

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

"До захисту допущено"

В.о. завідувач кафедри

_____ Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (ініціали, прізвище)

" _____ " _____ 2020р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

з спеціальністю 171 Електроніка
(код та назва напрямку підготовки або спеціальності)

спеціалізація Електронні прилади та пристрої

на тему: «**Моделювання в програмних середовищах для дослідження
фізичних властивостей феромагнетиків**»

Виконав: студент IV курсу, групи ДЕ-62

Штикало Олександр Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові) _____ (підпис)

Керівник Ст.викл., к.т.н., с.н.с., Семікіна Т.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Консультант Технічний розділ
_____ (підпис)

Рецензент Зав. відділу "Поляритонної оптоелектроніки та
технології наноструктур" Інституту фізики напівпровідників
ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ,

К.т.н., Мамикін С.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Консультант по нормоконтролю
Доцент, к.т.н., доцент, Чадюк В.О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра електронних пристроїв та систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

Спеціалізація Електронні прилади та пристрої

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

" _____ " _____ 2020 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

Олександр ШТИКАЛО
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема проєкту **Моделювання в програмних середовищах для дослідження фізичних властивостей феромагнетиків**

Керівник проєкту Ст.викл.,к.т.н., ст.н.сп., Тетяна СЕМІКІНА,
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

затверджені наказом по університету від « 25 » травня 2020 року № 1196

2. Термін подання студентом проєкту _____ 10 червня 2020 року _____

3. Вихідні дані до проєкту розробити метод дослідження властивостей феромагнітних матеріалів за допомогою середовища моделювання MULTISIM™ for EDUCATION для студентів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

Пошук матеріалу по методах вимірювання властивостей феромагнетика та по середовищах моделювання. Аналіз програми MULTISIM™ for EDUCATION для студентів. Розробка методу дослідження у програмі моделювання. Проведення дослідження. Представлення отриманих розрахунків дослідження.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація доповіді до захисту, додатки А, Б, В, креслення електричної принципової схеми моделювання _____

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Ім'я ПРИЗВИЩЕ, посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Строки виконання етапів проєкту	Примітка
1	Пошук та аналіз літератури по вимірюванню та дослідженню магнітних матеріалів	13.04.2020- 19.04.2020	
2	Пошук та аналіз літератури по моделюванню та дослідженню магнітних матеріалів	20.04.2020- 26.07.2020	
3	Аналіз літератури по програмному середовищу моделювання електричних схем MULTISIM™ for EDUCATION	27.04.2020- 10.05.2020	
4	Проведення існуючого способу вимірювання властивостей трансформатора	11.05.2020- 20.05.2020	
5	Проведення експерименту вимірювання властивостей феромагнетика	21.05.2020- 25.05.2020	
6	Аналіз результатів	26.05.2020- 02.06.2020	
7	Оформлення пояснювальної записки, схеми, підготовка до доповіді	03.06.2020- 08.06.2020	

Студент

(підпис)

Олександр Штикало

(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту

(підпис)

Тетяна СЕМІКІНА

(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена вивченню властивостей феромагнетиків у програмному середовищі при різних заданих умовах. В дипломному проекті представлено огляд науково-технічної літератури по магнітних вимірюваннях характеристик магнітного поля і властивостей, по програмних середовищах моделювання, по програмному середовищу MULTISIM™ for EDUCATION для студентів. Показано перспективи використання програмного середовища MULTISIM™ for EDUCATION для студентів для проведення моделювання, симуляції, вимірювань магнітних характеристик. Моделювання виконується шляхом побудови в програмних середовищах схеми з трансформатором і осцилографом, що визначає характеристики петель гістерезису. Приведено результати дослідження фізико-математичної моделі змодельованої електричної схеми вимірювання з трансформатором та результати розрахунків характеристик феромагнетика що застосовуються у трансформаторі. Магнітні властивості феромагнітного матеріалу досліджували шляхом аналізу петель гістерезису в намагніченому полі за допомогою осцилографа електронного променя. Показано, як параметри трансформатора та компоненти схеми впливають на вид петлі гістерезису. Наведено методика вимірів та розрахунків магнітних характеристик: коерцитивної сили, залишкової індукції, магнітної проникності, намагніченості. Проаналізовано характеристики петель гістерезису та їх зв'язок із властивостями феромагнетика. У роботі представлена розроблена інструкція по спостереженню петель гістерезису на осцилограмі. Проаналізовано особливості моделювання програмному середовищі. Результати роботи можна застосувати для створення лабораторних робіт для студентів, призначених для ознайомлення роботи з середовищем моделювання і для проведення вимірювань для дослідження магнітних

властивостей феромагнетиків. Також можливе застосування для базових досліджень магнітних властивостей феромагнетика.

A N N O T A T I O N

The work is devoted to the study of the properties of ferromagnets in different software conditions. The study of magnetic properties can be carried out both by hardware methods of direct measurements and by simulation. The diploma project presents a review of scientific and technical literature on magnetic measurements of magnetic field characteristics and properties, on software modeling environments, on the software environment MULTISIM™ for EDUCATION for students. The prospects of using the software environment MULTISIM™ for EDUCATION for students for modeling, simulation, measurement of magnetic characteristics are shown. The simulation is performed by constructing a circuit with a transformer and an oscilloscope in software environments, which determines the characteristics of the hysteresis loops. The results of research of physical and mathematical model of the modeled electric scheme of measurement with the transformer and results of calculations of characteristics of the ferromagnet applied in the transformer are resulted. The magnetic properties of the ferromagnetic material were investigated by analyzing the hysteresis loops in a magnetized field using an electron beam oscilloscope. The studied ferromagnet in the form of a toroid has a magnetizing (primary) and measuring (secondary) winding, the number of turns of which affects the final results of the shape of the hysteresis loop. It is shown how the transformer parameters and circuit components affect the type of hysteresis loop. The method of measurements and calculations of magnetic characteristics: coercive force, residual induction, magnetic permeability, magnetization is given. The characteristics of hysteresis loops and their relationship with the properties of the ferromagnet are analyzed. The work presents instructions for observing hysteresis loops on the oscillogram. Features of modeling in the software environment are analyzed. The results of the work can be used to create laboratory work for students, designed to get acquainted with the simulation environment and to perform measurements to study the magnetic properties of ferromagnets. It is also possible to use for basic studies of the magnetic properties of ferromagnets.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИМІРЮВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	8
1.1 Магнітні вимірювання, вимірювання характеристик магнітного поля або магнітних властивостей речовин (матеріалів).....	8
1.2 Моделювання як метод наукового дослідження.....	13
1.2.1 Опис середовища Comsol Multiphysics.....	14
1.2.2 Опис середовища Femm.....	16
1.2.3 Опис середовища Elcut.....	18
1.2.4 Опис середовища Ansys Maxwell.....	20
1.2.5 Моделювання матеріалів за допомогою програмного забезпечення електронної структури ab initio (CASTEP).....	23
Висновок.....	25
2. MULTISIM, МОЖЛИВОСТІ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЄ ДАНА ПРОГРАМА.....	26
2.1 Введення схеми.....	27
2.2 Структура бази даних компонентів.....	28
2.3 Загальні правила моделювання.....	32
2.4 Симуляція.....	32
2.5 Аналіз.....	35
Висновок.....	37
3. ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ В СЕРЕДОВИЩІ MULTISIM.....	37
3.1 Дослідження трансформатора.....	37
3.1.1 Призначення, пристрій і розрахункові формули.....	37
3.1.2 Визначення параметрів трансформатора.....	39
3.1.3 Зовнішні характеристики трансформатора.....	43
3.1.4 Моделювання трансформатора в середовищі.....	45

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>						
Змн.	Арк.Ар	№ докум.№	ПідписПі	Дата	<i>Моделювання в програмних середовищах для дослідження фізичних властивостей ферромагнетиків</i>						
Розроб.	Штикало О.В.								Літ.Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Семікіна Т.В.								4	75	
Реценз.									<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ62</i>		
Н. Контр. Н.	Чадюк В.О.										
Затверд.	Ямненко Ю.С.										

ВСТУП

Зважаючи на те, що застосування магнітних матеріалів набуває все більших масштабів, наприклад, в фазообертачах, гіраторах, циркуляторах, обмежувачах потужності, трансформаторах, моделювання та вивчення їх властивостей набуває все більшої затребуваності. **На використанні магнітних властивостей речовин засновані цілі розділи техніки**, такі як магнітний запис звуку і зображення, магнітна дефектоскопія, магнітна розвідка корисних копалин. Вони використовуються у вигляді сердечників у трансформаторах, генераторів, електродвигунів і інших пристроїв. Тому дуже важливо мати можливість проводити прості, ефективні і результативні дослідження

Актуальність даної теми пояснюється можливістю досліджувати матеріал, компонент або конструкцію не затрачаються ресурси на їх виготовлення. Це економить як матеріал, так і час, якщо в ході досліджень необхідно вносити корекції в досліджуваній проект. **Комп'ютерне моделювання** стало одним з найважливіших методів наукового дослідження у різних галузях науки, такі як фізика, механіка, біологія, хімія, астрофізика, біологія, економіка.

Комп'ютерне моделювання використовується щоб отримати нові дані про об'єкт чи наближену оцінку поведінки системи, котре може бути занадто складним для аналітичного дослідження. Таке **моделювання є досить ефективним методом дослідження** складних систем. Комп'ютерні моделі забезпечують простіше і зручніше дослідження через можливість проводити обчислювальні експерименти в тих випадках, коли проведення реального експерименту малоймовірно через фінансові або фізичні перешкоди, або можливі непередбачувані і, можливо, небезпечні результати.

Метою роботи є розробка методу дослідження властивостей феромагнітних матеріалів за допомогою середовища моделювання MULTISIMTM for EDUCATION для студентів. За результатами дослідження

									Арк.
									6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

необхідно мати можливість розраховувати основні фізичні властивості феромагнетиків. Необхідне проведення аналізу існуючих методів вимірювання, моделювання і дослідження феромагнітних речовин, параметри, які вони можуть досліджувати, ресурси, які на це затрачаються, а також ефективність, простоту та опитмальність даних методів дослідження.

Результатом роботи може бути можливість створення лабораторної роботи для вивчення магнітних властивостей феромагнетиків в середовищі моделювання MULTISIM™ for EDUCATION.

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		7

1. ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИМІРЮВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

1.1 Магнітні вимірювання, вимірювання характеристик магнітного поля або магнітних властивостей речовин (матеріалів)

До вимірюваних властивостей магнітного поля належать: вектор магнітної індукції B , напруженість поля H , потік вектора індукції (магнітний потік), градієнт магнітного поля та інші. Магнітний стан речовини визначається: намагніченістю J - величиною отриманого магнітного моменту, виходячи з одиничного об'єму (або маси) речовини; магнітна сприйнятливість χ , магнітна проникність μ , магнітна структура. Найважливіші властивості найбільш поширених магнітних матеріалів - феромагнетиків - включають $B(H)$ індукційні криві та $J(H)$ намагніченість, тобто залежності B і J від напруги поля H , сили примусу, втрати енергії внаслідок інверсії намагніченість, максимальна магнітна енергія на одиницю об'єму (або маси), коефіцієнт намагніченості (коефіцієнт розмагнічування) феромагнітного зразка.

Для вимірювання магнітних характеристик застосовують наступні методи: балістичний, магнітометричний, електродинамічний, індукційний, пондеромоторний, мостовий, потенціометричний, ватметровий, калориметричний, нейтронографічний, резонансний, методи НВЧ-тракту(резонаторний, хвилеводний, коаксіальний) [1].

Балістичний метод включає вимірювання кількості енергії, викликаної в вимірювальній котушці, з швидкою зміною пов'язаного магнітного потоку балістичним гальванометром. Крім балістичного гальванометра, для вимірювання магнітного потоку використовуються вебереметри (флюксметри) - магнітоелектричні та фотоелектричні. Вебереметри можуть вимірювати повільно мінливі струми. Балістичний метод визначає головну криву індукції $B(H)$, криву намагнічення $J(H)$, петлю гістерезису, різні види проникності та розмагнічує коефіцієнт феромагнітних зразків [2].

									Арк.
									8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Використовуючи балістичний гальванометр (рис. 1.1), можна виміряти невелику кількість електричного струму (імпульси струму), що протікає протягом короткого часу – частки секунди. Балістичний гальванометр призначений для вимірювання пульсу. Теорія балістичного гальванометра показує, що якщо прийняти припущення, що після імпульсу струму в обмотці рухомої ходової частини, рухома частина починає рухатися, кількість електричної енергії Q пропорційна першому максимальному відхиленню індикатора αI_m , тобто

$$Q = C_b \cdot \alpha I_m,$$

де C_b — балістична константа гальванометра в причепах шляхом поділу. Слід зазначити, що C_b не залишається незмінним для конкретного гальванометра, а залежить від опору зовнішнього ланцюга. Звичайно, це слід визначати експериментально на основі вимірювань [3].

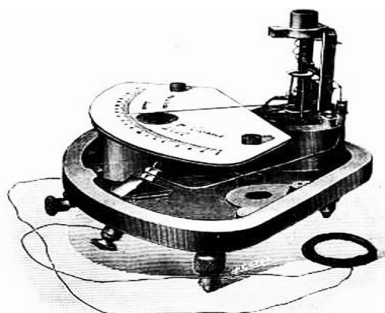


Рис. 1.1. Балістичний гальванометр

Магнітометричний метод заснований на впливі намагніченого тестового зразка на сусідню магнітну голку. Кут відхилення магнітної голки від вихідного положення визначає магнітний момент зразка. Можна також обчислити J , B і H . Метод дозволяє знайти співвідношення B (Н) і J (Н), петлю гістерезису та магнітну сприйнятливність. Через високу чутливість магнітометричного методу його часто використовують для вимірювання магнітного поля Землі та вирішення ряду задач вимірювання.

						ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ	Арк.
							9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Висока точність вимірювання досягається за рахунок правильного калібрування приладів з урахуванням усіх факторів, що впливають на аналіз, постійного контролю за стабільністю пристрою на основі контрольних зразків компанії, калібрування вимірювальних приладів та мінералогічного контролю з використанням магніто-хімічних методів фазового аналізу магнетиту заліза.

Перевага цього методу полягає в тому, що він не вимагає значних витрат часу та матеріальних витрат, а також висококваліфікованого персоналу. Недоліком цього способу є відносно низька точність порівняно з хімічною флуоресценцією та рентгенологічним аналізом. Крім того, цей спосіб можна застосовувати лише для сипучих матеріалів, що містять цінний феромагнітний компонент [4].

Іноді для визначення властивостей магнітного поля використовують електродинамічний метод, особливо в промислових умовах, коли кут повороту котушки вимірюється струмом під впливом магнітного поля намагніченого зразка. Перевагою цього способу є можливість калібрування шкали пристрою безпосередньо в одиницях вимірюваної величини (В або Н).

Методи індукції та зважування застосовуються для випробування феромагнітних речовин у широкому діапазоні значень Н. Індукційний метод дозволяє визначити криві В (Н), J (Н), петлі гістерезису та різні види проникності. Він ґрунтується на вимірюванні ЕРС індукції, яка збуджується у вторинній обмотці, коли змінний струм проходить через первинну обмотку зразка. Цей метод також може бути використаний для вимірювання намагніченості у сильно пульсуючих магнітних полях та магнітної сприйнятливості до діаметру та парамагнітних речовин у високочастотному діапазоні.

Розглянутий метод полягає в вимірюванні механічної сили, що діє на зразок, в неоднорідному магнітному полі. Метод використовується, зокрема, для вивчення магнітних властивостей низькомагнітних речовин. На основі цього методу були створені різні магнітні вимірювальні системи та пристрої:

									Арк.
									10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

маятник, торсійна та магнітна, еластичні кільцеві шкали тощо. Цей метод застосовується також для визначення магнітної сприйнятливості рідин і газів, намагнічування феромагнетиків та магнітної анізотропії.

Переваги: висока точність процесу, що дозволяє використовувати моторні ватметри як приклади; хороші характеристики перевантаження пристрою. Прилади не розчаровують значного перевищення вимірюваної потужності.

Недоліками цього способу є наступні: вага моторних ватметрів має високу чутливість до вібрації та низьку надійність. Необхідність ретельної координації частини шляху передачі електролічильника підвищує вимоги до точності в механічній конструкції. Ці ватметри - вузька смуга, їх вимірювані значення залежать від частоти. Розглянутий метод не застосовується у складних умовах праці [5].

У більшості випадків мостикові та потенціометричні методи визначення магнітних властивостей застосовуються для вимірювання змінних магнітних полів у широкому діапазоні частот. Вони засновані на вимірюванні параметрів (індуктивності L та активного опору r) ланцюга з випробуваними феромагнітними зразками. Ці методи дозволяють визначити співвідношення B (H), J (H), компонентів складної магнітної проникності та складного магнітного опору в змінних полях, а також втрати від інверсії намагніченості.

Мостові вимірювання – методи вимірювання параметрів ланцюгів постійного струму (опору, струму) та змінного струму (активний опір, потужність, індуктивність, взаємна індуктивність, частота, кут втрати, коефіцієнт якості тощо). Використання мостових схем (рис. 1.2) Вимірювання мосту також дуже поширені при вимірюванні електричних неелектричних величин за допомогою датчиків – непрямих перетворювачів вимірюваної величини у функціональному параметрі контуру.

