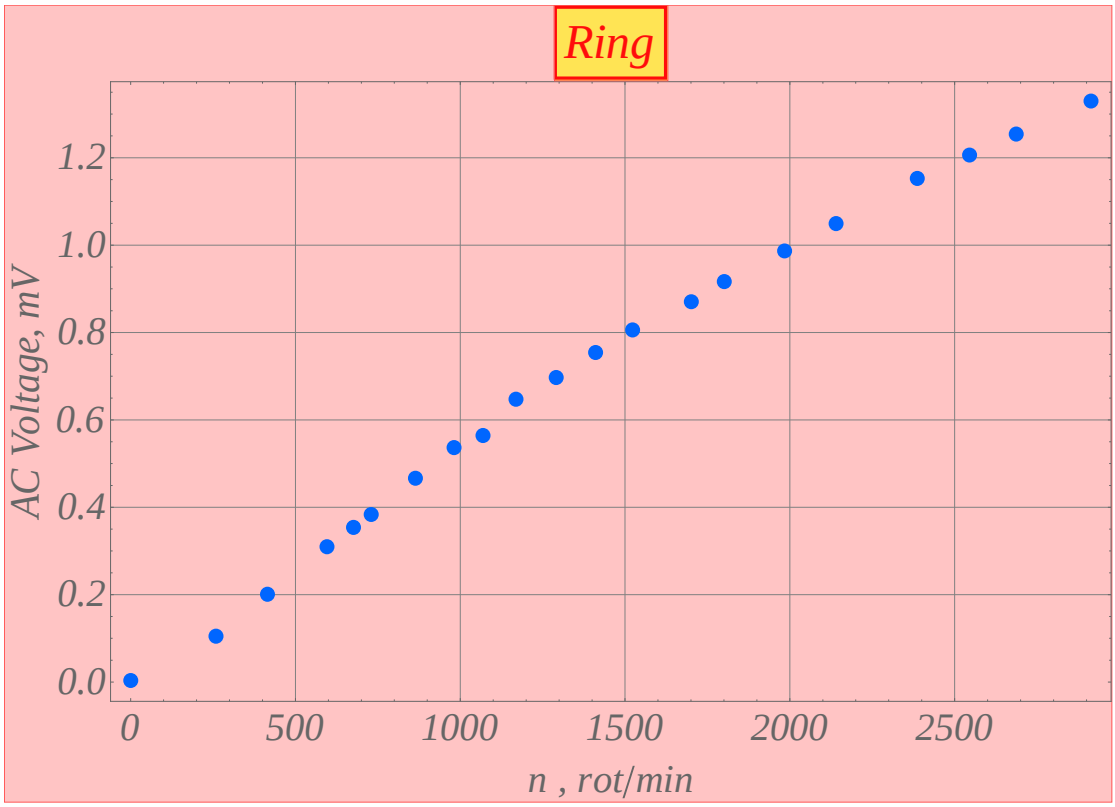


Рис. 3.2.3 Графік напруги, що виникає на нерухомому, мідному диску, в залежності від швидкості обертання однорідного кільцевого магніту

У другому експерименті використовувався магніт, що складається з корпусу, надрукованого на 3D принтері і 44 дискових магнітів, діаметром 1,4 см, що створює неоднорідне магнітне поле. Магніт розкручувався від 208.2 до 2992 об/хв, мідний диск знаходився в нерухомому стані щодо лабораторної системи відліку. Результати вимірювання виникає індукційного напруги представлені на рис. 3.2.5.



