

УДК 537.623

Моделювання фізичних властивостей схем з феромагнетиками

Штикало О.В., Ковальов, Д.О., к.т.н., Семікіна Т.В.

Вступ

У зв'язку з тим, що магнітні матеріали набувають все більшого застосування [1], вивчення їх властивостей є актуальним напрямком науки і техніки. На використанні магнітних властивостей речовин засновані цілі розділи техніки, такі як магнітний запис звуку і зображення, магнітна дефектоскопія, магнітна розвідка корисних копалин. Феромагнетики мають широке практичне застосування. Вони використовуються у вигляді сердечників у трансформаторах, генераторів, електродвигунів і інших пристроїв. При вимкненні зовнішнього магнітного поля феромагнетик залишається намагніченим, тобто створює власне магнітне поле в оточуючому його просторі. Упорядкована орієнтація елементарних струмів не зникає при вимкненні зовнішнього магнітного поля. Завдяки цьому існують постійні магніти. Постійні магніти знаходять широке застосування в електровимірювальних приладах, гучномовцях, телефонах, в пристроях звукозапису, магнітних компасах і т. д.

Як відомо [2], феромагнетики окрім здатності сильно намагнічуватися володіють ще і іншими властивостями, які суттєво відрізняються від діа- і парамагнетиків. Магнітні властивості феромагнетиків досить різноманітні і залежать від багатьох факторів: зовнішнього поля, температури, зовнішніх механічних напруг, характеру протікання намагнічування.

Магнітна сприйнятливості (χ) феромагнетиків додатня ($\chi > 0$) і досягає значень $10^4 - 10^5$; їх намагнічуваність (J) і магнітна індукція (B) ростуть зі збільшенням напруженості магнітного поля (H) нелінійно і в достатньо сильних полях досягають граничного значення J_s (магнітного насичення). Характерна особливість феромагнетиків полягає також в тому, що для них залежність J від H (а відповідно, і B від H) визначається попереднім намагнічуванням феромагнетика. Це явище отримало назву магнітний гістерезис.

Гістерезис приводить до того, що намагнічування феромагнетика не являється однозначною функцією H , тобто одному і тому ж значенню H відповідають декілька значень J .

Важливою характерною для феромагнетиків властивістю являється магнітний гістерезис, тобто затримка змін магнітних станів від змін напруженості зовнішнього магнітного поля [3].

У даній роботі магнітні характеристики феромагнітного матеріалу визначаються методом дослідження петель гістерезису. Для цього в даній роботі використовувалось моделювання роботи схеми в програмних середовищах MULTISIM™ for EDUCATION для студентів і Proteus Professional Demonstration. Дані програмні середовища були обрані за наступними причинами.

MULTISIM – середовище моделювання, дослідження і проектування електрично-принципових схем. Дана програма забезпечує можливість будувати плати та знімати характеристики потужними віртуальними приладами, скопійованими з реальних аналогів. У бібліотеці програмного пакету присутні понад 2000 моделей компонентів, і з кожним оновленням програми їхня кількість зростає. Можна також ввести власний елемент з необхідними параметрами. Програма може взаємодіяти з середовищем розробки системи вимірювання LabVIEW, що дозволяє співставляти теоретичні данні з реальними, прямо під час створення схем друкованих плат. Це дозволяє зменшити кількість проектних помилок і прискорює реалізацію проектів. Є два варіанти

програмного забезпечення MULTISIM:

For Education – призначена для вивчення схемотехніки, для курсів аналогової, цифрової і силової електроніки

For Designers – призначений для інженерів, надає інструменти для моделювання, аналізу, проектування друкованих плат.

Зручний і простий інтерфейс дозволяє швидко призвичаїтись користувачеві до роботи над середовищем моделювання. Також в програмі реалізовано функцію виправлення (корекції) схеми при виникненні помилок, пов'язаних із змодельованою схемою.

Proteus Professional Demonstration це програма розроблена для симуляції електричних кіл та розробки друкованих плат. Середовище моделювання складається з модулів для зображення схем, друкованих плат та контролерів у межах однієї програми.

