

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

# **ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ І ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ**

ТИПОВА ПРОГРАМА, ЗАВДАННЯ,  
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ

для студентів спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
освітньо-професійної програми «Електричні машини» заочної форми навчання

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою НТУ «ХПІ»,  
протокол № 1 від 16.01.19

Харків  
НТУ «ХПІ»  
2019

**Теорія електромагнітних полів і процесів в електротехніці.** Типова програма, завдання, контрольні запитання та методичні вказівки до курсової роботи для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Електричні машини» заочної форми навчання / уклад. Мілих В.І., Шилкова Л.В. – Харків: НТУ «ХПР», 2019. – 32 с.

Укладачі                      В.І. Мілих  
    Л.В. Шилкова

Рецензент                    В.Ф. Болюх

Кафедра електричних машин

## ВСТУП

Відомо, що принцип дії більшості електротехнічних пристроїв, у тому числі трансформаторів і електричних машин, заснований на існуванні і взаємодії магнітних полів. Розуміння суті і ролі магнітних полів, уміння їх розраховувати є ключем до розуміння принципу дії, розрахунку і проектування цих пристроїв.

Дисципліна «Теорія електромагнітних полів та процесів в електротехніці» вивчає теоретичні основи та методи розрахунку електромагнітних полів та процесів в електротехніці, що є основою подальшого засвоєння низки дисциплін електротехнічного профілю, таких як «Електричні машини», «Електричні апарати» тощо, а також засвоєння методів розрахунку багатьох електротехнічних пристроїв, таких як трансформатори, електричні машини тощо.

Науковою основою навчальної дисципліни є вивчення студентами дисциплін вищої математики, інженерної графіки, фізики, теоретичних основ електротехніки, інформатики. Подальше вивчення теоретичних основ та методів розрахунку електромагнітних полів та процесів в електротехніці здійснюється на лекційних, практичних і лабораторних заняттях, а також шляхом самостійної, теоретичної та розрахункової роботи студентів.

Метою викладання дисципліни, що зазначена є вивчення студентами теоретичних основ та методів розрахунку електромагнітних полів та процесів в електротехніці, які застосовуються при вивчанні, розрахунках та при проектуванні багатьох електротехнічних пристроїв.

Завданнями дисципліни є:

- вивчення теоретичних основ розрахунку електромагнітних полів;
- вивчення методів розрахунку електромагнітних полів різних елементів електротехнічних пристроїв;
- засвоєння теоретичних основ та практичних навичок отримання низки електромагнітних параметрів електротехнічних пристроїв на основі розрахунку магнітних полів.

В результаті вивчення дисципліни студенти повинні знати:

- теоретичні основи розрахунку електромагнітних полів;
- методи розрахунку електромагнітних полів різних елементів електротехнічних пристроїв;
- теоретичні основи отримання низки електромагнітних параметрів електротехнічних пристроїв на основі розрахунку магнітних полів;

вміти:

- формувати математичні моделі та обирати раціональні методи розрахунку електромагнітних полів, параметрів та процесів в електротехніці;
- розраховувати електромагнітні поля та параметри різних електротехнічних пристроїв.

Вивчення дисципліни «Теорія електромагнітних полів та процесів в електротехніці» студентами заочної форми навчання відбувається під час самостійної роботи. Студент повинен скласти конспект за вивченим матеріалом та відповісти на питання для самоперевірки. Після вивчення відповідних розділів дисципліни рекомендується виконувати курсову роботу.

Це методичне видання містить в собі програму курсу «Теорія електромагнітних полів та процесів в електротехніці», контрольні питання за розділами курсу, методичні вказівки для виконання курсової роботи, а також перелік джерел інформації, необхідних для вивчення дисципліни.

## 1 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛІНИ

За навчальним планом дисципліна «Теорія електромагнітних полів та процесів в електротехніці» вивчається в 5 семестрі на третьому курсі. Навчальним планом передбачено 7 кредитів загального обсягу, що становить 210 навчальних годин, які складаються з 18 годин аудиторних занять, 192 години самостійної роботи для виконання курсової роботи та підготовки до екзамену.