Рис.3.2.4. Складовий магніт, який створює неоднорідне магнітне поле

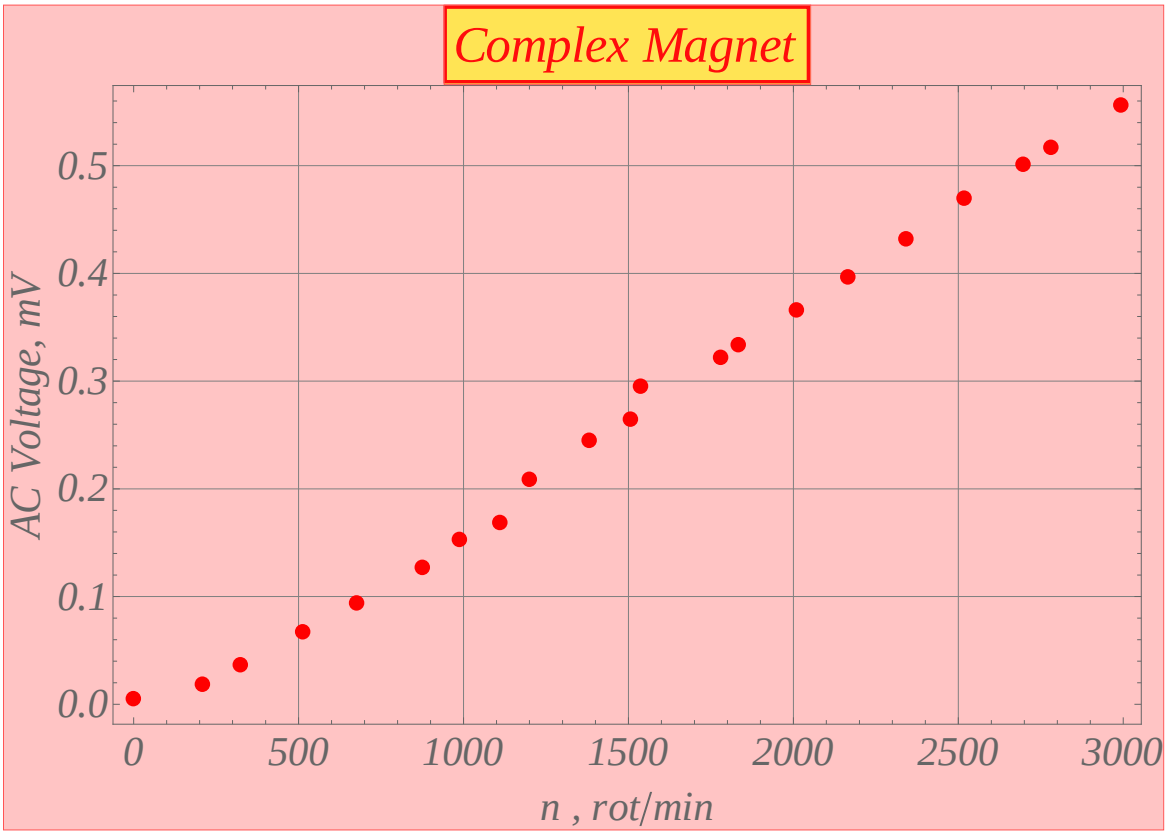


Рис. 3.2.5 Графік напруги, що виникає на мідному диску, в залежності від швидкості обертання збірного магніту.

У наступному експерименті ми використовували вже не мідний диск, а сталевий радіусом 10 см, він також знаходився в стані спокою щодо лабораторної системи відліку. Однорідний дисковий магніт (діаметром 10 см) розкручували до 2205 об / хв