Симуляція у програмному пакеті відбувається одночасно і для мікроконтролерів і для електричного кола. Можлива взаємодія з електричним колом за допомогою кнопок, потенціометрів та перемикачів. Симуляцію можна поставити на паузу та дослідити у конкретний момент часу.

1. Постановка експерименту

Дослідження магнітних властивостей феромагнітного матеріалу проводилось шляхом аналізу петель гістерезису в

намагнічуваному полі частотою 50 Гц за допомогою електронно-променевого осцилографу. Зразок досліджуваного феромагнетика в формі тороїда (Т) з середнім радіусом

r_{cp} забезпечений намагнічуваною (первинною) і вимірювальною (вторинною) обмотками, число витків яких n_1 і n_2 відповідно (рис. 1).

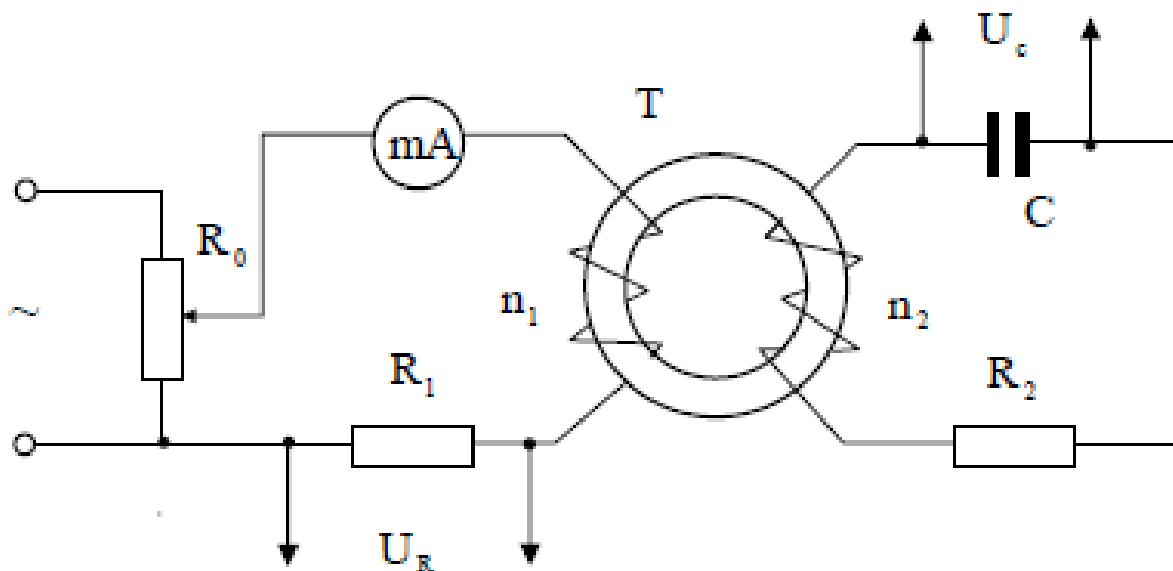


Рис. 1. Досліджувана схема з феромагнітним тороїдом.

Напруга, що подається з резистора R_1 на вхід X осцилографу, пропорційна силі струму I_1 в намагнічуваній обмотці $U_1 = R_1 I_1$. Згідно теореми про циркуляцію, напруженість H магнітного поля, що створюється струмом I_1 , визначається за формулою (1) [2]:

$$H = \frac{n_1}{2\pi r_{cp}} I_1 = \frac{n_1}{2\pi r_{cp}} \frac{U_R}{R_1} \quad (1)$$

У вимірювальній обмотці при цьому виникає електро рушійна сила (ЕРС) індукції, що визначається за формулою (2):

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} = -n_2 S \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

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

Відповідно з законом Ома для вторинного кола ЕРС розраховується за формулою (3):

$$\varepsilon_i = I_2 R_2 + \varepsilon_s + U_C \quad (3)$$

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

Якщо підібрати опір R_2 і електроємність C таким чином, щоб $\varepsilon_s + U_C \ll I_2 R_2$, то $\varepsilon_i = I_2 R_2$. Використавши (2), отримаємо, що

сила струму у вторинній обмотці розраховується за формулою (4):

$$I_2 = \frac{\varepsilon_i}{R_2} = -\frac{n_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt} \quad (4)$$

Так як напруга на конденсаторі дорівнює виразу за формулою (5):

$$U_C = \frac{1}{C} \int_0^t I_2 dt = -\frac{n_2 S}{C R_2} \int_0^B dB = -\frac{n_2 S B}{C R_2}, \quad (5)$$

То магнітна індукція розраховується за формулою (6):

$$B = \frac{C R_2}{n_2 S} U_C \quad (6)$$

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. В результаті на екрані буде видно стабільну петлю гістерезису.