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

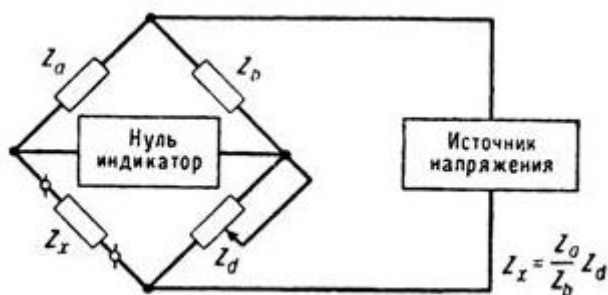


Рис. 1.2. Мостова схема

Вимірювання мосту проводиться за допомогою вимірювань мостів (мостових установок), які відносяться до категорії порівняльних пристроїв. У загальному випадку вони засновані на використанні певних електричних ланцюгів, які складаються з декількох відомих резисторів та одного невідомого (вимірюного) та подаються з одного джерела [6].

Змінюючи відомі опори, ця схема регулюється до тих пір, поки не буде досягнуто певного розподілу напруги в окремих частинах ланцюга. Звичайно, даному співвідношенню напруги також відповідає певне співвідношення опору ланцюга, за допомогою якого можна обчислити невідомий опір, якщо відомі інші носії.

Абсолютним методом вимірювання втрат феромагнітних матеріалів є калориметричний метод, що використовується в широкому частотному діапазоні. Таким чином можна вимірювати втрати відповідно до всіх законів щодо зміни магнітного поля та магнітної індукції, а також у складних умовах розмагнічування. Суть цього методу полягає в тому, що через втрату енергії у зразку під час намагнічування змінне магнітне поле являє собою підвищення температури зразка та його середовища. Калориметричний метод вимірювання проводиться тепловими та дренажними методами.

Методи мікрохвильового тракту (резонатор, хвилевод, коаксіальний) поєднуються з резонансним ефектом сферичного феритового зразка на параметри мікрохвильового тракту для дослідження магнітних властивостей феритів, що використовуються в діапазоні НВЧ [7].

						ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ	Арк.
							12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Магнітна структура ферромагнітних та антиферромагнітних речовин вивчається методом нейтронної дифракції, в основі якого лежить явище магнітного розсіювання нейтронів та результат взаємодії магнітного моменту нейтрона з магнітними моментами частинок речовини.

Методи резонансного випробування включають усі види магнітного резонансу - поглинання змінної польової електромагнітної енергії електронною або ядерною підсистемою речовини. Крім електромагнітної енергії, ці підсистеми можуть також поглинати звукову вібраційну енергію через резонанс – магнітоакустичний парамагнітний резонанс, який також використовується в методах вимірювання.

1.2 Моделювання як метод наукового дослідження

Моделювання в більш широкому розумінні - це особливий пізнавальний процес, метод теоретичного та практичного опосередкованого пізнання, коли суб'єкт вибирає або створює допоміжний йому предмет (модель) замість прямого об'єкта пізнання, перевіряє та передає отриману інформацію реальний предмет. Моделювання - це процес створення та дослідження моделі, а модель – засіб, форма наукового пізнання.

Моделювання - це складне, виснажливе та відповідальне наукове завдання. Іноді тестування моделей є єдино можливим способом експериментального дослідження технологічних процесів. Таким чином, короткочасні процеси можуть бути протестовані на моделях протягом короткого часу. І навпаки, короткочасні процеси вивчалися в моделях протягом більш тривалого періоду часу.

Моделювання різних фізичних процесів базується на схожості спостережуваних явищ. Кажуть, що два явища схожі, якщо властивості одного можна отримати простим обчисленням властивостей іншого. Умовами або критеріями подібності двох явищ є рівність деяких безрозмірних параметрів,

									Арк.
									13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

які називаються числами або критеріями подібності. Визначення критеріїв подібності при моделюванні задіяних процесів вимагає глибокого розуміння механізму цих процесів і є досить складним завданням. Перша група повинна розуміти процеси та явища, які можна описати рівняннями, друга найбільш цікава, процеси та явища, які ще не мають математичного опису. У випадках, коли рівняння досліджуваних процесів невідоме, кількість подібностей можна визначити на основі теорії розмірів.

1.2.1 Опис середовища Comsol Multiphysics

Завдяки COMSOL Multiphysics (рис. 1.3) легко моделювати переважну більшість фізичних процесів, які в свою чергу характеризуються диференціальними рівняннями. Програма COMSOL Multiphysics включає цілий спектр алгоритмів і систем, за допомогою яких можна керувати складними завданнями. Простота структури програми забезпечує зручність роботи та гнучкість. Слід також зазначити, що програма забезпечує практичне, ефективне та універсальне середовище для моделювання фізичних процесів. Завдяки інтегрованим моделям, які можна налаштувати та змінити, програма може «імітувати» практично будь-яку комбінацію фізичних медіа та полів. Програма є своєрідним середовищем для детального вирішення науково-технічних задач, що базуються на диференціальних рівняннях та інших математичних принципах [8].

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

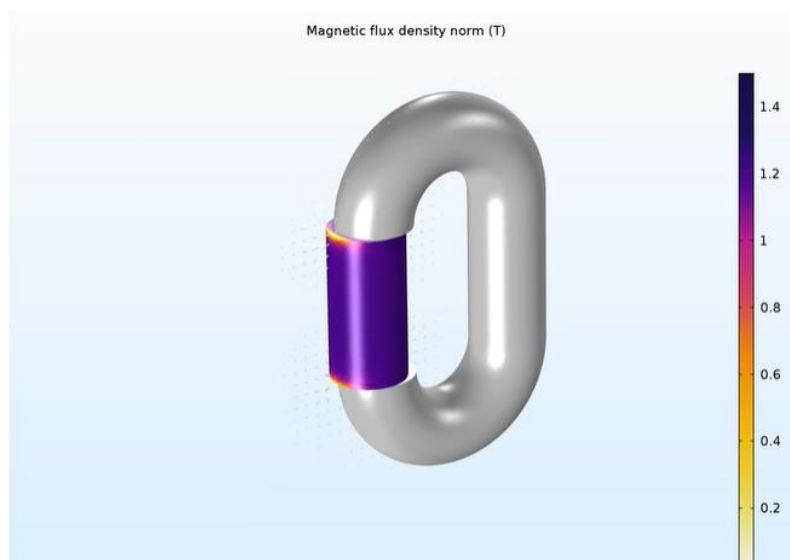


Рис. 1.3. Середовище Comsol Multiphysics

COMSOL - потужне інтерактивне середовище (рис. 1.4.) для моделювання та вирішення науково-технічних задач на основі диференціальних рівнянь у часткових похідних. Серед програм це сприяє розробці та розширенню моделі, яка є частиною пакету, також можливе переміщення до інших фізичних областей, і статус моделі змінюється стосовно різних галузей науки та техніки. Ефективний та функціональний інтерфейс програми не вимагає поглиблених знань користувачів у галузі математики та чисельного аналізу. Як результат, можна побудувати продуктивні моделі, вказавши лише фізичні величини, не приділяючи особливої уваги описаному рівнянню.

Програмний пакет може приймати завдання на окремі значення та частоти в основній формі (для нелінійних моделей) у вигляді проекцій (переважно для моделей з просторовими та часовими змінними). Можливо також створення стаціонарних (від часу незалежних) та нестабільних, лінійних та нелінійних моделей. Програмне забезпечення активно використовує вищезазначені методи, враховуючи дрібниці та перевіряючи помилки при роботі із призначеними змінними [9].

									Арк.
									15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

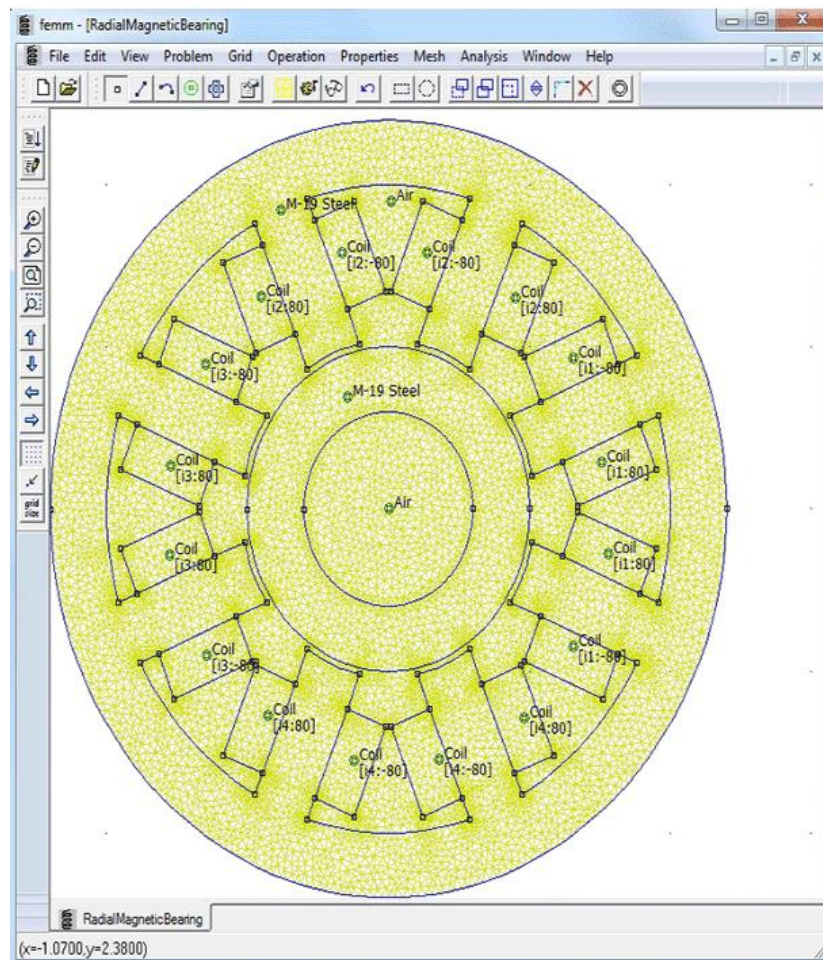


Рис. 1.5. Середовище Femm

Робота з пакетом при розробці нової моделі починається з запуску препроцесора. Перший етап - геометричні побудови досліджуваних об'єктів у полярних або декартових координатах. Геометрію об'єкта також можна імпортувати з сторонніх графічних пакетів, таких як CorelDraw або AutoCAD. Другий етап - завдання для частин / блоків об'єктних властивостей матеріалів. Потім запускається автоматична робота програми, обчислюються параметри моделі та створюється сітка з кінцевими елементами. Після обчислень запускається постпроцесор і створюються зонні зображення полів: для стаціонарного магнітного поля - лінії магнітного потоку, для квазістаціонарних - лінії фактичного значення векторного магнітного потенціалу. Параметри поля можна переглядати в будь-якій точці регіону та в певних районах, щоб оцінити

									Арк.
									17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

кількість інтегральних величин: магнітні потоки, індуктори, магнітні напруги тощо.

Інші функції програми включають наявність спинки / скидання, можливість вибору одиниць (дюймів або міліметрів), побудови графіку ряду змінних (модуль магнітної індукції, модуль векторного потенціалу, модуль напруженості магнітного поля тощо). Окрім інтерактивних обчислень, програма FEMM має пакетний режим. Алгоритмічна мова Lua використовується для запису програм, які працюють у пакетному режимі. Позитивною стороною пакетного режиму є можливість формувати, аналізувати та змінювати геометрію обчислювальної області, організовувати оцінку та виведення результатів, а також вводити необхідні математичні вирази та рівняння [10].

1.2.3 Опис середовища Elcut

ELCUT - це інтегрована діалогова система програм (рис. 1.6), що дозволяє вирішувати плоскі і осесиметричні завдання наступних типів:

- Розрахунок електричного поля:
- Електричне поле;
- Електричне поле постійних струмів;
- Електричне поле змінних струмів;
- Нестаціонарне електричне поле;
- Розрахунок магнітного поля:
- Магнітостатичне поле;
- Магнітне поле змінних струмів (з урахуванням вихрових струмів);
- Магнітне нестаціонарне поле (з урахуванням вихрових струмів і нелінійних матеріалів);
- Завдання теплопередачі (розрахунок температурного поля):

									Арк.
									18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

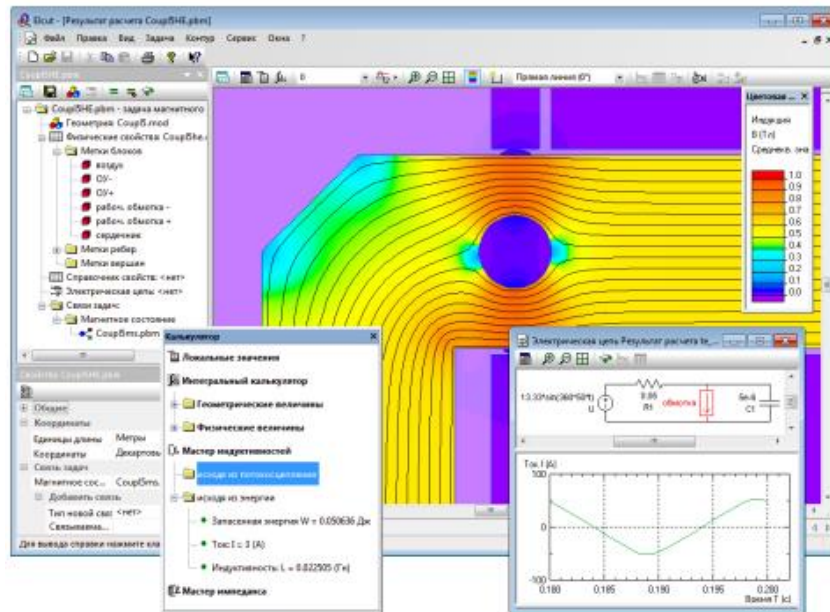


Рис. 1.6. Середовище Elcut

1.2.4 Описание среды Ansys Maxwell

ANSYS Maxwell - це сучасне високоефективне програмне забезпечення для моделювання двовимірних та тривимірних електромагнітних полів (рис. 1.7), яке використовується для аналізу моделей двигунів, датчиків, трансформаторів та багатьох інших електричних та електромеханічних пристроїв для різних застосувань. Математичною основою методу ANSYS Maxwell є метод кінцевих елементів, завданням якого є пошук єдиного можливого розподілу електромагнітного поля в заданій обчислювальній області за даних граничних умов і порушень.

									Арк.
									20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ				

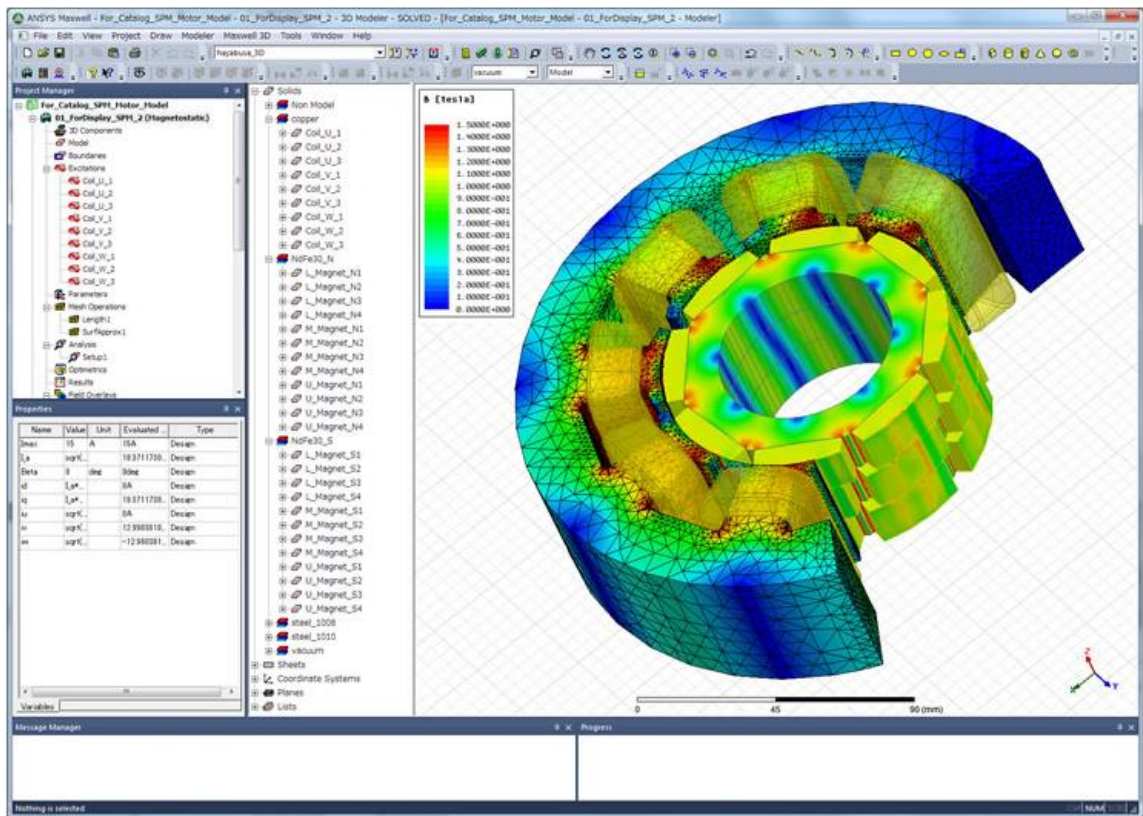


Рис. 1.8. Серовище ANSYS Maxwell з панеллю керування

ANSYS Maxwell використовується для розробки різних електромеханічних компонентів в електричній, автомобільній, оборонній та авіаційній галузях. Робота з віртуальними моделями замість дорогих масштабних експериментів, звичайно, економічно доцільна. Електромеханічні двигуни та генератори, поступальні та обертові електромагніти, реле, мікроелектромеханічні пристрої MEMS. Індукційні котушки електромагніту, постійні магніти, датчики, кабелі. Силова електроніка: трансформаторні технології, перетворювачі, шини, IGBT та багато інших пристроїв. Поведінка електромагнітних полів: випробовування екранування, електростатичні проблеми, електромагнітна сумісність, напівпровідники, бездротова передача енергії. Міжпредметні завдання: магнітне змішування, індукційний нагрівання, вібраційний аналіз та акустика в електричних машинах.