Рис. 3.2.6. Сталевий диск

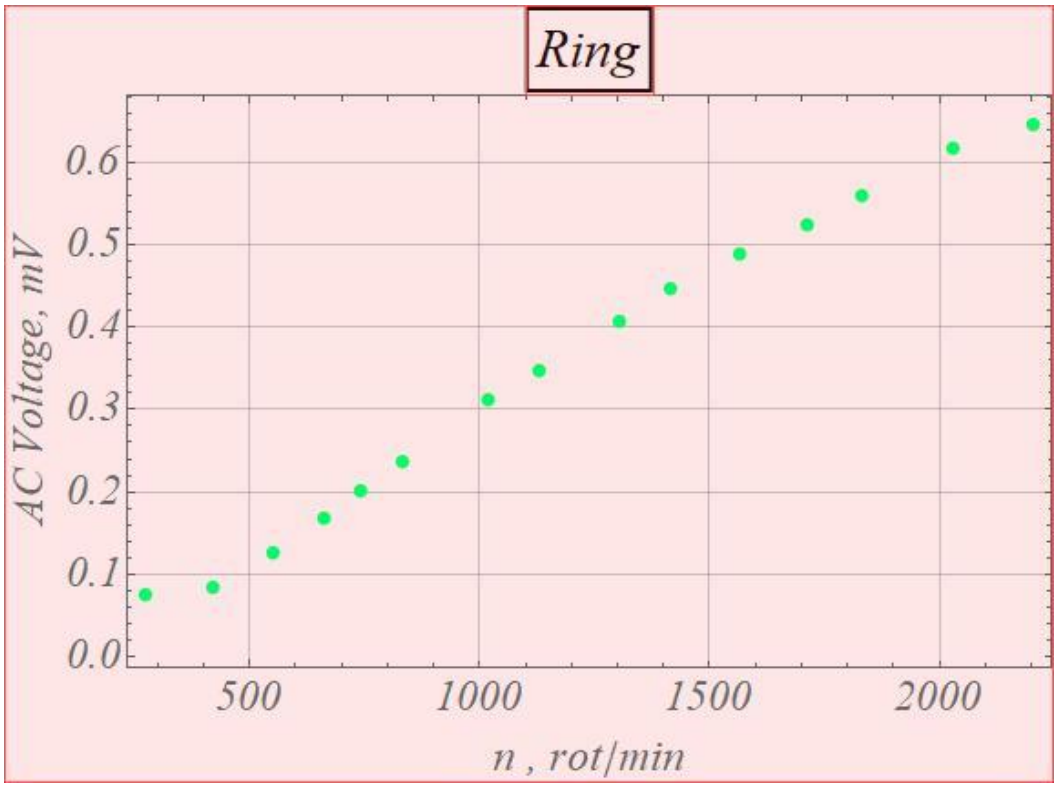


Рис. 3.2.7. Графік напруги, що виникає на сталевому диску, в залежності від швидкості обертання однорідного кільцевого магніту

У подальших експериментах дисковий магніт, який створює однорідне магнітне поле, діаметром 10 см і металеві диски, (спочатку феромагнітний сталевий, потім діамагнітний мідний) встановлювалися жорстко на загальну вісь і розкручувалася одночасно з однаковою швидкістю. Таким чином, магніт і металевий диск оберталися щодо лабораторної системи відліку, але були нерухомі одна відносно одної (рис. 3.2.8).

Відповідно до традиційного визначення закону електромагнітної індукції Фарадея ЕРС індукції в цьому випадку виникнути не може.

З результатів відповідного експерименту з феромагнітним диском (сталевим), представлених на рис. 3.2.9 видно, що виникає напруга дійсно вкрай мало і не перевищує 0,1 мВ.