По отриманій для досліджуваного феромагнетика основній кривій намагнічування можна визначити значення його диференціальної проникності $\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}$ і побудувати графік залежності $\mu = \mu(H)$, а також, використовуючи відношення для намагнічуваності

$J = \frac{B}{\mu_0} - H$, також побудувати графік $J = J(H)$.

Так як $U_R = x\delta_x$, $U_C = \gamma\delta_y$, де x і y -- координати петлі гістерезису, які знімаються з осцилограм, а δ_x і δ_y – чутливість осцилографа по осях i , що визначається по панелі осцилографа, то для спрощення розрахунків в подальшому використовують калібровані сталі h і b , що визначаються по формулах (7) та (8):

$$H = \frac{n_1}{2\pi r_{cp} R_1} U_x \quad (7)$$

$$B = \frac{C R_2}{n_2 S} U_y \quad (8)$$

Розрахунок значень величин, відбувається по формулах (9) та (10):

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (9)$$

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H} \quad (10)$$

Треба отримати на екрані осцилографу граничну петлю гістерезису і встановити її симетрично відносно початку координат. По отриманій кривій визначити коерцитивну силу H_c і залишкову індукцію B_r досліджуваного феромагнітного матеріалу. Для цього виміряти координати точок перетину петлі гістерезису з горизонтальною і вертикальною осями координатної сітки осцилографа. Обчислити значення величин H_c і B_r відповідно виразам (7) і (8).

Поступово зменшуючи струм в намагнічуваній обмотці, виміряти координати x і y вершин петель гістерезису.

Обчислити значення величин і відповідно виразам (9) та (10).

2. Моделювання схеми в середовищі Proteus Professional Demonstration.

Збираємо схему в середовищі (рис.2).

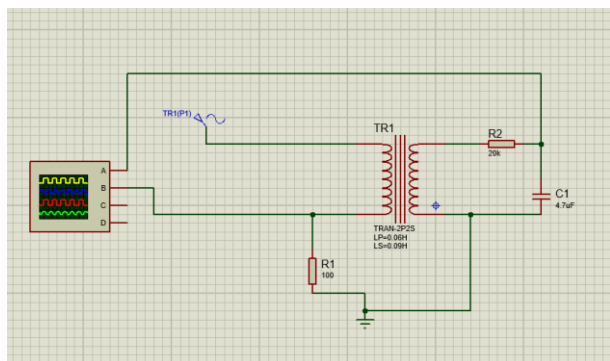


Рис. 2. Схема моделювання

Вибрані номінали схеми представлені в табл.1.

Таблиця 1. Номінали схеми.

l , мм	n_1 , вит	n_2 , вит	R_1 , Ом	R_2 , кОм	C , мкФ	S , м ²
260	237	330	100	20	4,7	0,0023

де l – довжина тороїда, n_1 – кількість витків в обмотці що намагнічує, n_2 – кількість витків в індикаторній катушці, S – площа поперечного перерізу тороїду.

Для початку необхідна додаткова робота з осцилографом. Було зроблено наступне:

- ввімкнено режим кругової розгортки A/V;
- підбрано значення В/Поділлка для обох входів осцилографа.

Після цього запускаємо моделювання, результати якого представлені на рис.3.