ANSYS Maxwell оснащений інтегрованим графічним редактором, функціональність якого повністю відповідає вимогам користувача при

									Арк.
									22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

підготовці моделі до розрахунків. Можливий імпорт геометричних моделей CAD з усіх сучасних пакетів 3D-моделювання [12-13].

1.2.5 Моделювання матеріалів за допомогою програмного забезпечення електронної структури ab initio (CASTEP)

CASTEP - це комп'ютерний код, який використовується для розробки нових матеріалів у хімічній, фармацевтичній, напівпровідниковій, автомобільній та аерокосмічній галузях. Дослідження в Йорку гарантують, що код зберігає свою передову перевагу для розрахунку властивостей матеріалів за першими принципами.

CASTEP - це надійний і потужний код моделювання матеріалів, побудований на основі квантової механіки у формулі функціональної теорії щільності (DFT). CASTEP використовує DFT для імітації фізичних, хімічних та електронних властивостей нових та існуючих матеріалів (рис. 1.9).

Квантово-механічна точність цього підходу дозволяє передбачити безліч експериментальних властивостей багатьох матеріально-хімічних властивостей, забезпечуючи розуміння фізичних явищ навіть у екстремальних умовах, які неможливо повторити в лабораторії.

CASTEP широко застосовується в хімічній, фармацевтичній, напівпровідниковій, автомобільній та аерокосмічній промисловості. Але для збереження лідируючої позиції на ринку код повинен постійно розвиватися.

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

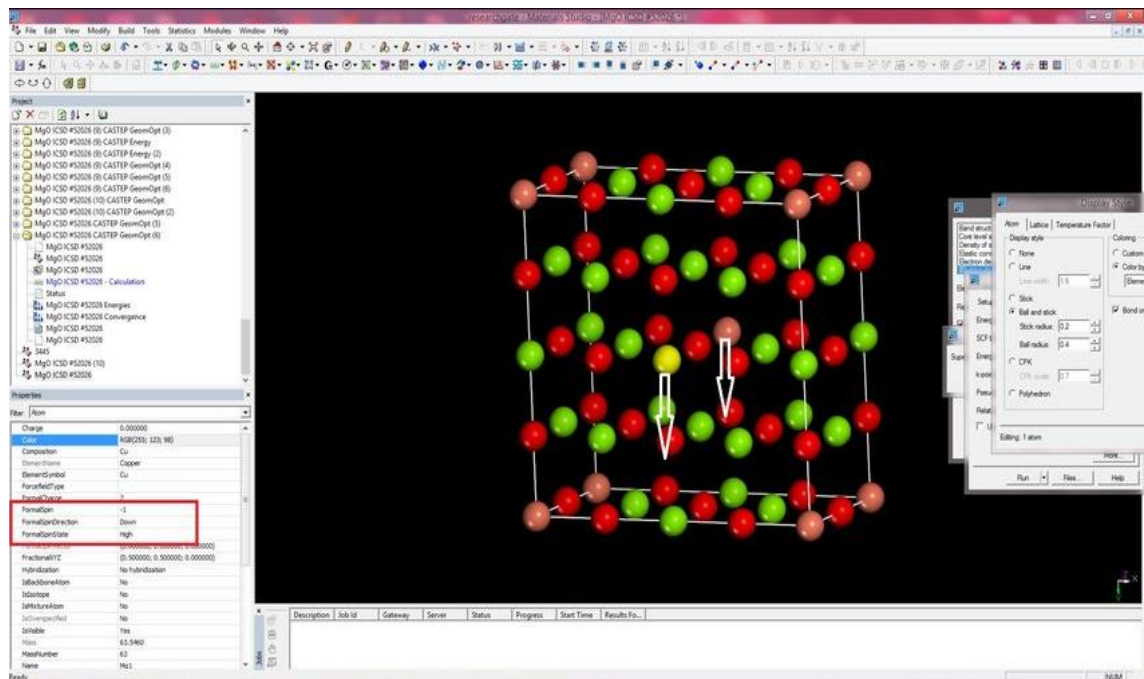


Рис. 1.9. Середовище CASTEP

Дослідження в Йорку лежать в основі більш вдосконаленої функціональності CASTEP, такого як обчислення структури електронної смуги, фононної дисперсії та багатьох експериментально важливих спектрів, таких як:

- Ядерно-магнітний резонанс (ЯМР);
- Електронний парамагнітний резонанс (ЕПР);
- Електронна спектроскопія втрат енергії (EELS);
- Раманівська спектроскопія.

Йоркська команда розробила нові алгоритми та функціональні можливості, включаючи спіно-орбітальне з'єднання, вдосконалене моделювання багатьох корпусів ван дер Ваальса та електронно-фононне зчеплення. Команда також здійснила значні технічні розробки, включаючи гібридний паралелізм OpenMP-MPI та перенесення архітектур ARM, GPU та Intel MIC [14].

Висновок

У даному розділі було розглянуто дослідження параметрів феромагнетиків шляхом вимірювання і моделювання. Показано, що більшість з методів вимірювання не дають достатньої кількості даних про досліджуваний елемент. Перевагою можна відзначити роботу з справжнім зразком з усіма можливими відхиленнями.

Також, було зроблено висновок, що дослідження феромагнетика моделюванням значно простіший і менш затратний по ресурсах метод. Було проаналізовано, що сучасні програми дозволяють проводити досить швидко моделювання, вимірювання та аналіз досліджених параметрів зразка.

Показано, що перелічені середовища моделювання фізичних процесів є потужними програмами і як способи розрахунку та візуального відображення фізичної моделі для ефективного використання часу. Основними відмінностями між даними програмами є факт, що одні з них моделюють в 2D, інші в 3D.

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						25
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

National Instruments Multisim у поєднанні з середовищем програмування вимірювальної системи LabVIEW дозволяє безпосередньо порівнювати теоретичні дані з реальними даними, створюючи при цьому традиційні друковані плати зі зменшеною кількістю ітерацій проекту, кількістю помилок у прототипах та прискорення впровадження продукції на ринок. Завдяки Multisim можливо інтерактивно створювати схеми підключення та імітувати їхні режими роботи. База даних компонентів містить понад 1200 моделей SPICE від провідних виробників, таких як Analog Devices, Linear Technology і Texas Instruments, а також понад 100 нових моделей комутаційних джерел живлення. Крім того, Convergence Assistant показаний у новій версії програмного забезпечення, яка автоматично виправляє параметри SPICE та виправляє помилки моделювання. Додано підтримку стандартних моделей MOS-транзисторів BSIM4 та розширені можливості відображення та аналізу даних, включаючи новий зонд для поточних значень та оновлені статичні зонди для диференціальних вимірювань [15].

2.1 Введення схеми

Введення схеми - перший крок у її розвитку. У цей момент вибираються необхідні компоненти, розміщуються в потрібному місці з правильною орієнтацією в робочій області проекту, з'єднуються між собою, а решта необхідної розробки реалізується. Завдяки Multisim ви можете змінювати параметри компонентів, вирівнювати схему вздовж сітки, додавати текст і буфери, додавати схеми та рейки та керувати кольором фону, компонентами та з'єднаннями. Можна одночасно відкрити кілька діаграм, кожна з яких відображається в окремому вікні програми. За допомогою браузера компонентів виберіть елементи з бази даних та розмістити їх на схемі. Елементи організовані в базі даних, групі та моделі (наприклад, Master, Database, Digital group, TTL Family). Для звуження списку пошуку

									Арк.
									27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ

пропонуються фільтри відповідно до діапазону значень та допусків, в яких вони можуть бути використані (рис. 2.2). Перед відкриттям клавіатури можна ввести кілька літер, щоб перейти до потрібного компонента. Завдяки налаштуванням ви можете шукати елементи у всіх базах даних за загальною схемою пошуку.

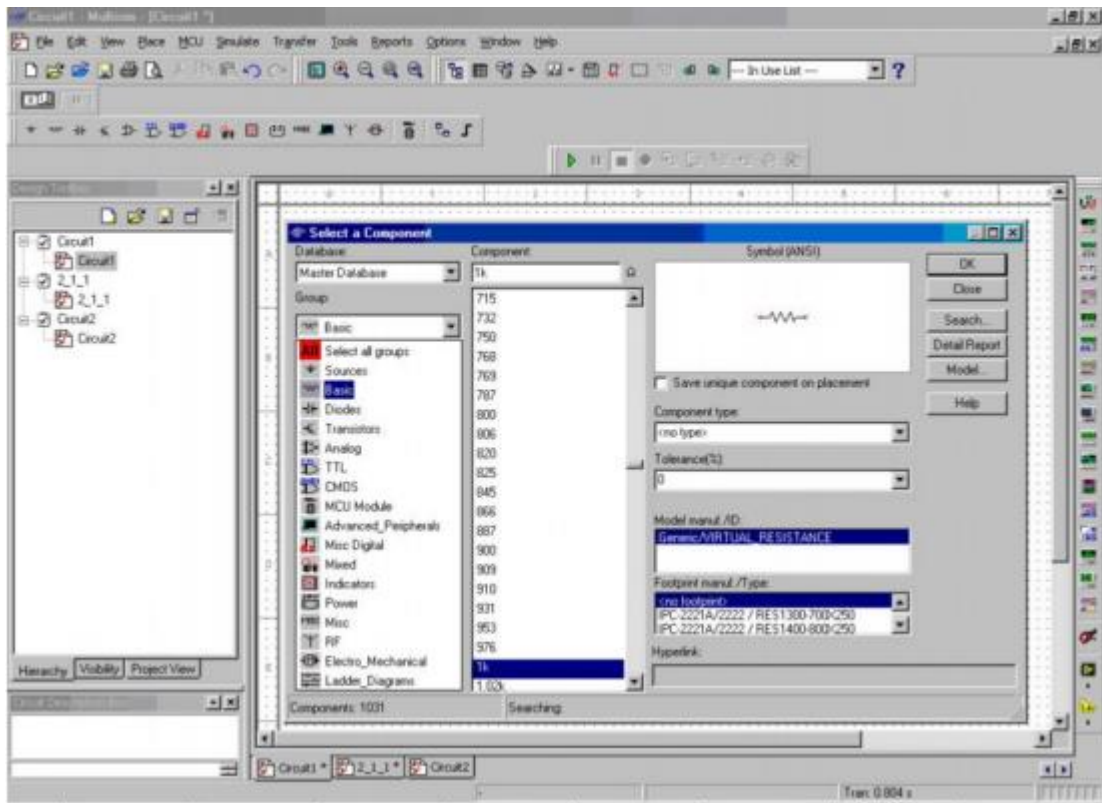


Рисунок 2.2 Список пошуку компонентів

2.2 Структура бази даних компонентів

База даних компонентів Multisim призначена для підтримки інформації, необхідної для опису будь-якого компонента. Він містить все необхідне для введення схем, моделювання (моделей) та друкованих схем, та всю іншу База даних компонентів Multisim підтримує інформацію, необхідну для опису компонента. Він містить все необхідне для вхідних схем, моделювання (моделей) та схеми друкованих схем, а також всю іншу електричну інформацію. Multisim підтримує три рівні бази даних. Основна база даних лише для читання

										Арк.
										28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

містить компоненти, надані Electronics Workbench. User Database - це база даних індивідуального користувача. Використовується для компонентів, які були створені індивідуально і не призначені для загального використання. Corporate Database - використовується для зберігання спеціальних компонентів для загального використання в організації. Для переміщення компонентів між базами даних, підключення та зміни баз даних доступні різні сервісні інструменти. Всі бази даних поділяються на групи, а потім на сім'ї цих груп.

Кожен компонент, розміщений у вікні схеми, має ряд властивостей, які керують деякими його аспектами та зберігаються в базі даних Multisim. Ці властивості стосуються лише компонентів, розміщених на інших діаграмах або в інших місцях цієї діаграми, а не до інших прикладів цього компонента. Залежно від типу компонента, ці властивості задають одне або всі наступні властивості:

- ідентифікаційна інформація і етикетки розміщеного компоненту, котрі відображаються у вікні схеми;
- модель розміщеного компоненту;
- для декількох компонентів, як розміщені компоненти будуть використовуватися при аналізі;
- значення або модель і цоколевка компонента;
- користувацьке поле.

У Multisim можливо редагувати компоненти (рис. 2.3), використовуючи такі методи:

- Component Wizard – використовується для створення і редагування нових компонентів;
- Діалогове вікно Component Properties – використовується для редагування існуючих компонентів і доступне з діалогового вікна Database Manager.

						<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	Арк.
							29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Коли користувач вибирає компонент із бази даних та вставляє його у схему, компонент копіюється для вставки у схему. Зміни компонента на діаграмі не відображаються в оригіналі в базі даних або в тих самих компонентах, які раніше були розміщені на діаграмі. Так само будь-яка зміна компонента, внесеного в базу даних після вставки копії в діаграму, не впливає на раніше розміщені компоненти, а лише на ті, які вставляються після зміни. Після збереження схеми інформація про компоненти зберігається в ній. Під час завантаження користувач може завантажувати всі частини в незмінному вигляді або робити копії для зберігання в базі даних користувача або компанії, або компоненти з однаковою назвою з останніми оновленими значеннями з бази даних.

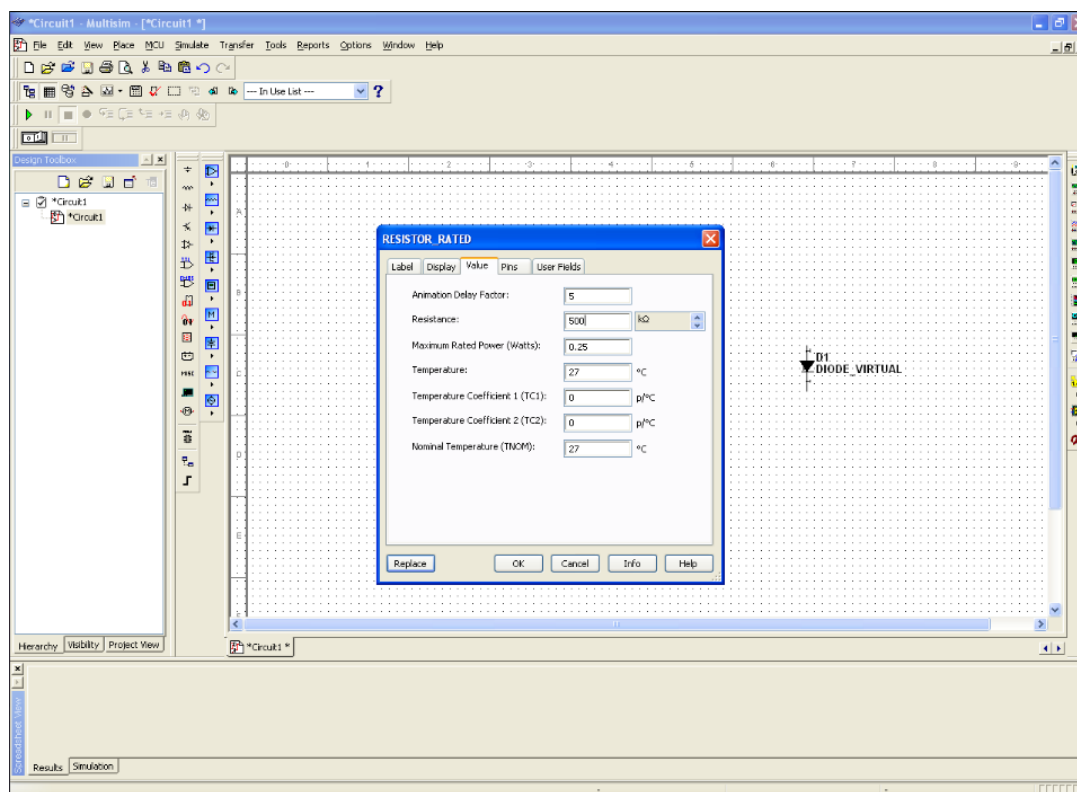


Рисунок 2.3 Редагування компонента

В Multisim можливо редагувати компоненти, використовуючи наступні методи:

									Арк.
									30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

- Модифікувати заголовки призначених для користувача полів в будь-якій базі даних;
- Додавати і змінювати іконки сімейств.

2.3 Загальні правила моделювання

Наступні загальні правила слід враховувати при проектуванні систем:

1. Будь-яка схема повинна обов'язково містити хоча б один символ заземлення.
2. Будь-які два кінця провідника або контакту пристрою, зустрічаються в точці, завжди вважаються з'єднаними. При з'єднанні трьох-решт (Т-з'єднання) необхідно використовувати символ з'єднання (Вузол). Ті ж правила застосовуються при з'єднанні чотирьох і більше контактів.
3. У схемах повинні бути присутніми джерела сигналу (струму або напруження), що забезпечують вхідний сигнал, і не менше однієї контрольної точки (за винятком аналізу схем постійного струму) [16].

Топологія схем:

1. У схемі не повинні бути присутніми контури з котушок індуктивності і джерел напруги.
2. Джерела струму не повинні з'єднуватися послідовно.
3. Не повинно бути присутнім короткозамкнених котушок.

Джерело напруги необхідно підключити до котушки індуктивності і до трансформатора через резистор, підключений послідовно. Резистор повинен бути підключений паралельно конденсатору, підключеному до джерела живлення.