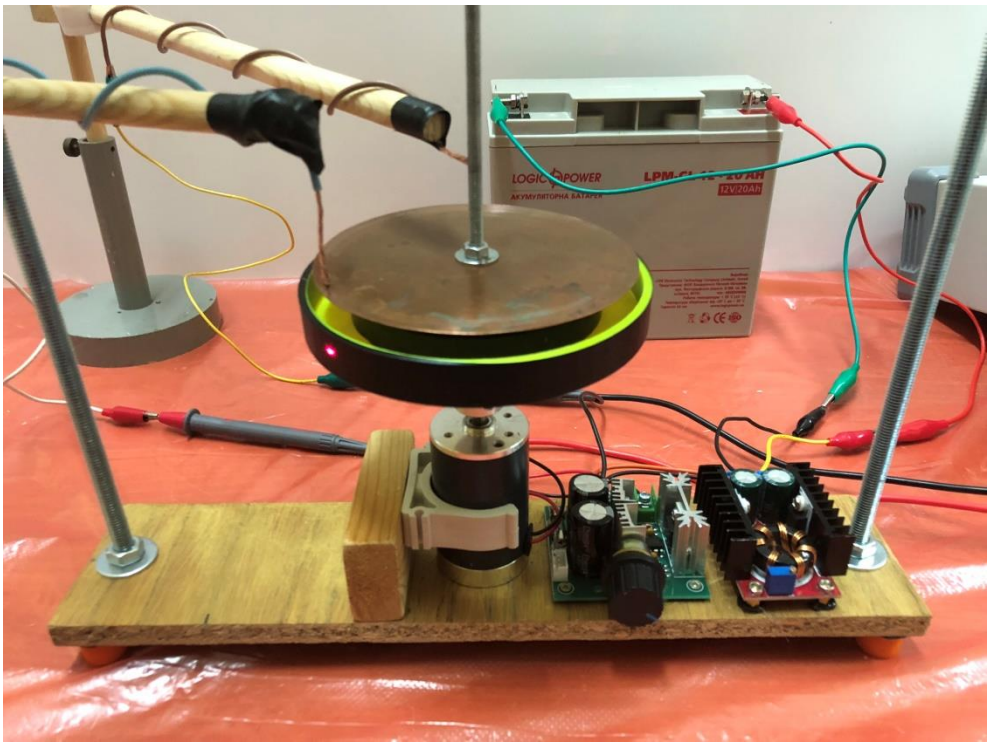


Рис. 3.2.8. Експериментальна установка з обертовими на одній осі металевим диском і дисковим магнітом

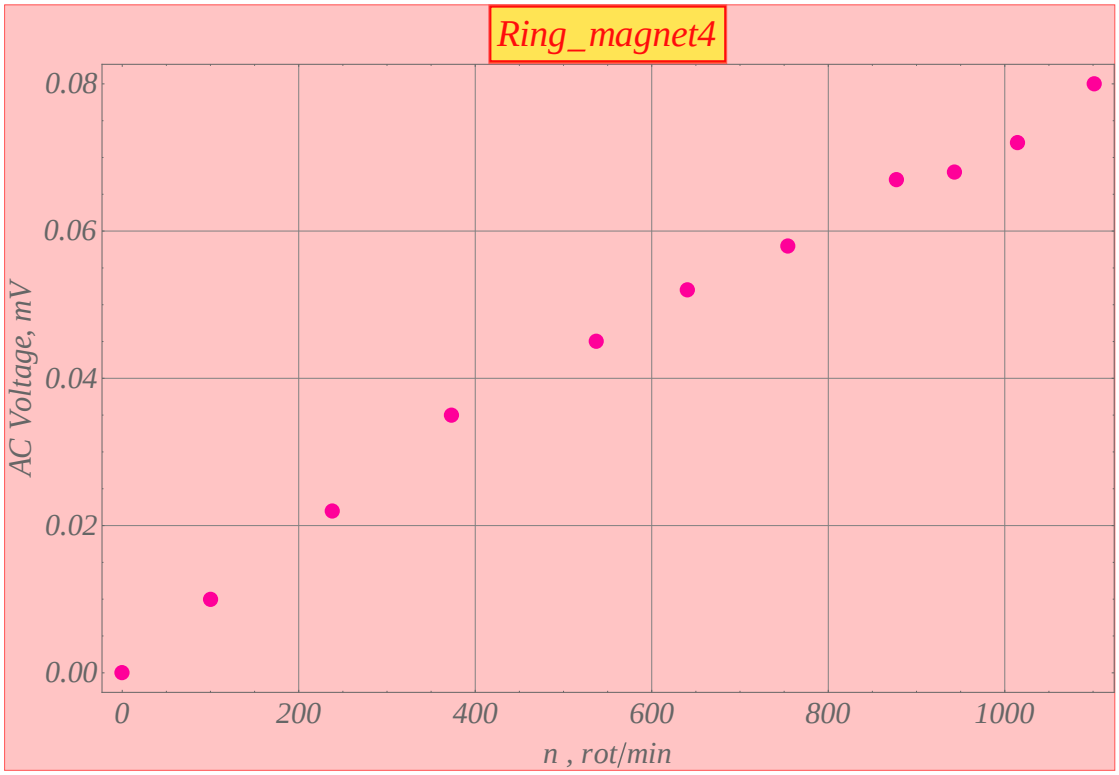


Рис. 3.2.9. Графік ЕРС індукції, що виникає в сталевому диску, в залежності від швидкості обертання диска і однорідного кільцевого магніту

Однак у випадку з мідним диском, який обертався разом з кільцевим магнітом, отримані інші результати (див. Рис. 3.2.10).