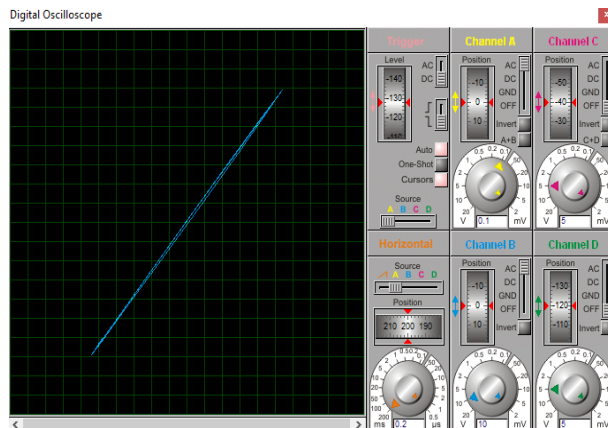


Рис. 3. Результати моделювання

Ми бачимо петлю гистерезису, з якої ми знімаємо значення U_x та U_y на перетні з осями O_x , O_y (Рис.4). Ці значення беруться для визначення параметрів феромагнетика.

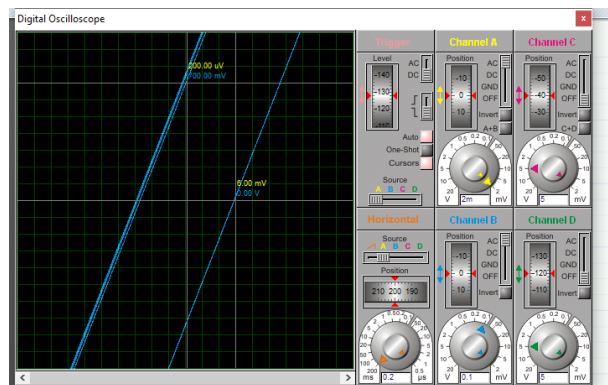


Рис. 4. Вимір значень напруг U_x та U_y .

За допомогою формул (7-10) визначаємо H , B , J та μ , та вносимо знайдені значення до таблиці 2.

При роботі в середовищі Протеус ми можемо зазначити наступні проблеми: було незручне зняття показників з осцилографу, а саме важко було точно визначити значення.

Таблиця 2. Розраховані параметри. використаний MULTISIM™ for EDUCATION.

$U_{вх},$ В	$U_x,$ мВ	$U_y,$ мВ	$H,$ А/м	$B,$ Тл	$J, А/м$	μ
150	5,8	700	0,053	0,087	$6,899 \cdot 10^4$	$1,305 \cdot 10^6$

Для визначення кращого середовища для моделювання досліджуваної схеми був

3. Моделювання схеми в середовищі MULTISIM™ for EDUCATION.

Використовуючи базу даних беремо компоненти з наступними номіналами, які представлені в табл.1.

Результат моделювання схеми представлений на рис.5.

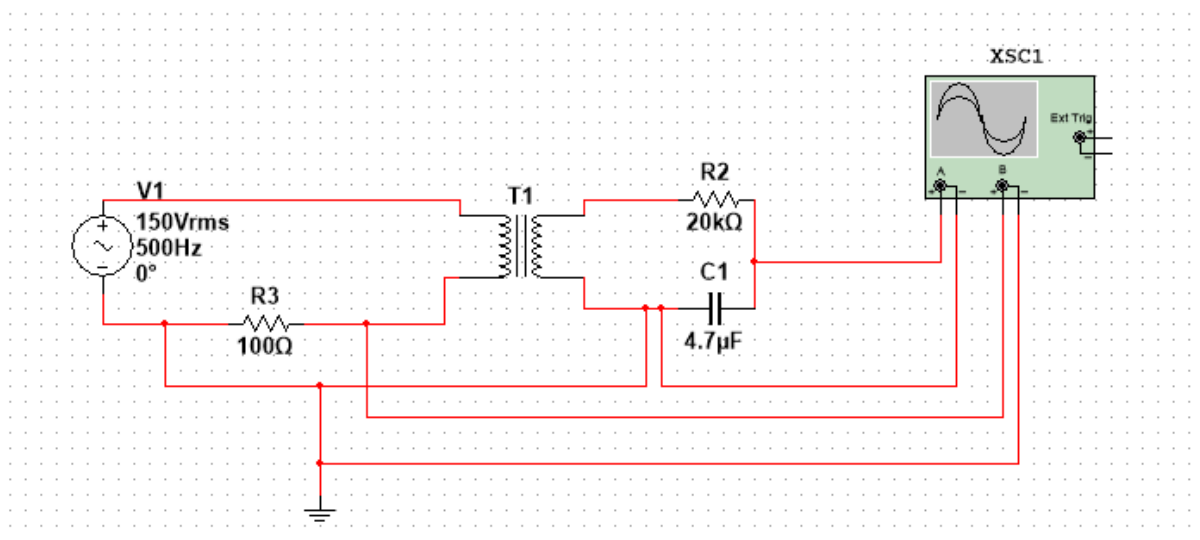


Рис. 5. Схема моделювання

Далі після вмикання схеми ми вмикаємо симуляцію і знімаємо покази з осцилографа.