2.4 Симуляція

									Арк.
									32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ				

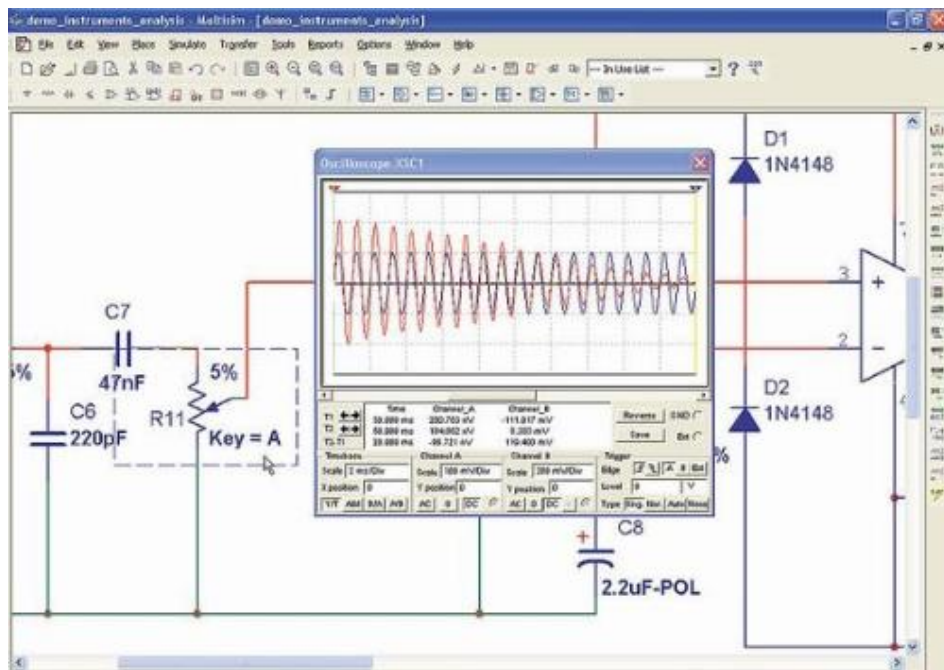


Рис 2.4 Приклад роботи в середовищі.

Multisim пропонує достатню кількість віртуальних приладів, які можна використовувати для вимірювання та тестування поведінки ланцюга. Ці інструменти встановлюються, використовуються та відображаються як фактичні еквіваленти. Використання віртуальних інструментів - це найпростіший спосіб перевірити поведінку схеми та відобразити результати моделювання. Окрім стандартних інструментів в Multisim, є можливість створити власний за допомогою LabVIEW - графічного середовища для створення гнучких та масштабованих стендів, лічильників та керуючих програм. Існує два типи віртуальних інструментів: значок інструмента, який підключається до ланцюга, і панель інструментів, на якій визначаються параметри інструменту. Наявна можливість показати або приховати панель інструментів, двічі клацнувши відповідну піктограму. Панелі інструментів завжди над основним робочим простором, тому вони не приховані. Панель управління можливо розмістити де завгодно на робочому полі. Після збереження маршруту положення панелі інструментів та стан приховування чи показу зберігаються на маршруті. Усі дані, отримані пристроєм, також зберігаються до деякого максимального розміру.

2.5 Аналіз

Multisim пропонує безліч способів аналізу даних емуляції, від найпростіших до найскладніших, включаючи найбільш вкладені. Основні типи аналізу:

1. DC - аналіз ланцюга на постійному струмі. Аналіз ланцюгів на постійному струмі здійснюється для резистивних схем. Це правило слід безпосередньо з теорії електричних ланцюгів; при аналізі на постійному струмі конденсатори замінюють розривом, котушки індуктивності - коротким замиканням, нелінійні компоненти, такі як діоди і транзистори, замінюють їх опором постійному струму в робочій точці. Аналіз ланцюга на постійному струмі виявляє вузлові потенціали досліджуваної схеми
2. AC - аналіз ланцюга на змінному струмі. Аналіз ланцюгів на змінному струмі полягає в побудові частотних характеристик.
3. Transient - аналіз перехідних процесів. Аналіз перехідних процесів в ланцюгах дозволяє визначити форму вихідного сигналу, тобто побудувати графік сигналу як функції часу.

Окрім інтегрованих функцій аналізу, можна вказати свою функцію за допомогою команд SPICE. Щоб використовувати сканування, потрібно дотримуватися основних інструкцій доступу та розпочати сканування, описане нижче. Кожен аналіз також має конкретні параметри, які можна визначити:

- параметри аналізу (всі мають попередньо налаштовані);
- як вихідні змінні будуть підтримані (необхідно);
- заголовок аналізу (вибірково);
- змінні для опцій аналізу (вибірково).

Параметри аналізу зберігаються разом зі схемою.

									Арк.
									35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Щоб підготуватися до аналізу, потрібно налаштувати його параметри, наприклад В. частотний діапазон аналізатора змінного струму (AC analysis). Також потрібно вибрати вихідні канали (traces). Плоттер (Grapher) - основний інструмент для перегляду результатів емуляції. Відкривається через меню View / Grapher та автоматично після початку емуляції. Багато налаштувань плоттера можна знайти у вікні властивостей. Наприклад, можна змінювати масштаби, діапазони, заголовки, стилі ліній осі [16].

Multisim пропонує численні аналізи, які використовують симуляцію для отримання даних для аналізів, які потрібно виконати. Ці сканування можуть варіюватися від найпростішого до найелегантнішого і часто вимагають, щоб одне сканування (автоматично) було виконане як частина іншого (рис. 2.5). Для кожного аналізу потрібно визначити, який параметр слід запустити, щоб сказати Multisim, що повинен робити аналіз. Окрім аналізів, підтримуваних Multisim, ви можете створювати власні аналізи на основі введених команд SPICE. Якщо ви активуєте аналіз, результати будуть відображатися на малюнках Multisim Grapher, поки не буде визначено інший і не буде збережено для використання в постпроцесорі [16].

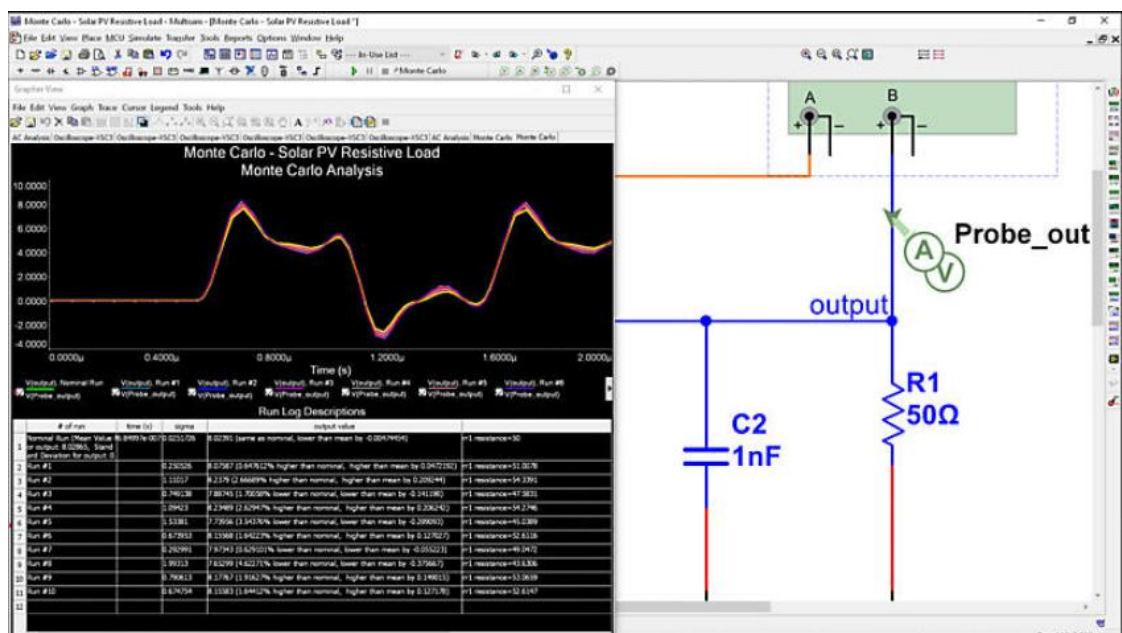


Рис 2.5 Отримання та аналіз даних

Висновок

Середовище моделювання Multisim відрізняється від розглянутих програм моделювання тим, що призначений для симуляції конкретно електричних ланцюгів. Побудова схеми та запуск симуляції дозволяє швидко дослідити схему без реального збору необхідних компонентів, що дозволяє значно заощадити час і ресурси, а також дає широкий набір інструментів для вимірювань і дослідження багатьох необхідних властивостей. З даним середовищем моделювання доцільно створювати лабораторні роботи, практикуми, в тому числі і для студентів, напрямленні на дослідження схем різного призначення. В тому числі, і дослідження компонентів з феромагнетиками.

3. ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ В СЕРЕДОВИЩІ MULTISIM

3.1 Дослідження трансформатора

3.1.1 Призначення, пристрій і розрахункові формули

Трансформатор - статичний електромагнітний пристрій, призначений для перетворення змінного струму однієї напруги на змінний струм іншої напруги тієї ж частоти.

Трансформатори часто використовуються для передачі та розподілу електроенергії, для різних технологічних цілей та для живлення різних мікросхем радіо, електронного комп'ютерного та телевізійного обладнання, засобів зв'язку, автоматики, телемеханіки тощо.

									Арк.
									37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Трансформатори мають широке застосування для передачі і розподілу електричної енергії, для різноманітних технологічних цілей і живлення різних ланцюгів радіо-, електронно-обчислювальної і телевізійної апаратури, пристроїв зв'язку, автоматики, телемеханіки і т. д.

Існує два типи трансформаторів: трансформатори, які знижують напругу, наприклад, до 400 В або менше, і підвищують напругу до 3500 кВ і більше. Існують однофазні, трифазні та багатофазні, дво-, три- та багатомоточні трансформатори. Діапазони електричних масляних трансформаторів загального користування від 10 кВ·Ф до 630 МВА при напрузі (первинна) 10, 35, 110, 220, 330, 500, 750 і 1150 кВ, суха версія - від блоків VGA до 2500 кВ·А Первинна напруга 380, 500, 660, 10000 В і вторинне - 230 і 400 В. Силкові трансформатори однофазні, ємністю 4 кВ·А і нижче, а трифазні - підтримують 5 кВ·А і нижче, класифікуються як низькі -силкові трансформатори. Такі трансформатори широко застосовуються в перетворювачах, побутовій техніці, електронних та електронних комп'ютерних пристроях.

Наряду з силовою і практичною електротехнікою широко застосовують вимірювальні трансформатори струму і напруги [18].

При підключенні первинної обмотки $A-X$ силового трансформатору до мережі первинний струм i_1 проходячи по її виткам w_1 , активує в сердечнику синусоїдальний магнітний потік

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t),$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота напруги живлення u_1 (рис. 3.1). Цей потік, пронизуючи витки w_1 первинної обмотки і витки w_2 вторинної обмоток, наводить в них ЕРС:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

або (для дійсних значень)

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m,$$

									Арк.
									38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

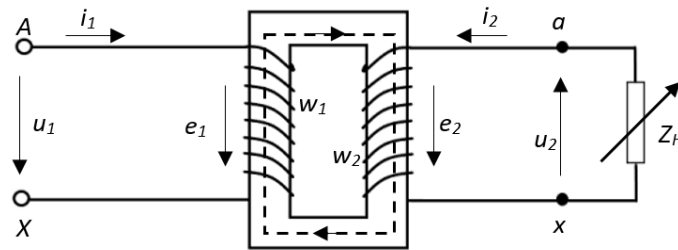


Рис. 3.1. Схема електричного ланцюга з трансформатором

З вторинної обмотки $a-x$ знімається напруга u_2 , котре подається до споживача електричної енергії Z_n .

Струм з первинної обмотки трансформатора при відключеному навантаженні ($Z_n = \infty$) являється струмом холостого ходу I_0 . Його виражають у відсотках по відношенню до номінального первинного значення струму I_{1H} , тобто:

$$i_0(\%) = 100 \frac{I_0}{I_{1H}}.$$

Струм холостого ходу $i_0(\%)$ в силових трансформаторах складає 2-5%, а в малопотужних трансформаторах може становити 20-50% номінального струму I_{1H} .

Відношення ЕРС первинної обмотки трансформатора до ЕРС вторинної його обмотки, рівне відношенню відповідних чисел витків обмоток, називають коефіцієнтом трансформації трансформатора

$$n = E_1 / E_2 = w_1 / w_2.$$

3.1.2 Визначення параметрів трансформатора

Для визначення коефіцієнта трансформації n , а також параметрів схеми заміщення (рис. 3.2) і втрат потужності в трансформаторі проводять

									Арк.
									39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

дослідження холостого ходу (дослід ХХ) і дослід короткого замикання (КЗ) трансформатора.

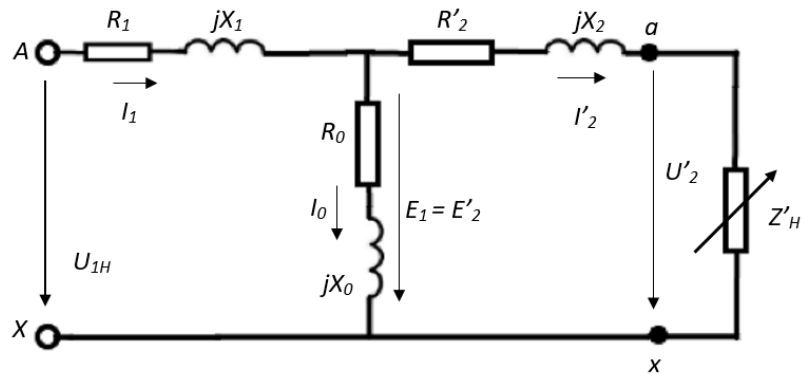


Рис. 3.2. Схема заміщення трансформатора

На рис. 3.2 позначено:

- R_1 і X_1 – активний і індуктивний опір первинної обмоток;
- R'_2 і X'_2 – приведені до числа витків первинної обмотки активного і індуктивного опору вторинної обмотки:

$$R'_2 = n^2 R_2,$$

$$X'_2 = n^2 X_2;$$

- R_0 – активний опір намагнічуваної гілки, обумовлений втратами потужності в сталевому магнітопроводі;
- X_0 – індуктивний опір намагнічуваної гілки, обумовлений основним магнітним потоком;
- Z'_H – приведена до числа витків первинної обмотки опір навантаження:

$$Z'_H = n^2 Z_H;$$

- U'_2 і I'_2 – приведені до числа витків первинної обмотки вторинна напруга і вторинний струм:

$$U'_2 = n U_2,$$

$$I'_2 = I_2 / n.$$

При досліді ХХ до первинної обмотки трансформатора відводиться номінальна напруга (рис. 3.3)

$$U_1 = -E_1 + Z_1 I_0,$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1,$$

де Z_1 – повний опір первинної обмотки.

При цьому вторинна обмотка розімкнута ($I_2 = 0$) і напруга на її зажимах

$$U_1 = U_{20} = E_2.$$

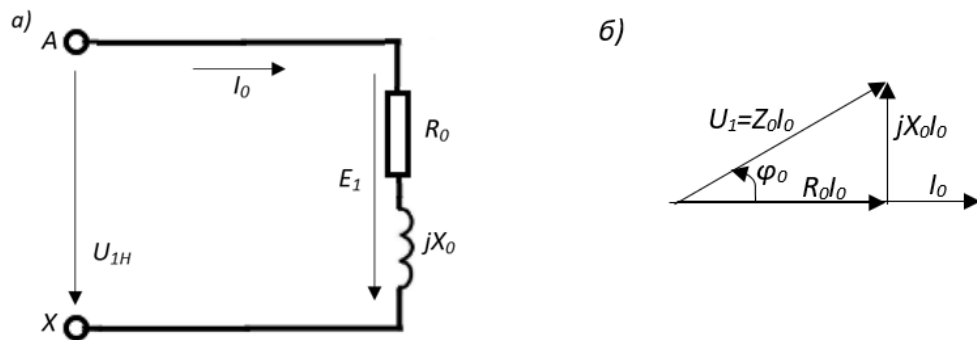


Рис. 3.3. Спрощена схема заміщення дослідів холостого ходу трансформатора (а) та векторна діаграма (б)

Вимірявши напругу U_{20} , струм I_0 і активну потужність P_x і нехтуючи падінням напруги на первинній обмотці $Z_1 I_0$ (з огляду на його невелике значення в порівнянні з ЕРС E_1), тобто користуючись спрощеною схемою заміщення трансформатора при ХХ (на рис. 3.3а і 3.3б), визначають:

- коефіцієнт трансформації

$$n = E_1 / E_2 \approx U_{1H} / U_{20};$$

- параметри намагнічуваної гілки схеми заміщення трансформатора

$$Z_0 = U_1 / I_0,$$

					ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_0 = P_x / I_0^2,$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

- втрати потужності при ХХ, називається втратами в сталі P_0 , котрі витрачаються в основному на нагрів магнітопроводу від впливу вихрових струмів і циклічного перемагнічування сталі, тобто $P_0 \approx P_x$.

При досліді КЗ (рис. 3.4), на відмінну від небезпечного аварійного короткого замикання трансформатора, що виникає випадково при роботі при напрузі $U_1 = U_{1H}$, до первинної обмотки підводять таку понижену напругу $U_1 = U_K$ (менша напруга U_{1H} в 8-20 раз в залежності від типу і потужності трансформатора), при якому в його обмотках встановлюються струми, рівні відповідним значенням:

$$I_1 = S_H / U_1,$$

$$I_{2H} = S_H / U_{2H} \approx n I_{1H},$$

де S_H – номінальна потужність трансформатора.