Зокрема, на швидкостях обертання вище 1500 об/хв. виникла ЕРС індукції на рівні 400 мВ, значення якої осцілірували з ростом частоти.

Даний експериментальний результат не має теоретичного пояснення в рамках стандартної електродинамічної моделі, заснованої на рівняннях Максвелла, що вказує на необхідність подальшого розвитку даної моделі.

Крім того, виникнення суттєвої ЕРС індукції при нерухомому положенні магніту і провідника, які при цьому рухаються щодо лабораторної системи відліку, пов'язаної з поверхнею Землі, однозначно свідчить про участь в даному процесі електромагнітного середовища.

Оскільки повітря, будучи діелектриком, не може викликати циркуляцію електричних зарядів в мідному диску, а магніт покоїться щодо провідника, то саме відносний рух системи магніт-диск щодо електромагнітної середовища призводить до появи індукованого напруги.

Таким чином, даний результат підтверджує наявність в навколишньому просторі особливої електромагнітного середовища, що є переносником електромагнітної взаємодії, що повністю відповідає науковим висновкам видатних фізиків Ломоносова, Фарадея, Максвелла, Лоренца, Умова, Тесли, Кельвіна і інших про існування світлоносного ефіру, рух зарядів в якому може викликати цілий комплекс різних електромагнітних явищ.