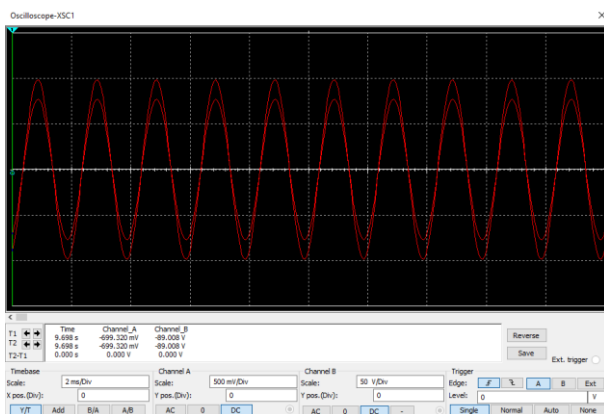


Рис. 6. Результати моделювання

Результат зображений на рис.6. Для того, щоб побачити петлю гістерезису ми вмикаємо розгортку на панелі осцилографа(кнопка A/B або B/A). і спостерігаємо покази осцилографу, які представлені на рис.7.

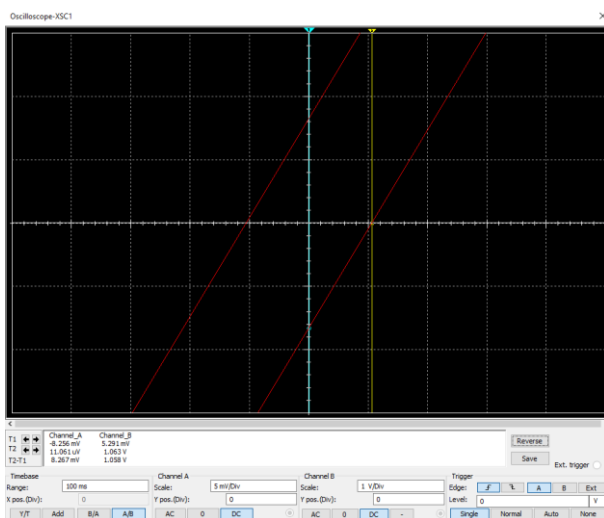


Рис. 7. Осцилограма петлі гістерезису.

По результатам петлі гістерезису знімаємо значення на точках перетину графіку з осями координат U_x і U_y і проводимо такі ж розрахунки, які були проведені до попереднього програмного пакету.

Висновок

Отримані значення моделювання в обох програмних середовищах співпадають. Проведення моделювання феромагнітних компонентів та схем з ними можливе в обох програмних пакетах.

Зручнішим середовищем моделювання виявився MULTISIM™ for EDUCATION. Даний програмний пакет дозволяє точніше і значно швидше знімати значення з

графіків осцилограм, ніж Proteus Professional Demonstration.

Рекомендовано обрати програмний пакет MULTISIM™ for EDUCATION, так, як він зручніший у моделюванні і дослідженні. Proteus Professional Demonstration також підходить для проведення дослідження феромагнетиків, та імовірність допущення похибки при знятті значень з графіка осцилограми вища, ніж у попереднього програмного пакету.

Література

1. Глинчук М.Д., Хіст В.В., Морозовська Г.М. Відновлення інтересу до магнітоелектричного ефекту у нанофероїках, Укр. фіз. журн – 2018. № 1. –С. 26-27.
2. Савельев И. В. Курс общей физики, т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. Учебное пособие – 1982, –С. 183-189.
3. Кучерчук І. М., Горбачук І. Т. Загальна фізика. Електрика і магнетизм., Навчальне видання – 1990, –С. 257-260.