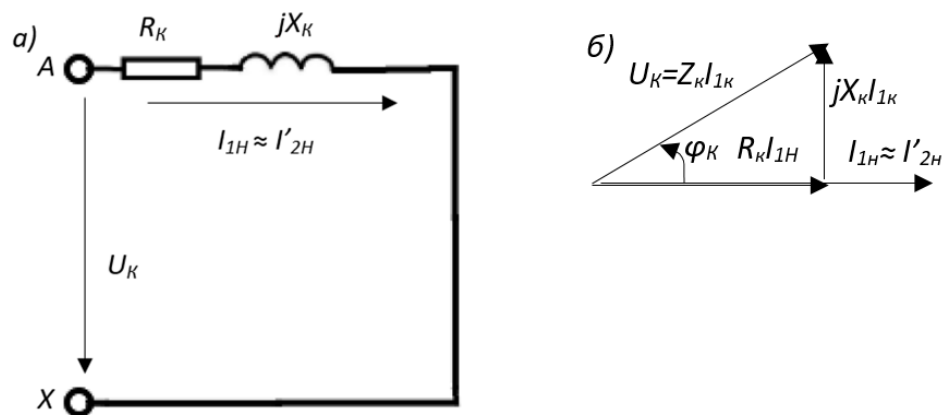


Рис. 3.4. Спрощена схема заміщення досліді короткого замикання трансформатора (а) та векторна діаграма (б)

З огляду на малість магнітного потоку Φ (пропорційно пониженій напрузі U_K) при досліді КЗ і відповідно втрат в сталі (які пропорційні магнітному

						ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ	Арк.
							42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

поток в квадрате, тобто Φ^2) активна потужність, що споживається трансформатором з мережі, іде в основному на нагрів обмоток, тобто рівна електричним втратам (котрі називаються втратами в міді P_M) в провідниках обмоток:

$$P_K \approx P_M = R_1 I_{1H}^2 + R_2 I_{2H}^2 \approx (R_1 + R_2') I_{1H}^2 = R_K I_{1H}^2.$$

Вимірявши напругу U_K , струм I_{1H} і активну потужність P_K , визначають:

- параметри схеми заміщення при КЗ трансформатора (користуючись схемою заміщення, рис. 3.4а):

$$Z_K = U_K / I_{1H},$$

$$R_K = P_K / I_{1H}^2,$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

де Z_K , R_K і X_K – відповідно повний, активний і реактивний опір КЗ трансформатора:

$$Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2},$$

$$R_K = R_1 + R_2',$$

$$X_K = X_1 + X_2';$$

- напруга КЗ (Рис. 3.4б), виражене у відсотках:

$$u_K(\%) = 100 U_K / U_{1H};$$

- втрати потужності при КЗ трансформатора (втрати в міді):

$$P_K \approx P_M.$$

3.1.3 Зовнішні характеристики трансформатора

					ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежність напруги на затискачах вторинної обмотки при змінюваному навантаженні від струму навантаження, тобто $U_2 = f(I_2)$, носить назву зовнішні характеристики трансформатора (рис. 3.5).

Вторинне навантаження дорівнює:

$$U_2' = E_2' - Z_2' I_2',$$

або

$$U_2 = E_2 - Z_2 I_2 = E_2 - (R_2 + jX_2) I_2 \approx U_{20} - Z_2 I_2,$$

при збільшенні струму навантаження зменшується як за рахунок падіння напруги $Z_2 I_2$ на його вторинній обмотці, так і за рахунок зменшення ЕРС E_2 (внаслідок деякого зменшення магнітного потоку Φ при відповідному збільшенні струму I_1). Але при активно-ємнішому навантаженні при збільшенні струму напруга U_2 збільшуватиметься.

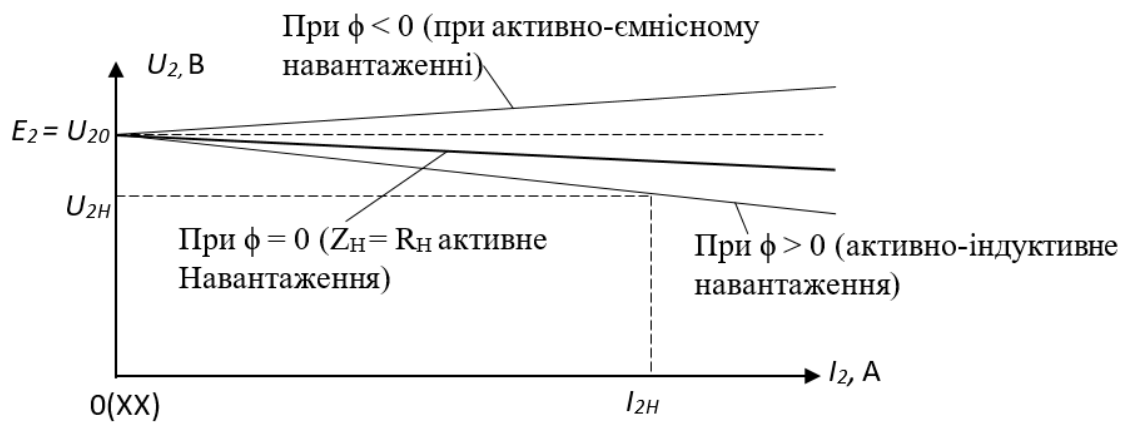


Рис 3.5. Графік зовнішньої характеристики трансформатора

Зовнішні характеристики можуть бути розраховані і побудовані, виходячи з паспортних даних трансформатора, а також шляхом прямого вимірювання напруги U_2 і струму I_2 при зміні навантаження Z_H [18].

									Арк.
									44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

3.1.4 Моделювання трансформатора в середовищі

В бібліотеці програмного середовища Multisim наявна модель однофазного трансформатора (Nonlinear Transformer Virtual). Після розміщення на робочому полі і подвійного кліку на його зображення відкривається діалогове вікно (рис. 3.6.)

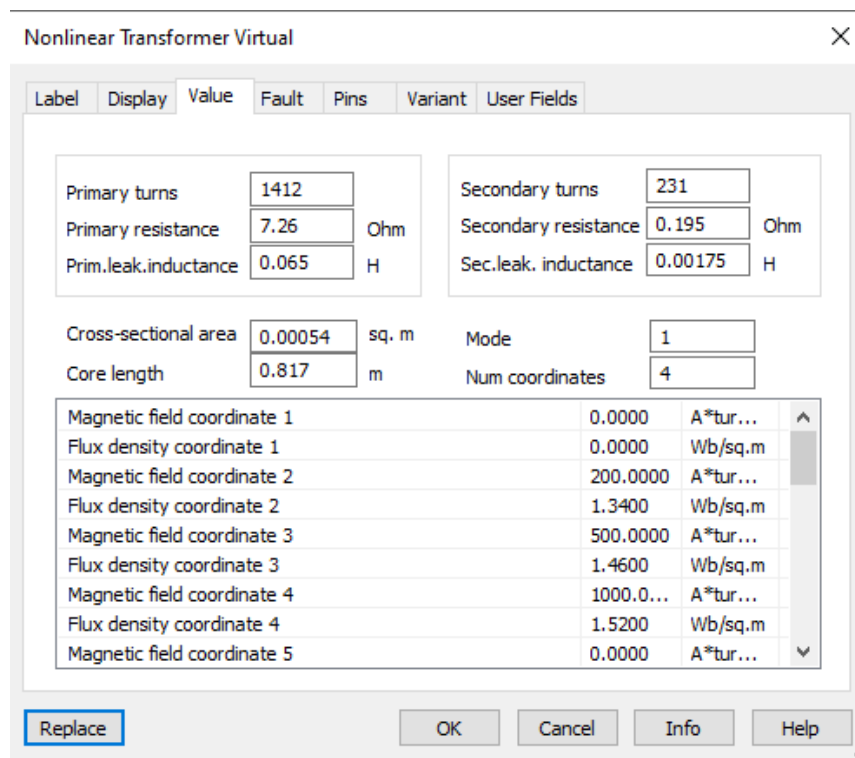


Рис. 3.6. Діалогове вікно параметрів трансформатора

Вибравши тип трансформатора (табл. 3.1), потрібно розрахувати і ввести в поля діалогового вікна параметри трансформатора, а також 4...8 координатних точок кривої намагнічування $B(H)$ матеріалу сердечника (наприклад, чотири координатні точки для холоднокатаної сталі 3411), а саме:

- число витків первинної обмотки (Primary turns):

$$w_1 = U_{1H} / (4,44 f B_M S_M),$$

$$S_M \approx k \cdot 0,8d^2,$$

де S_M – площа поперечного перерізу сердечника (Cross-sectional area); $f = 50$ Гц – частота напруги мережі; $B_M = 1,3$ Тл – рекомендаційна магнітна індукція в магнітопроводі (при потужності $S_H < 16$ кВ·А); $k \approx 0,75$ – коефіцієнт заповнення залізом магнітопроводу;

$$d \approx 0.0554 \sqrt[4]{S_H},$$

де d – діаметр стержня; S_H – номінальна потужність трансформатора в кВ·А;

- активний опір первинної обмотки (Primary resistance):

$$R_1 = R_K / 2,$$

$$R_K = P_M / I_{1H}^2,$$

$$I_{1H} = S_H / U_{1H};$$

- індуктивність розсіювання первинної обмотки (Primary leakage inductance)

$$L_1 = X_1 / \omega,$$

$$X_1 = X_K / 2,$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

$$Z_K = U_K / I_{1H},$$

$$U_K = u_K U_{1H} / 100;$$

- число витків вторинної обмотки (Secondary turns):

$$w_2 = w_1 / n,$$

$$n = U_{1H} / U_{2H};$$

- активний опір вторинної обмотки (Secondary resistance):

$$R_2 \approx R_K / (2n^2);$$

									Арк.
									46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ				

Таблиця 3.1.

Параметри різних типів трансформатора

Номер	Тип трансформатора	S_H , кВ·А	U_{1H} , В	U_{2H} , В	i_0 , %	u_K , %	P_0^* , Вт	P_M^* , Вт
1	ОСМ-0,1	0,1	220	12	24	9,0	1	3
2	ОСМ-0,1	0,1	220	24	24	9,0	1	3
3	ОСМ-0,1	0,1	220	42	24	9,0	1	3
4	ОСМ-0,16	0,16	220	12	23	7,0	1,5	4,2

Продовження таблиці 3.1.

5	ОСМ-0,16	0,16	220	24	23	7,0	1,5	4,2
6	ОСМ-0,16	0,16	220	36	23	7,0	1,5	4,2
7	ОСМ-0,16	0,16	220	48	23	7,0	1,5	4,2

Проведення досліду холостого ходу трансформатора має наступні кроки:

- відповідно номеру (табл. 3.1) обрати тип трансформатора і розрахувати його параметри, скориставшись вище написаною методикою;
- зібрати схему як на рис. 3.7 в робочому полі Multisim для для випробування однофазного трансформатора і ввести попередньо розраховані параметри елементів схеми і моделі трансформатора Tr;
- розімкнути контакти перемикачів, що керуються кнопками Q, W, S, і T клавіатури, встановити режим АС(Змінний струм) роботи вольтметрів V1 і V2 (опір $R_V = 10 \text{ МОм}$) і амперметрів A1, A2, AR, AL, AC (опір $R_A = 1 \text{ мОм}$). Запустити симуляцію схеми і занести покази приладів V1, V2, A1 і ватметра XWM1 в табл. 3.2. Розрахувати і занести в табл. 3.2 параметри XX трансформатора. Здійснити порівняння отриманих даних з раніше розрахованими значеннями електричних величин.

									Арк.
									48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ				

Результати вимірювань дослідження холостого ходу трансформатора

Встановлено		Виміряно				Розраховано					
U_{1H} , В	f , Гц	U_{1H} , В	U_{20} , В	I_0 , А	P , Вт	n	i_0 , %	Z_0 , Ом	R_0 , Ом	X_0 , Ом	P_0 , Вт
220	50	220	12,003	0,078	0,86	18,329	17,16	2820,51	141,35	2816,97	0,86
220	50	220	23,841	0,078	0,86	9,228	17,16	2820,51	141,35	2816,97	0,86
220	50	220	41,763	0,078	0,86	5,268	17,16	2820,51	141,35	2816,97	0,86
220	50	220	12,114	0,12	1,297	18,161	16,5	1833,33	90,07	1831,12	1,297
220	50	220	24,02	0,12	1,297	9,159	16,5	1833,33	90,07	1831,12	1,297
220	50	220	35,925	0,12	1,297	6,124	16,5	1833,33	90,07	1831,12	1,297
220	50	220	48,04	0,12	1,297	4,580	16,5	1833,33	90,07	1831,12	1,297

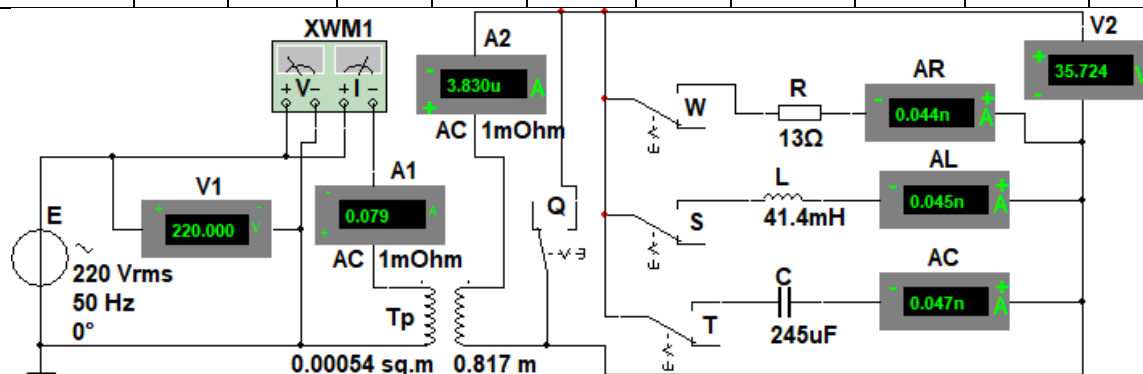


Рис. 3.7. Схема дослідження трансформатора

Проведення дослідження короткого замикання:

- встановити ЕРС джерела напруги

$$E = U_K = u_K U_{1H} / 100,$$

натиснути клавішу клавіатури Q, тобто замкнути вторинну обмотку трансформатора, запустити симуляцію (рис. 3.7). Виміряні дані занести в табл. 3.3;

- розрахувати вказані в табл. 3.3 параметри КЗ трансформатора і порівняти їх з величинами, розраховані в попередньому досліді.

Таблиця 3.3.

Результати вимірювань досліду короткого замикання трансформатора

Установлено	Виміряно				Розраховано				
	$E = U_K, \text{ В}$	$U_K, \text{ В}$	$I_{1H}, \text{ А}$	$I_{2H}, \text{ А}$	$P, \text{ Вт}$	$u_K, \%$	$Z_0, \text{ Ом}$	$R_0, \text{ Ом}$	$X_0, \text{ Ом}$
19,8	19,8	0,658	11,971	9,526	9	30,09	22,002	20,528	9,526
19,8	19,8	0,661	6,049	9,534	9	29,95	21,821	20,521	9,534
19,8	19,8	0,662	3,459	9,538	9	29,91	21,764	20,516	9,538
15,4	15,4	1,136	21,305	16,064	7	13,56	12,448	5,369	16,064
15,4	15,4	1,174	10,718	16,49	7	13,12	11,964	5,378	16,49
15,4	15,4	1,176	7,18	16,522	7	13,10	11,947	5,363	16,522
15,4	15,4	1,177	5,395	16,527	7	13,08	11,930	5,373	16,527

Зняття зовнішніх характеристик $U_2(I_2)$ трансформатора при резистивному, індуктивному і ємнісному навантаженнях:

- розімкнути контакт Q (рис. 3.7) і встановити номінальне значення U_{1H} ;
- розрахувати номінальний опір резистора R (навантаження) $R = U_{2H}/I_{2H}$, номінальну індуктивність $L = X_L/\omega \approx R/\omega$ (при $X_L \approx R$) і номінальну ємність $C = 1/(\omega X_C) \approx 1/(\omega R)$ (при $X_C \approx R$);
- послідовно підключаючи за допомогою перемикачів W, S, і T навантаження R, L, і C і змінюючи в діалогових вікнах елементів R, L, і C опір R, індуктивність L або ємність C, знімаючи покази вольметра V2 і амперметра AR, AL або AC при струмах 0 (XX); 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; $1,25I_{2H}$ ($I_{2H} \approx nI_{1H}$) і занести в табл. 3.4;
- використовуючи дані табл. 3.4, побудувати на одному рисунку зовнішні характеристики $U_2 = f(I_2)$ трансформатора при активній, індуктивній і ємнісній навантаженнях (рис. 3.8).