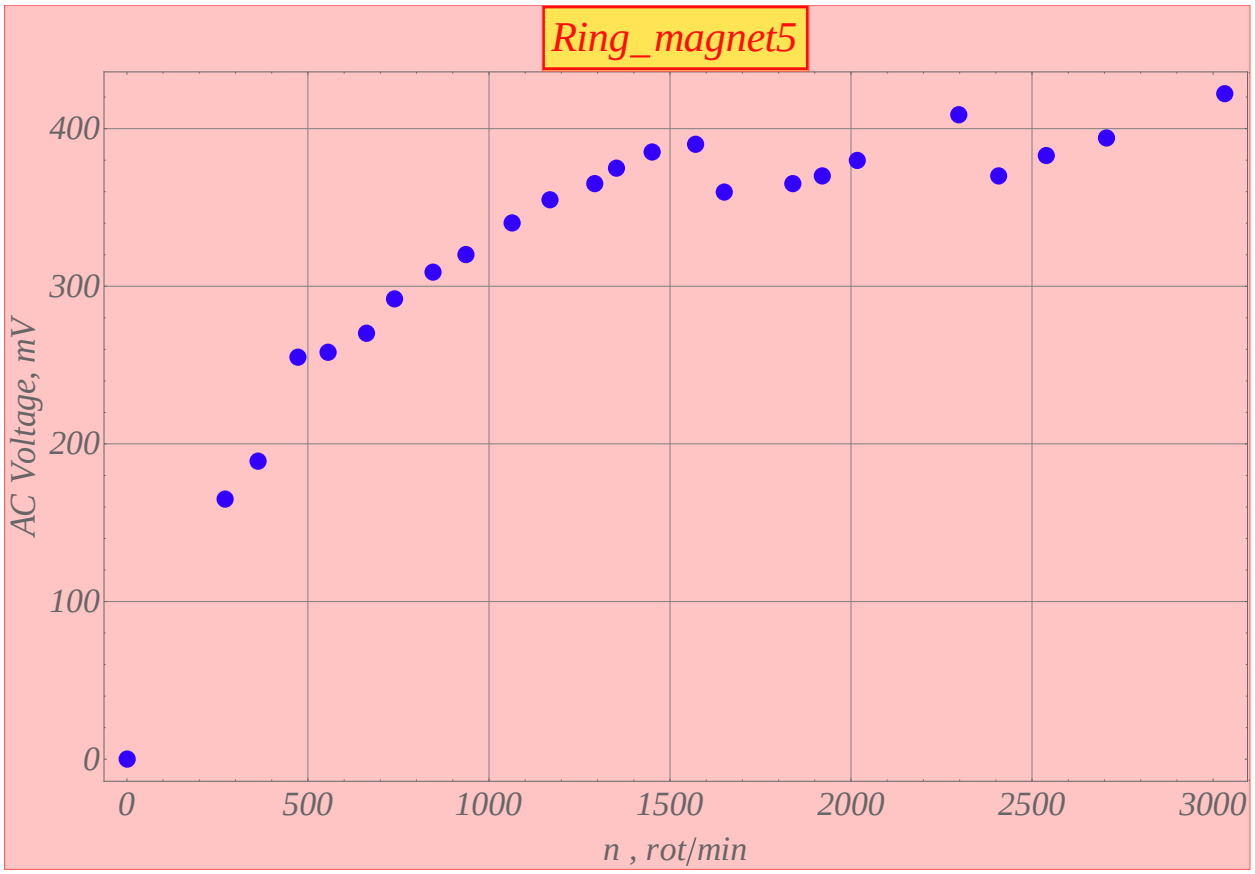


Рис. 3.2.10. Графік ЕРС індукції, що виникає в мідному диску, в залежності від швидкості обертання диска і однорідного кільцевого магніту

4. Теоретична обробка отриманих результатів

У класичному поданні, на електрони, що знаходяться в диску, діє сила Лоренца:

$$F = q(E + [v \times B]) \tag{4.1}$$

У режимі холостого ходу (без навантаження), генератор створює на вихідних контактах напругу U_{xx}. При цьому електрони в ланцюзі не рухаються, тому сила Лоренца, записана раніше, дорівнює нулю [19]. Але другий доданок (магнітна сила Лоренца) в силі Лоренца, пропорційна векторному добутку напруженості магнітного поля і швидкості переміщення електрона разом з провідником, не дорівнює нулю [20]. Виходить так, що перший доданок компенсує другий. Отже, при обертанні диска виникає напруженість електричного поля, яку можна розрахувати, висловивши її з рівняння для сили Лоренца:

$$E_{xx} = -\Omega \cdot r \cdot B \tag{4.2}$$

Де $\Omega \cdot r$ це кутова швидкість помножена на радіус (відстань від осі диска до розглянутого ділянки диска), тобто це лінійна швидкість розглянутої ділянки диска. Чим далі від осі обертання, тим більше напруженість електричного поля в даній ділянці диска.

Різниця потенціалів, іншими словами, напруга, інтегрується з напруженості. Виходить:

$$U_{xx} = \frac{\Omega R^2 B}{2} \tag{4.3}$$

в вольтах, де R це радіус диска.

Формулу (4.3) можна перевірити з графіків отриманих результатів експериментів. При збільшенні оборотів диска напруга зростала.

На початку експериментів було вирішено використовувати різні магніти: кільцевої магніт, який створює однорідне магнітне поле і збірної магніт, що складається з корпусу, роздрукованого на 3D принтері, та 44 дискових магнітів, діаметром 1,4 см, даний магніт створював неоднорідне магнітне поле. Нагадаю, в якості металевого диска використовувався мідний диск (діамагнетик), який знаходився в стані спокою, магніти розкручувалися до 3000 об / хв. Результати двох експериментів показані на рис. 4.1