										Арк.
										50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ					

Результати вимірювань зовнішніх характеристик трансформатора

Навантаження	Вторинна напруга і струм	XX ($I_2 =$ 0)	$0,25I_{2H}$	$0,5I_{2H}$	$0,75I_{2H}$	I_{2H}	$1,25I_{2H}$
R	U_2 , В	12	11,867	11,732	11,588	11,452	11,299
	I_2 , А	0	2,081	4,115	6,26	8,293	10,55
L	U_2 , В	12	11,872	11,744	11,609	11,478	11,342
	I_2 , А	0	2,098	4,151	6,259	8,298	10,397
C	U_2 , В	12	12,128	12,256	12,38	12,504	12,626
	I_2 , А	0	2,079	4,161	6,227	8,334	10,439

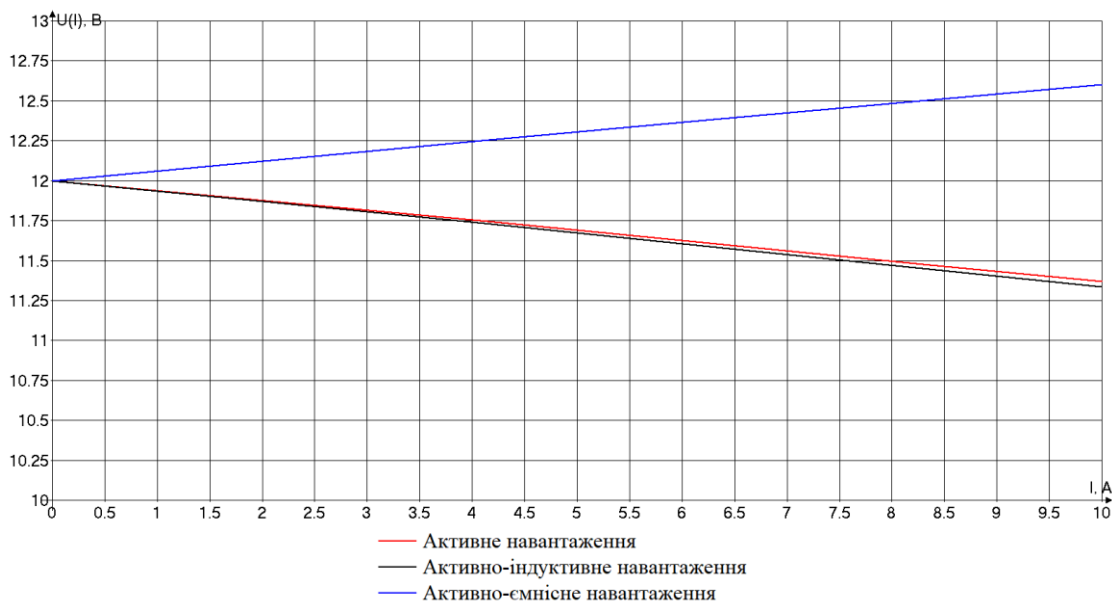


Рис. 3.8. Зовнішні характеристики трансформатора

3.2 Дослідження феромагнетика у складі трансформатора

3.2.1 Введення в дослідження

									Арк.
									51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ				

Для дослідження магнітних властивостей застосована схема (рис. 3.9), яка включає в себе резистори R_0 , R_1 , R_2 , конденсатор C , амперметр, трансформатор T , джерело живлення і виводи осцилографа. Дослідження магнітних властивостей феромагнітного матеріалу проводиться шляхом аналізу петель гістерезису в намагнічуваному полі частотою f за допомогою осцилографу. Досліджуваний феромагнетик в формі тороїда з середнім радіусом r_{cp} має намагнічувану (первинну) і вимірювальну (вторинну) обмотки, з кількістю витків n_1 і n_2 відповідно.

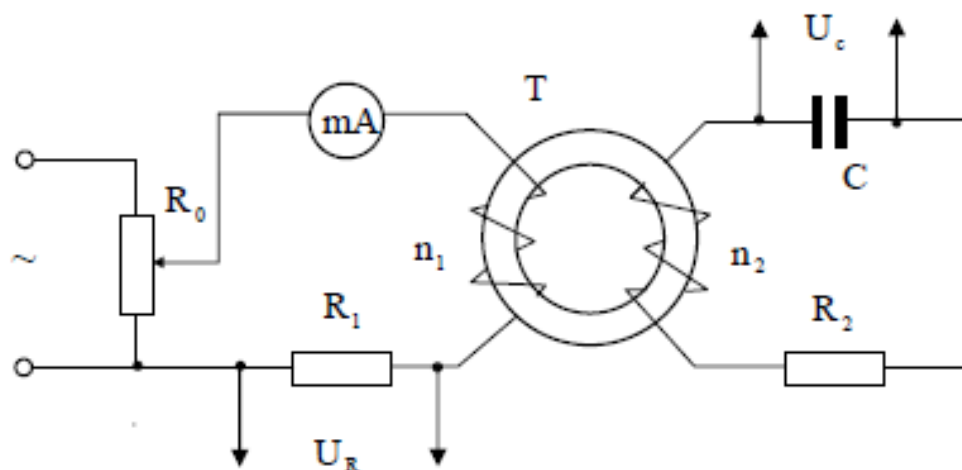


Рис. 3.9. Досліджувана схема з феромагнітним тороїдом

Намагнічувана первинна обмотка трансформатора живиться змінним струмом джерела. Напряга U_x , котра відповідає за горизонтальне відхилення променя в осцилографі, пропорційне напруженості магнітного поля в зразку, а напряга U_y , що відповідає за вертикальне відхилення – пропорційне індукції магнітного поля. Напряга U_x подається з резистору R_1 . Напряга, що подається з резистора R_1 на вхід X осцилографу, пропорційна силі струму I_1 в намагнічуваній обмотці згідно формули:

$$U_1 = R_1 I_1.$$

Струм I_1 , проходячи по намагнічуваній обмотці, створює в тороїдальному магнітному полі напруженість H [19]:

$$H = \frac{n_1}{2\pi r_{ep}} I_1 = \frac{n_1}{2\pi r_{ep}} \frac{U_R}{R_1}.$$

У вимірювальній обмотці при цьому виникає електрорушійна сила (ЕРС) індукції, що по закону Фарадея Максвелла [23] рівна швидкості зміни магнітного потоку в ній і визначається за формулою (3.1):

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -n_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (3.1)$$

де Φ – потік вектору магнітної індукції B через поверхню, що охоплюється всіма витками вторинної обмотки, S – площа перерізу тороїда.

Відповідно з законом Ома [24], для вторинного кола ЕРС розраховується за формулою:

$$\varepsilon_i = I_2 R_2 + \varepsilon_s + U_C,$$

де I_2 – значення сили струму в колі вимірювальної обмотки, ε_s – ЕРС самоіндукції, що виникає у вторинній обмотці, U_C – значення напруги на конденсаторі.

Якщо підібрати опір R_2 і ємність C таким чином, щоб

$$\varepsilon_s + U_C \ll I_2 R_2,$$

то

$$\varepsilon_i = I_2 R_2.$$

Використавши (3.1), отримаємо, що сила струму у вторинній обмотці розраховується за формулою [25]:

$$I_2 = \frac{\varepsilon_i}{R_2} = \frac{n_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}.$$

Так як напруга на конденсаторі дорівнює виразу:

									Арк.
									53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$U_C = \frac{1}{C} \int_0^t I_2 dt = \frac{n_2 S}{CR_2} \int_0^B dB = \frac{n_2 SB}{CR_2},$$

то магнітна індукція [26] розраховується за формулою:

$$B = \frac{CR_2}{n_2 S} U_C.$$

Отже, відхилення променя осцилографа по осі X пропорційно напруженості магнітного поля H, а по осі Y – магнітній індукції B в тороїдальному зразку. За один період синусоїдальної зміни струму електронний промінь на екрані осцилографа опише повну петлю гістерезису, а за кожен наступний період в точності її повторить.

По отриманій для досліджуваного феромагнетика основній кривій намагнічування можна визначити значення його диференційної проникності [27]:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH},$$

і побудувати графік залежності

$$\mu = \mu(H),$$

а також, використовуючи відношення для намагнічуваності:

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H,$$

побудувати графік коерцитивної сили J від напруженості H:

$$J = J(H).$$

Так як

$$U_R = x\delta_x; U_C = y\delta_y,$$

де x і y – координати петлі гістерезису, які знімаються з осцилограм, а δ_x і δ_y – чутливість осцилографа по осях x і y, що визначається по панелі осцилографа,

									Арк.
									54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ				

то для спрощення розрахунків в подальшому використовуються параметри H_c і B_r , що визначаються по формулах (3.2) та (3.3):

$$H_c = \frac{n_1}{2\pi r_{cp} R_1} U_x, \quad (3.2)$$

$$B_r = \frac{C R_2}{n_2 S} U_y. \quad (3.3)$$

Розрахунок значень досліджуваних величин, відбувається за формулами:

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H, \quad (3.4)$$

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H}. \quad (3.5)$$

3.2.2 Експеримент вимірювання

Збираємо схему з рис. 3.9 в програмному середовищі (рис. 3.10). У схемі використані наступні компоненти:

- V1 – джерело живлення;
- T1 – трансформатор, досліджуваний елемент схеми;
- XSC1 – осцилограф, для зняття осцилограми гістерезису;
- R1 – резистор для зняття осцилограми в колі первинної обмотки;
- R2 – резистор навантаження на вторинній обмотці;
- C1 – конденсатор для зняття осцилограми напруги U_y на ньому.

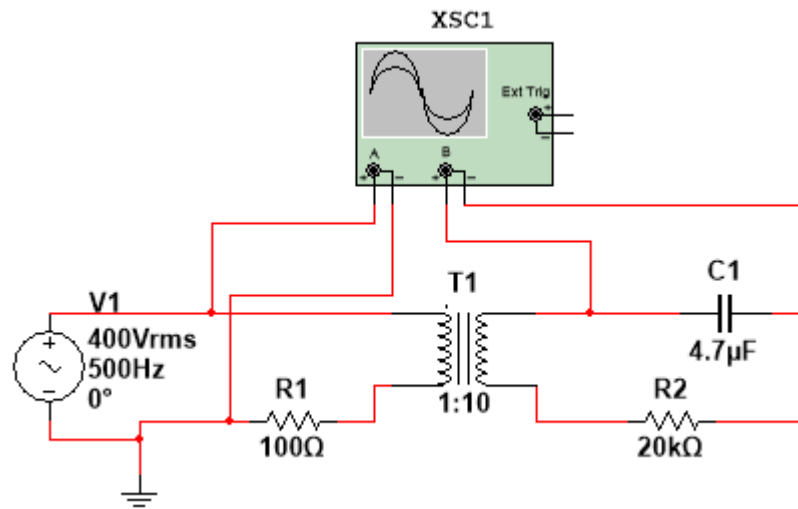


Рис 3.10. Схема дослідження феромагнетика в програмному середовищі MULTISIM™ for EDUCATION для студентів

Вибрані номінали схеми представлені в табл. 3.5, де l – довжина тороїда, n_1 – кількість витків в обмотці що намагнічує, n_2 – кількість витків в індикаторній катушці, S – площа поперечного перерізу тороїду.

Таблиця 3.5.

Номінали схеми дослідження феромагнетика

Номінали схеми	Параметри трансформатора				Параметри елементів схеми				
	<i>параметр</i>	$l, \text{м}$	n_1	n_2	$S, \text{м}^2$	$R_1,$ Ом	$C,$ мкФ	$R_2,$ кОм	$V,$ В
<i>величина</i>	0,01	1	10	0,001	100	4,7	20	400	500

Для розміщення компонентів на робочому полі програмного середовища, необхідно вибрати їх з бібліотеки елементів (Select a Component), обрати необхідні номінали резисторів (RESISTOR) і конденсатора (CAPACITOR) (або відредагувати їх параметри після встановлення), заземлення (GROUND), джерело змінного струму (AC_POWER) і необхідний тип трансформатора (TRANSFORMER 1P1S) (Рис. 3.11). З панелі інструментів обрати осцилограф і

розмістити на робочому полі. З'єднуємо провідниками елементи як показано на рис. 3.10. Натискаючи праву кнопку миші по компонентах, редагуємо їхні параметри на необхідні нам для вимірювання і дослідження феромагнетика (див. додаток А).

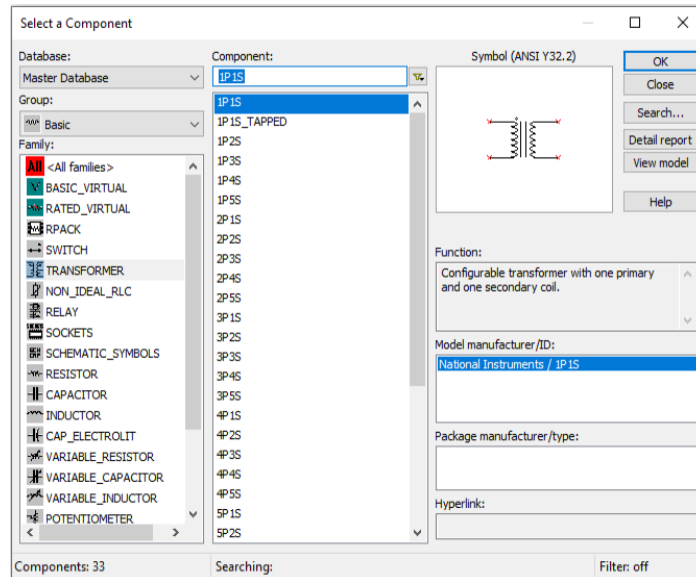


Рис. 3.11. Вибір трансформатора з бібліотеки компонентів

Параметри для компонентів мають бути наступними:

- для резистора R1 опір $R_1 = 100 \text{ Ом}$;
- для резистора R2 опір $R_2 = 20 \text{ кОм}$;
- для конденсатора C1 ємність $C = 4.7 \text{ мкФ}$;
- для джерела змінного струму V1 діюча напруга $V_{rms} = 400 \text{ В}$, частота $f = 500 \text{ Гц}$;
- для трансформатора T1 число витків первинної обмотки $n_1 = 1$, число витків вторинної обмотки $n_2 = 10$, площа поперечного перерізу феромагнітного сердечника $S = 0.001 \text{ м}^2$, довжина феромагнітного сердечника $l = 0.01 \text{ м}$. Допоміжні параметри: індуктивність розсіювання первинної обмотки складає 0.01 Гн , індуктивність розсіювання вторинної обмотки складає 0.1 Гн , опір первинної обмотки складає 100 Ом , опір вторинної обмотки складає 100 Ом .

									Арк.
									57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Після встановлення всіх параметрів, запускається симуляція, при натисненні на осцилограф буде виведено вікно з осцилограмою і панелью керування осцилограмою (рис. 3.12). Для виведення осцилограми петлі гістерезису обираємо режим В/А і змінюємо значення одиниць на вольт на панелі щоб умістити осцилограму петлі гістерезису в межах області екрану вікна осцилограми (рис. 3.13). Після налаштування осцилографа рекомендовано поставити симуляцію на паузу для уникнення плаваючих значень при знятті координат з осцилограми. На екрані осцилографа розміщені повзунки для зняття значень осцилограми у необхідних координатах. Розміщуємо повзунок 1 на лінії точки перетину кривої гістерезису з віссю Oy , повзунок 2 відповідно розміщуємо на лінії точки перетину з віссю Ox . На панелі осцилограми отримуємо значення координат відповідних точок (рис. 3.14). Отримані значення підставляємо в формули (3.2) і (3.3) для визначення коерцитивної сили H_c і залишкової індукції B_r . Розраховані значення підставляємо у формули (3.4) та (3.5) для обчислення намагніченості J і магнітної проникності μ . Розраховані дані параметрів феромагнітного сердечника трансформатора заносимо в табл. 3.6.

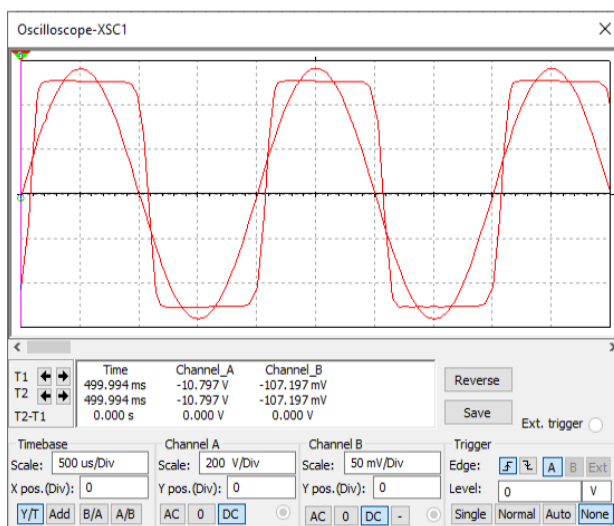


Рис. 3.12. Отримана осцилограма схеми на осцилографі

									Арк.
									58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

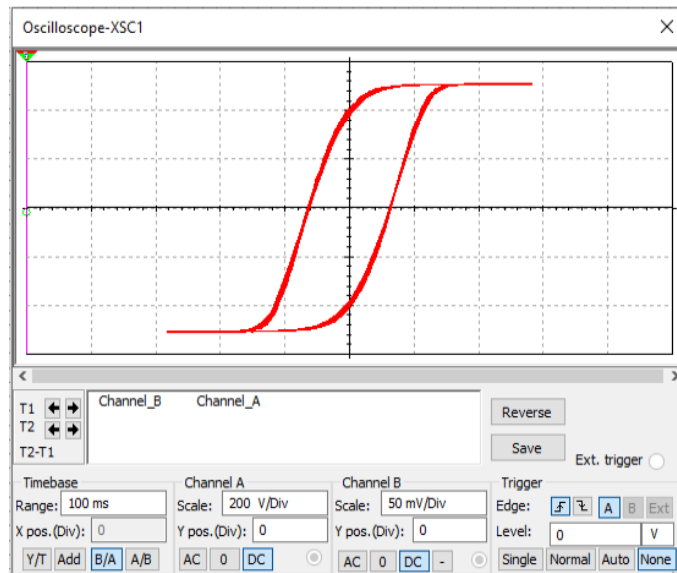


Рис. 3.13. Налаштований осцилограф з отриманою осцилограмою петлі гістерезису

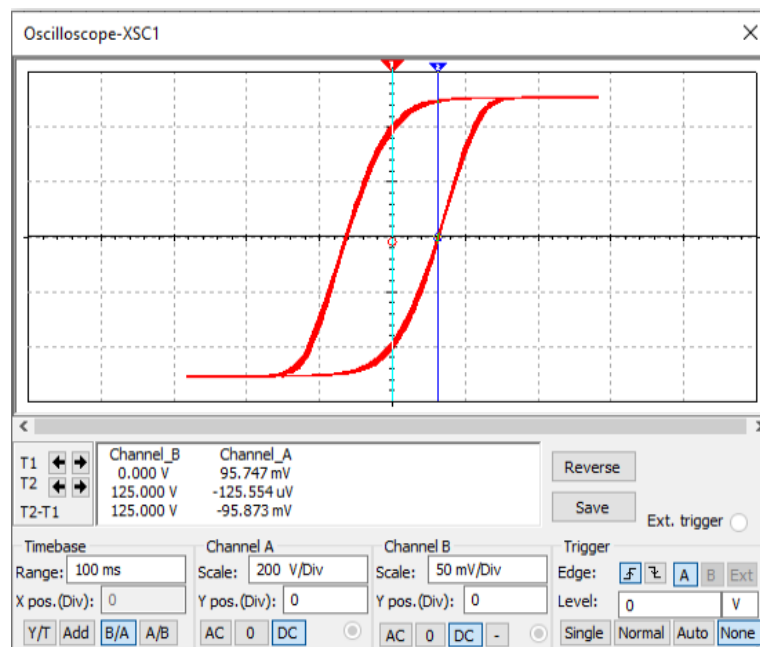


Рис. 3.14. Зняття отриманих значень з повзунків. По осі O_x напруга $U_x = 125$ В. По осі O_y напруга $U_y \approx 96$ мВ

Так, як в схемі присутні декілька компонентів, кожен з них впливає на осцилограму петлі гістерезису (див. додаток Б):

- при збільшенні значення опору R_1 резистора R1 петля гістерезису зменшується, тобто площа петлі зменшується, і значення напруги U_x і U_y відповідно зменшуються через збільшення втрат на первинній обмотці;

- при збільшенні значення R_2 опору резистора R2 на осцилограмі петлі гістерезису значення напруги U_x і U_y зменшуються через зменшення напруги, що відкладається з конденсатора C1, з якого знімається напруга на вхід осцилографа;
- при збільшенні значення ємності C конденсатора C1 петля гістерезису значення напруги U_x майже не змінюється, а значення напруги U_y зменшується через зменшення напруги, що відкладається на цьому конденсаторі;
- при збільшенні значення діючої напруги V_{rms} джерела змінного струму V1 петля гістерезису збільшується через збільшення значення напруги на елементах, звідки знімаються значення напруги на входи осцилографа;
- при збільшенні значення частоти f джерела змінного струму V1 петля гістерезису збільшується. Це пояснюється втратами на феромагнетику, а також індуктивних опорів розсіювання, які зі зростанням частоти збільшуються;
- при збільшенні кількості витків n_1 первинної обмотки петля гістерезису збільшується по причині збільшення індуктивності, що виникає в обмотці;
- при збільшенні кількості витків n_2 вторинної обмотки петля гістерезису збільшується аналогічно попередньому пункту;
- при збільшенні площі поперечного перерізу феромагнітного осердя S петля гістерезису збільшується через збільшення ЕРС індукції;
- при збільшенні довжини феромагнітного осердя l петля гістерезису зменшується, що пов'язано зі зменшенням напруженості і магнітної індукції поля.

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані результати та розраховані параметри трансформатора

Зняті параметри		Розраховані параметри трансформатора			
$U_x, \text{В}$	$U_y, \text{В}$	$H, \text{А/м}$	$B, \text{Тл}$	$J, \text{А/м}$	μ
125	0,096	62,5	0,91	$7,256 \cdot 10^5$	$1,161 \cdot 10^5$

Висновок

В даному розділі показано можливість вивчення магнітних властивостей феромагнетиків за допомогою MULTISIM™ for EDUCATION для студентів. В даному середовищі моделювання було відтворено дослідження трансформатора по запропонованій вище методиці. Моделювання роботи вимірювальної схеми дозволило визначити значення намагніченості J , магнітної проникності μ , коерцитивної сили H_c і залишкової індукції B_r досліджуваного феромагнітного матеріалу. Також було показано перелік основних величин, котрі впливали на результати вимірювання, проведено відповідні вимірювання, знято осцилограми та зроблено висновки у відповідності до того, як кожен з них впливає на результати вимірювань.

									Арк.
									61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ				

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Результатом даної дипломної роботи стала розробка методу дослідження феромагнітних матеріалів за допомогою програмного середовища моделювання MULTISIM™ for EDUCATION для студентів.

У роботі було проаналізовано різні методи дослідження феромагнетиків. Перечислено і описано існуючі методи вимірювання властивостей даних речовин. Основними їхніми недоліками є те, що більшість даних методів вимірюють лише певні характеристики феромагнетика. Також, в роботі згадано і описано існуючі програми моделювання, що дозволяють проводити моделювання і дослідження параметрів феромагнетика. Їхньою перевагою над методами вимірювання є відсутність потреби у використанні існуючого компоненту, легка можливість корегувати параметри феромагнетика і дослідження без потреби у виготовленні даного компоненту.

					ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У роботі представлено середовище моделювання MULTISIM™ for EDUCATION для студентів. Було описано функціонал, можливості і сферу застосування даної програми. Показано і проведено існуючий метод дослідження трансформатора за допомогою даної програми і виведено результати вимірювань.

Основним результатом роботи було проведення експерименту вимірювання і дослідження петлі гістерезису трансформатора, за результатами яких було розраховано основні параметри феромагнетика у складі трансформатора, а саме намагніченість J , магнітна проникність μ , коерцитивна сила H_c і залишкова індукція B_r . Проаналізовано вплив основних параметрів кожного компоненту схеми, і котрі могли вплинути на результати дослідження, проведено відповідні вимірювання та дослідження і зроблено висновки щодо їхнього впливу на гістерезис. Недоліки даного методу дослідження є відсутність можливості проведення трьох вимірних вимірювань феромагнетика окремо від схеми, що можливо у середовищах 3D моделювання. Перевагою є можливість дослідження петлі гістерезису з підключеним навантаженням до трансформатора, котре в свою чергу буде відповідно впливати на результати осцилограми.

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Чечерников В. И. Магнитные измерения. Издательство Московского университета, 1969. —387. URL: http://scask.ru/c_book_magz.php?id=5
2. Чечерников В. И. Магнитные измерения. URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/072/388.htm>
3. Балістичний гальванометр. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B0%D0%BB%D1%96%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80
4. Магнитометрический метод. URL: <https://studfile.net/preview/1746109/page:2/>
5. Пондеромоторный метод. URL: https://studbooks.net/2116050/matematika_himiya_fizika/ponderomotornyy_metod

					ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Мостовые измерения. URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/izmeren/1436-mostovye-izmerenija.html>
7. И. Д. Подольский. Магнитные измерения. URL: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/2153216
8. Ткаченко Р.Ю., Мишина Е.Д., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Сандуляк А.А. Модельные характеристики магнитных систем измерительных устройств и изучаемых образцов// Технические науки. – 2019. – №3. – С. 15-21. URL: <https://research-journal.org/technical/modelnye-xarakteristiki-magnitnyx-sistem-izmeritelnyx-ustrojstv-i-izuchaemyx-obrazcov/>
9. Cesare Tozzo. Modeling Ferromagnetic Materials in COMSOL Multiphysics. 2018. URL: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-ferromagnetic-materials-in-comsol-multiphysics/>
10. Finite Element Method Magnetics. URL: <https://cxem.net/software/finiteElementMethodMagnetics.php>
11. Езерский В. А., Монастырев П. В. Теплопередача в ограждающих конструкциях вентилируемого фасада. URL: <https://elcut.ru/publications/monastyrev.pdf>
12. Башкатов О. В. Комп'ютерне моделювання взаємодії високо коерцитивних магнітів у різних середовищах моделювання. Магістерська дисертація: спеціальність 104. – Київ, НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/30517/1/Bashkatov_magistr.pdf
13. ANSYS Maxwell. URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-maxwell>
14. Modelling materials with ab initio electronic structure software (CASTEP). URL: <https://www.york.ac.uk/research/impact/castep/>

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[magnitnyh-svoystv-multisloynih-struktur-s-anizotropnymi-geyzenbergovskimi-ferromagnitnymi-plenkami-i-raschet-dlya-nih/viewer](http://www.ni.com/magnitnyh-svoystv-multisloynih-struktur-s-anizotropnymi-geyzenbergovskimi-ferromagnitnymi-plenkami-i-raschet-dlya-nih/viewer)

22.National Instruments. URL: <https://www.ni.com/>

23.Кучерук І. М., Горбачук І. Т. Загальна фізика. Електрика і магнетизм : навчальний посібник. - Київ : Вища школа, 1990. - 367 с. URL: http://chtyvo.org.ua/authors/Kucheruk_Ivan/Zahalna_fyzyka_Elektryka_i_mah_netyzm/

24.[Калашников](#) С. Г., Электричество. учеб. пособие для студ. физ. спец. вузов / С. Г. Калашников. - 6.изд., стер. - М. : Физматлит, 2003. - 624 с.

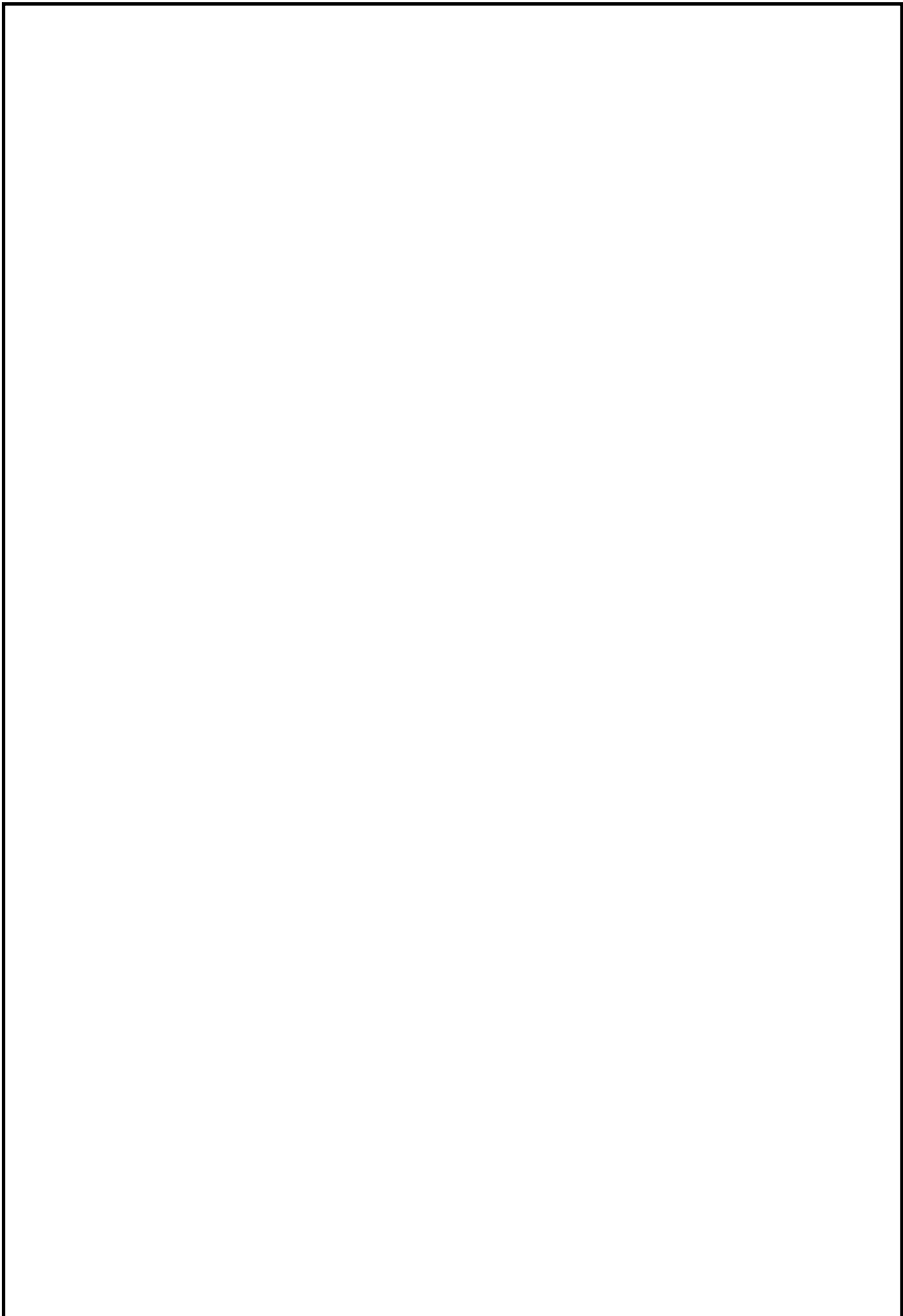
25.Енохович А.С. Краткий справочник по физике. Издание 2-е, переработанное и дополненное. - М., «Высшая школа», 1976. 288 с. URL: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/E/ENOHOVICH_Anatoliy_Sergeevich/Enohovich_A.S..html#0001.

26.Иродов И. Е. Основные законы электромагнетизма. Учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е, стереотип. – М.: Высш. Шк. 1991. URL: <https://zfftt.kpi.ua/images/library/Irodov2.pdf>.

27.А.А. Детлаф, Б.М. Яворский, М.Б. Милковская
Курс физики. Том 2. Электричество и магнетизм.: Высшая школа, 1977. - 375 с. URL: http://alexandr4784.narod.ru/Detlaf_2.html.

28. Викулин И.М., Коробицын Б.В., Крисъкив С.К. Физика электрорадиоматериалов. Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Одесса. — 2010. — 313 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/1828614/>.

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					<i>ДП,ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		68

ЗАДАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТАМ СХЕМИ

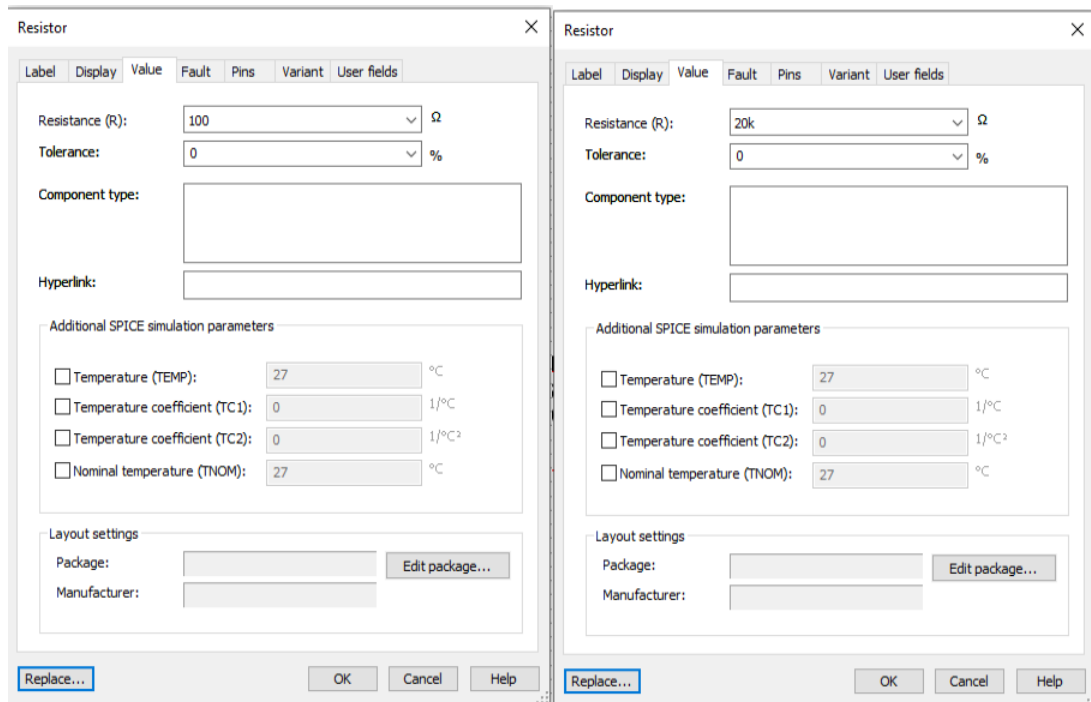
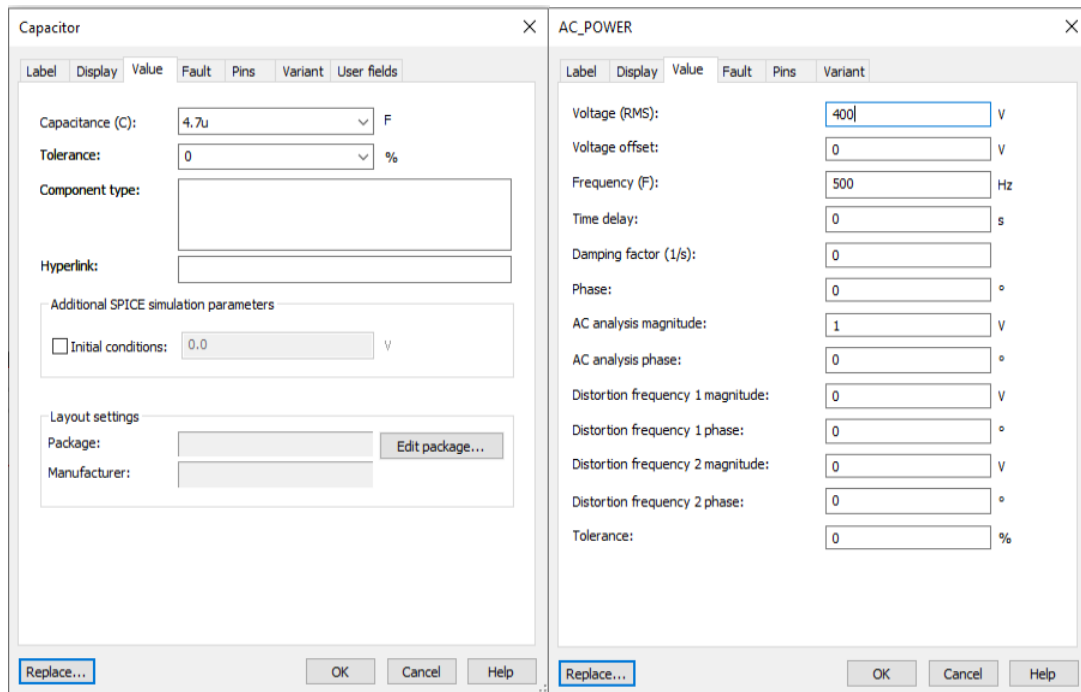