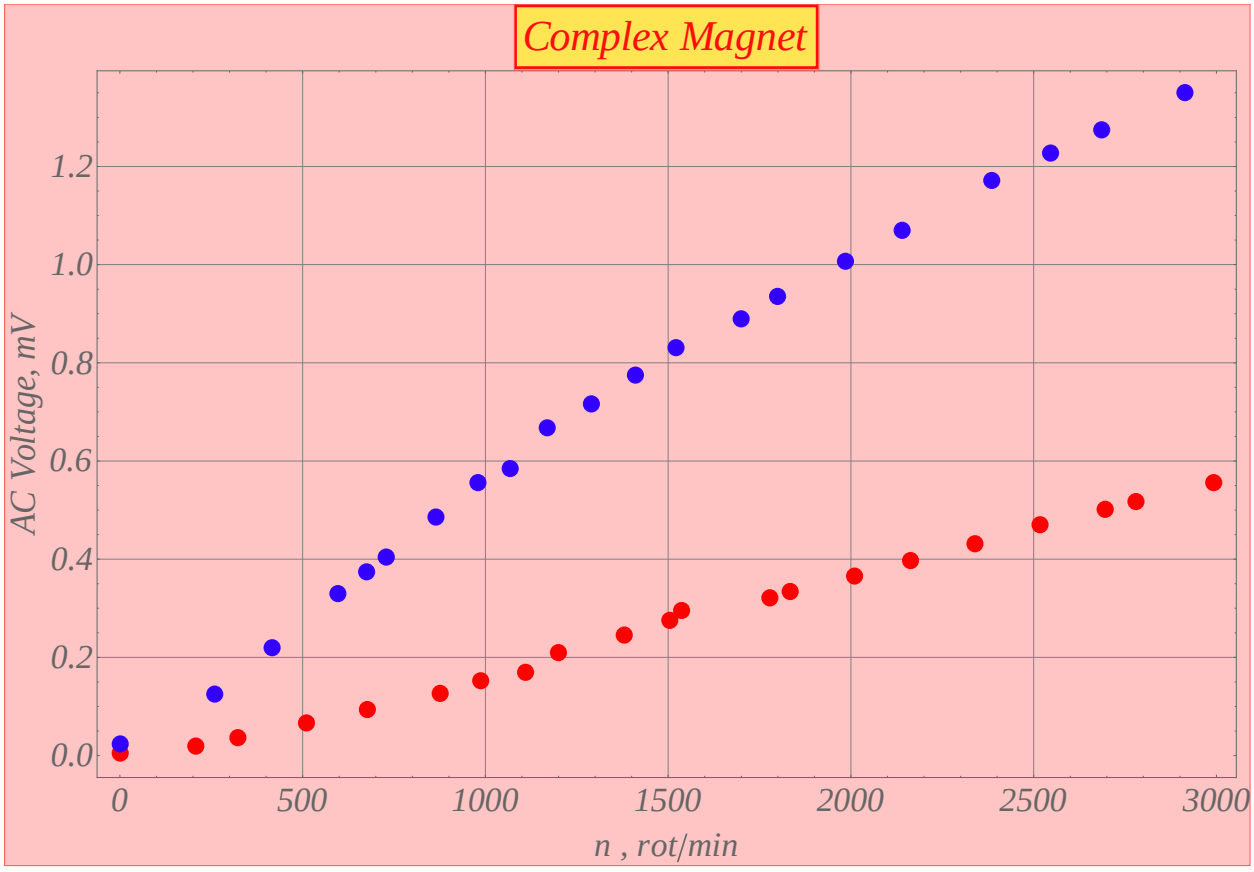


Рис. 4.1. Синіми маркерами показана лінія зростання напруги в однорідному магнітному полі, червоними маркерами – в неоднорідному магнітному полі.

З графіка видно, що напруга U_{xx} в першому експерименті вище, ніж у другому, це обумовлено тим, що при використанні цілісного дискового магніту заряди поширювалися по всьому мідному диску, в той час як в експерименті з збірним магнітом, заряд розташовується точково. Далі було вирішено, що

використання збірного магніту, що створює неоднорідне магнітне поле, недоцільно, тому працювали тільки з кільцевим магнітом.