Рис. 1. Встановлення опорного R резистора R1; Рис. 2. Встановлення опорного R резистора R2

Рис. 3. Встановлення ємності С конденсатора С1; Рис. 4. Встановлення напруги V_{rms} і частоти f джерела змінного струму $V1$

ЗНЯТІ ОСЦИЛОГРАМИ

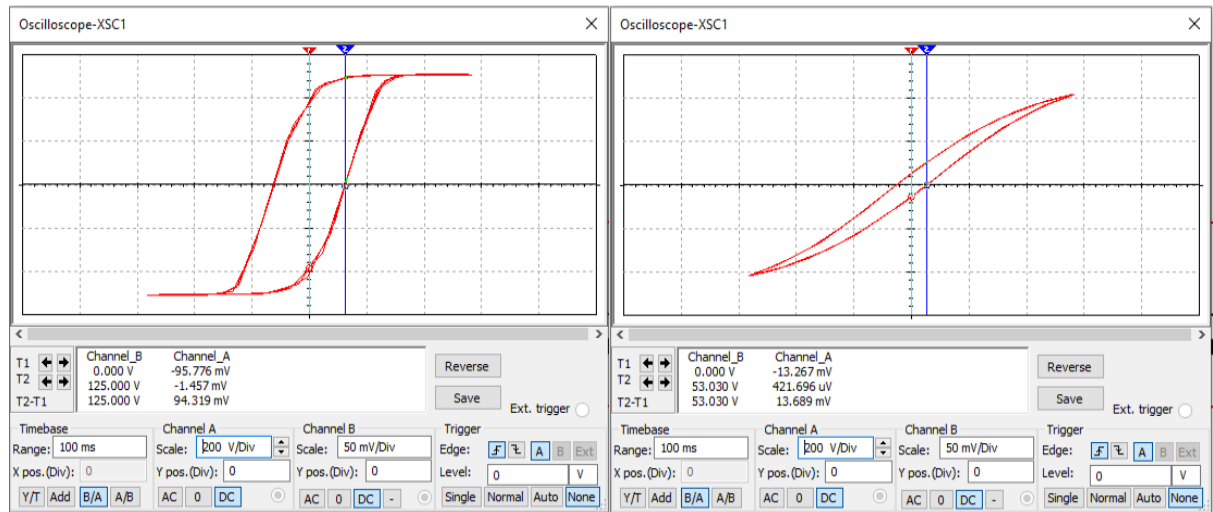


Рис. 1. Контрольне вимірювання; Рис. 1. Збільшений опір R1 резистора R1 з 100 до 1000 Ом

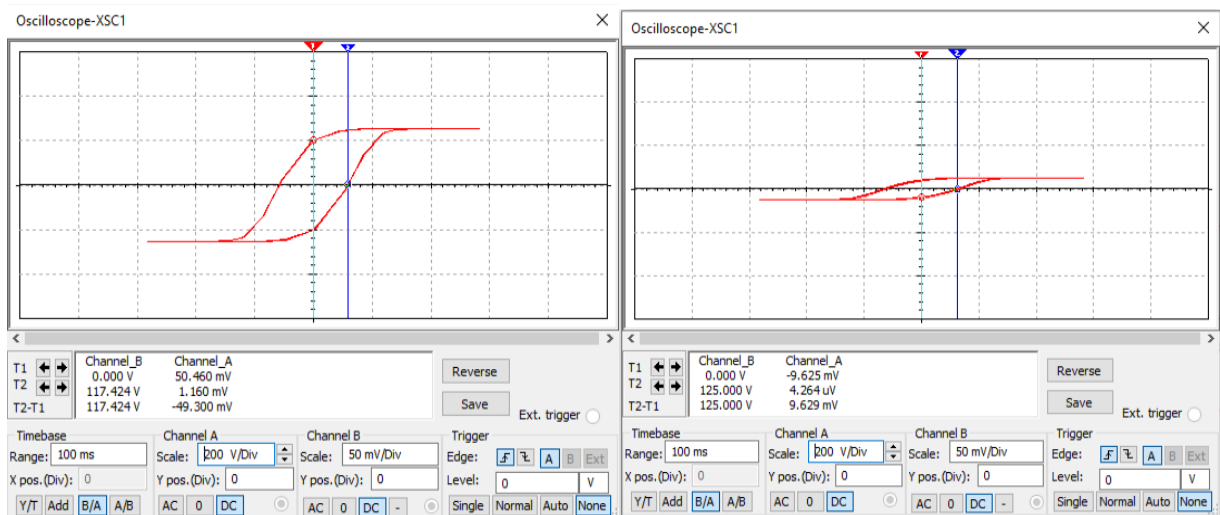


Рис. 2. Збільшений опір R2 резистора R2 з 20 кОм до 40 кОм; Рис. 3. Збільшена ємність С конденсатора С1 з 4.7 мкФ до 47 мкФ

ДОДАТОК Б

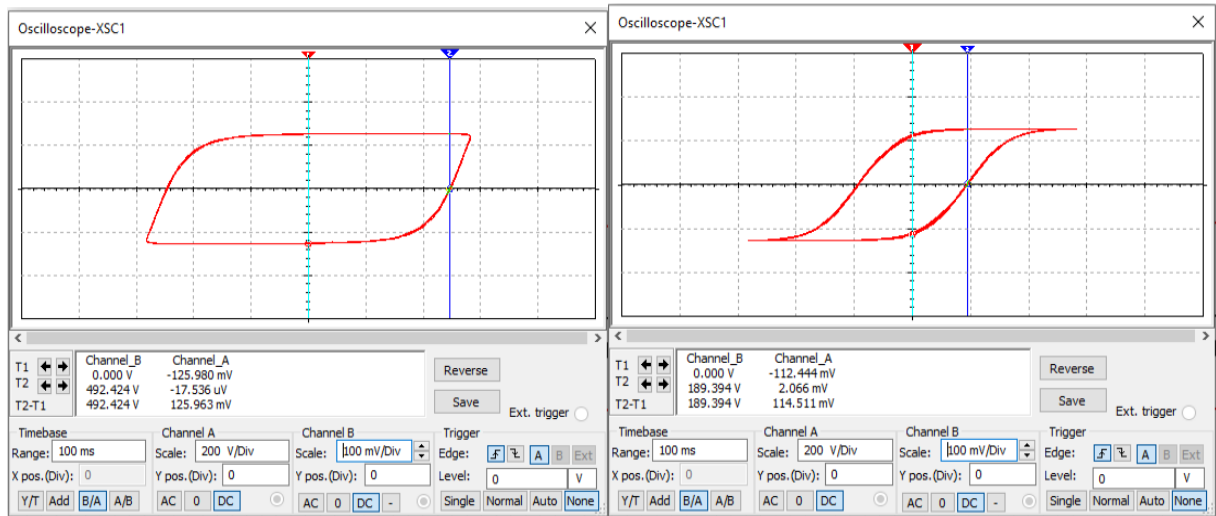


Рис. 10. Збільшена індуктивність розсіювання на первинній обмотці трансформатора з 0.01 до 0.1 Гн; Рис. 11. Збільшена індуктивність розсіювання на вторинній обмотці трансформатора з 0.1 до 1 Гн

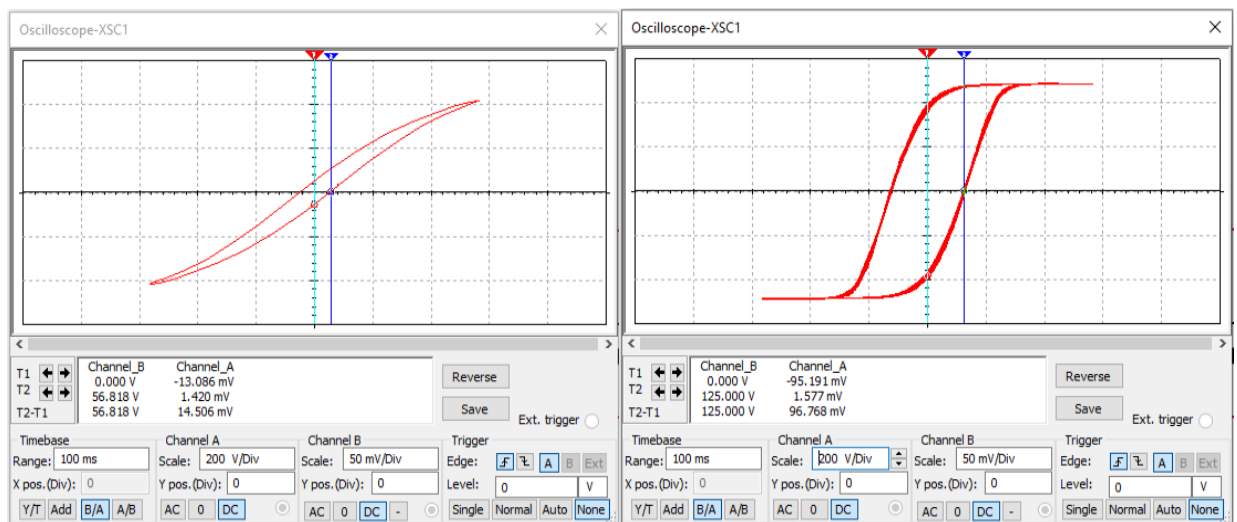


Рис. 12. Збільшений опір первинної обмотки трансформатора з 100 до 1000 Ом; Рис. 13. Збільшений опір вторинної обмотки трансформатора з 100 до 1000 Ом

<i>Позначення</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кільк.</i>	<i>Примітки</i>
-------------------	---------------------	---------------	-----------------

	Живлення		
V1	400V – 500 Гц	1	
	Конденсатори		
C1	4,7 мкФ	1	
	Резистори		
R1	100 Ом	1	
R2	20 кОм	1	
	Трансформатор		
T1	n1 1 – n2 10 – S 0,001 м ² – l 0,01 м	1	
	Осцилограф		
O1		1	
	Земля		
GND1		1	

					<i>ДП.ДЕ62.011.000 ПЕЗ</i>								
<i>З м.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>									
<i>Розроб.</i>	<i>Олександр ШТИКАЛО</i>				<i>Схема дослідження фізичних властивостей феромагнетика в програмі MULTISIM™ for EDUCATION для студентів Перелік елементів</i>				<i>Лім.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>		
<i>Перевір</i>	<i>Семікіна ТЕТЯНА</i>									2	2		
<i>Н.контр</i>	<i>В'ячеслав ЧАДЮК</i>								<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ62</i>				
<i>Затверд</i>	<i>Семікіна ТЕТЯНА</i>												

S U M M A R Y

Modeling in software environments for the study of physical properties of ferromagnets

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization Electronic Instruments and Devices Shtykalo Alexander. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE-62. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. - 65 p., Ill. 50, tables 6.

Keywords: software environment, hysteresis loop, ferromagnet, modeling, magnetic characteristics.

Summary of the project: This work consists of an introduction of 2 pages, which highlights the need to study the physical properties of magnetic materials, due to their widespread use in the world, substantiates the relevance of the problem, explained by the use of modern research methods, namely the use of computer simulation programs. The purpose of this work, which is to develop a research method in the program MULTISIM™ for EDUCATION for students.

The first section is devoted to the analysis of the literature on existing methods of research of ferromagnetic materials. This section includes 17 pages and is divided into two sections. The first section contains information on existing methods of measuring ferromagnets and a brief description of each of these methods: ballistic, magnetometric, electrodynamic, induction, ponderomotor, bridge, potentiometric, wattmeter, calorimetric, neutron, resonant, resonant, wave-microwave methods.

The second section of the first section is devoted to an overview of modeling environments in which it is possible to model and study the physical properties of ferromagnets. Each simulation environment is highlighted by a separate item and briefly describes its characteristics and capabilities in the amount of 2-3 pages for

									Арк.
									1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ

each of the environments. The first subsection is a description of the Comsol Multiphysics environment. COMSOL is a powerful interactive environment for modeling and solving scientific and technical problems based on differential equations in partial derivatives. The next subsection is a description of the Femm environment. The program Finite Element Method Magnetics (magnetic calculations by the method of finite elements, abbreviated FEMM) allows you to perform on personal computers the calculation of plane-meridian (axisymmetric) and plane-parallel stationary / quasi-stationary magnetic and stationary electrostatic fields. The next subsection describes the Elcut environment. ELCUT is an integrated dialog system of programs that allows you to solve problems of various types. The next subsection is a description of the Ansys Maxwell environment. ANSYS Maxwell is a modern, high-performance software for modeling two-dimensional and three-dimensional electromagnetic fields, used to analyze models of motors, sensors, transformers and many other electrical and electromechanical devices for various applications. The last program reviewed is the electronic structure software ab initio (CASTEP). CASTEP is a computer code used to develop new materials in the chemical, pharmaceutical, semiconductor, automotive and aerospace industries. At the end of the first section, a conclusion is made about the existing research methods. The advantages and disadvantages of the examined methods are indicated. In measuring methods, the advantage is the actual work with samples with all possible deviations. The disadvantage was the ability to work only with existing samples without the ability to change their parameters. Significant advantages of research by means of modeling are also noted. They consist in simplicity, economy, convenience and speed of carrying out modeling, and also the fast further analysis of results of research.

The next section is devoted to the Multisim program and the capabilities provided by this program, set out in 11 pages. This section describes Multisim as a circuit editor and application for their simulation, which is part of the electrical circuit development system, the system of tools EDA (Electronics Design Automation), which will help in performing the basic steps in the sequential circuit

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						2
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

development. Multisim is designed to introduce circuitry, simulation and preparation for the next stage, such as wiring. This section contains sections that are related to the basic description of the Multisim environment. The first section is the introduction of the scheme. This section describes the first stage in the development of the scheme. At this stage, the necessary components are selected, placed in the working field of the drawing in the right places with the appropriate orientation, connecting them together and the implementation of the rest necessary for development. The next section describes the structure of the component database. This section describes the Multisim component database, which is designed to support the information needed to describe any component. It contains everything you need to enter circuits, simulations (models) and PCBs, and, in addition, all other electrical information. It also describes the ability to work with components and edit them. The next section describes the general rules of modeling. It contains the necessary points for proper operation of the scheme. The next section describes the simulation. This section describes simulation in the environment as a mathematical method of emulating the behavior of the circuit. With the help of simulation it is possible to determine many properties of the circuit without physically assembling the circuit or using real devices. The last section is analysis. This section contains information on the various modes of analysis of emulation data, from the simplest to the most complex. At the end of the section we conclude about the simulation environment. The Multisim program differs from the considered modeling programs in that it is designed to simulate specific electrical circuits. With this modeling environment, it is advisable to create laboratory work, workshops, including for students, aimed at the study of schemes for various purposes. Including the study of components with ferromagnets.

The next section is devoted to measurements in the Multisim environment, set out in 25 pages. This section consists of two sections. The first section is devoted to the study of the transformer. The unit is divided into subsections. The first subsection concerns the transformer, its purpose and calculation formulas. A transformer is described as a static electromagnetic device designed to convert

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						3
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

alternating current of one voltage into alternating current of another voltage of the same frequency. The general formulas and the scheme of an electric circuit with a transformer are given. The next subsection describes the definition of transformer parameters. This subsection describes the study of the parameters of the transformer in the experiments of idling and short circuit. Substitution schemes for each experiment, formulas of calculations and parameters of elements of substitution schemes and formulas of calculations of transformer parameters are described. The next subsection is about the external characteristics of the transformer. Contains a figure with a graph of the external characteristics of the transformer and describes the removal of the external characteristics of the transformer. The last subsection is devoted to the modeling of the transformer in the environment. It describes the necessary input parameters for the study of the transformer in the Multisim environment, accompanying the drawings of the dialog box and the studied circuit in the software environment, formulas for calculating the input and output parameters, tables with nominal and measured parameters of the transformer. This subsection contains the study of the transformer in the experiments of idling and short circuit and the study of external characteristics, the results of measurements in the table and a figure with a graph.

The next section deals with the experiment of studying the ferromagnet in the transformer. Divided into two subsections. The first sub-item is an introduction to the study. The subsection contains a figure with a diagram that was used in the study of the ferromagnet, the formulas for determining the basic physical properties of the ferromagnet. The next sub-item is the measurement experiment. This subsection contains the investigated scheme in the software environment MULTISIM™ for EDUCATION for students, instructions for selecting components, editing their parameters, and the study itself, accompanied by drawings of waveforms, a table with measurement results and information on the impact of each parameter on the experiment. which was used to calculate the basic parameters of the ferromagnet in the transformer. At the end of the section, a

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						4
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

conclusion is given on the study of the magnetic properties of ferromagnets using MULTISIMTM for EDUCATION for students.

The next section of the work is the conclusions. This section describes the result of the work, namely the development of a method for the study of ferromagnetic materials using the software modeling environment MULTISIMTM for EDUCATION for students. Various methods of research of ferromagnets, conclusions concerning the modeling environment applied in work were also analyzed, and also the main results of work are resulted, advantages and lacks of a research method are specified. The disadvantages of the research method are the inability to perform three measurable measurements of the ferromagnet separately from the circuit, which is possible in 3D modeling environments. The advantage is the ability to study the hysteresis loop with a load connected to the transformer, which in turn will affect the results of the oscillogram.

The next section is a list of references. 28 sources were reviewed and used to review the literature on existing measurement methods from books and online resources, as well as a manual with the existing method of transformer research in the MULTISIMTM for EDUCATION program for students.

Appendix A and Appendix B are attached to the paper. Appendix A contains pictures of dialog boxes of the MULTISIMTM for EDUCATION program for students with setting parameters for elements. Appendix B contains drawings with oscillograms of studies of the influence of the parameters of the elements on the hysteresis loop.

					<i>ДП.ДЕ62.11.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5