Провівши експеримент аналогічний першому, за винятком того, що використовувався вже сталевий диск (феромагнетик), ми отримали меншу напругу, ніж було при використанні мідного диска, це можна побачити при порівнянні рис. 3.2.3 і рис. 3.2.7, оскільки мідь краще проводить електричний струм.

Висновки

Для вивчення явища уніполярної індукції Фарадея, був сконструйований і зібраний експериментальний стенд, розроблена 3D модель даної установки.

Експериментально вивчено різні режими роботи установки з використанням магнітів різної конструкції і металевих провідників різного типу.

Отримано якісно подібне індукування ЕРС індукції в діамагнітному і феромагнітному зразках при їх приміщенні під обертове магнітне поле.

При обертанні системи, магніт + металевий диск як цілого, найбільший інтерес представляє випадок з мідним диском. Отримана нелінійна періодична зміна індукованого напруги.

Даний результат не може бути описаний існуючої теоретичною моделлю електромагнітної взаємодії, заснованої на рівняннях Максвелла, які не враховують наявність електромагнітного середовища і свідчить про необхідність подальшого розвитку електромагнітної теорії.

Практичні результати роботи можуть бути використані в альтернативній енергетиці при розробці перетворювачів електромагнітної енергії, в індукційних нагрівачах і генераторах.

Список використаних джерел

1. http://electricalschool.info/
2. http://moyaosvita.com.ua/
3. Swarm reveals Earth's changing magnetism, ESA, 19 June 2014, http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Swarm/Swarm_reveals_Earth_s_changing_magnetism
4. Физика 9 класс: учебник для общеобразовательных учреждений / А.В. Петришкин, Е.М. Гутник, - 14-е издание, стериотип. – М. : Дрофа, 2009. – 300с.
5. Мякишев Г. Я., Физика. 11 класс : учеб. для общеобразоват. учреждений : базовый и профил. уровни / Г. Я. Мякишев, Б. В. Буховцев, В. М. Чаругин; под ред. В. И. Николаева, Н. А. Парфентьевой. — 17-е изд., перераб. и доп. — М. : Просвещение, 2008. — 399 с : ил.
6. Мякишев Г. Я., Физика: Электродинамика. 10-11 класс. Углубленный уровень: учебник/ Г. Я. Мякишев, А.З. Синяков. – 6-е изд., испр. - М.:Дрофа, 2018. – 476, [4]с.
7. Курс лекций по физике. Часть II: Электромагнетизм – https://studfiles.net/
8. Тамм И. Е., Основы теории электричества, 10 изд., М., 1989
9. Костенко М. П., Пиотровский Л. М., Электрические машины, 3 изд., ч. 1, Л., 1972
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982
11. Пановский В., Филипс М., Классическая электродинамика, пер. с англ., М., 1963. *Г. В. Пермитин, Ю. В. Чугунов*.
12. http://bourabai.kz/desktop.html
13. http://www.matri-x.ru/
14. "NOTES ON A UNIPOLAR DYNAMO", by Nikola Tesla Electrical Engineer, The September 2nd, 1891 Page number(s): 258-260
15. https://teslauniverse.com/

16. И. Е. Тамм. Основы теории электричества. § 112

17.Физическая энциклопедия, т.5, стр.224, стр.225, статья «Униполярная инд укция», авторы Г. В. Пермитин, Ю. В. Чугунов.

18.Л. А. Суханов. Электрические униполярные машины, 1964 г

19.http://www.physicum.narod.ru/vol_5/224.pdf

20.Джексон Дж., Классическая электродинамика, пер. с англ., М., 1965

21.*М., 1965; Сивухин Д. В., Общий курс физики, 2 изд., т. 3. Электричество, М., 1983*.

22.Приходько Валентин Иванович, Copyright © 2010-2018г. – Режим доступа : http://www.dom-spravka.info/_alt_energo/ogl_alt_energo.html

23.https://masteram.com.ua/ru/precision-digital-multimeter-siglent-sdm3055/

24.http://www.momm.com.ua/milliteslametry/333-ht-201.html

25.https://prom.ua/p543422830-lazernyj-beskontaktnyj-tahometr.html