До складу дисципліни увійшли такі розділи:

1. Основні поняття і закони електромагнітного поля.
2. Магнітне поле провідників різноманітної форми та конструкції.
3. Магнітне поле у середовищах з різними магнітними властивостями.
4. Рівняння Максвелла та методи розрахунку магнітного поля.
5. Принципи розрахунку магнітного поля методом скінчених різниць.
6. Основні поняття та рівняння електростатичного поля та електричного поля постійного струму.
7. Основні рівняння та принципи розрахунку електромагнітних полів та процесів.

## 2 ТИПОВА ПРОГРАМА ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

### **Розділ 1 Основні поняття і закони електромагнітного поля**

Електричне та магнітне поля, як складові електромагнітного поля, і його характеристики: електричний заряд, електричний струм, електрична індукція, напруженість електричного поля, електрорушійна сила, магнітний потік, магнітна індукція, напруженість магнітного поля, магніторушійна сила.

Закон електромагнітної індукції, закон Ампера, правило Ленца, закон Кулона.

Способи збудження та зображення магнітних полів. Правило буравчика. Властивості матеріалів, що впливають на магнітне поле та характеристика середовищ розповсюдження магнітного поля.

Метод накладення. Основи розв'язання задач розрахунку магнітних поля: закон Біо – Савара – Лапласа, закон повного струму.

### **Контрольні запитання**

1. Дайте визначення електричному полю.
2. Дайте визначення магнітному полю.
3. Дайте визначення електромагнітному полю.
4. Дайте визначення електричному заряду.
5. Дайте визначення електричному струму.
6. Дайте визначення електричній індукції та напруженості електричного поля.
7. Дайте визначення електрорушійній силі.
8. Дайте визначення магнітному потоку.
9. Дайте визначення магнітній індукції.
10. Дайте визначення напруженості магнітного поля.
11. Дайте визначення магніторушійній силі.
12. Сформулюйте закон електромагнітної індукції.
13. Сформулюйте закон Ампера.
14. Сформулюйте правило Ленца.
15. Сформулюйте закон Кулона.
16. Наведіть способи збудження та зображення магнітних полів.
17. Сформулюйте правило буравчика.
18. Охарактеризуйте властивості матеріалів, що впливають на магнітне поле.
19. Охарактеризуйте середовища розповсюдження магнітного поля.
20. Викладіть сутність методу накладення при розрахунку магнітного поля.
21. Сформулюйте закон Біо – Савара – Лапласа.
22. Сформулюйте закон повного струму.

### **Розділ 2. Магнітне поле провідників різноманітної форми та конструкції**

Магнітне поле нескінченно довгого провідника, що має круглий переріз кінцевого радіусу. Магнітне поле довгої двохпровідної лінії з провідниками кругло-

го перерізу. Магнітне поле коаксіального кабелю. Магнітне поле довгої одиночної шини прямокутного поперечного перерізу, а також довільної сукупності прямокутних шин.

Магнітне поле тороподібної котушки. Оціночна формула для поля всередині соленоїда відносно великої довжини. Магнітне поле кругового витка зі струмом: частковий випадок – поле на осі витка на основі закону Біо – Савара – Лапласа.

Магнітне поле провідника кінцевої довжини. Магнітне поле прямокутного контуру (витка) із струмом. Магнітне поле прямокутної котушки з кінцевими розмірами поперечного перерізу, а також сукупності таких котушок.

### **Контрольні запитання**

1. Викласти методику розрахунку магнітного поля нескінченно довгого провідника, що має круглий переріз кінцевого радіусу.

2. Викласти методику розрахунку магнітного поля двохпровідної лінії з провідниками круглого перерізу.

3. Викласти методику розрахунку магнітного поля коаксіального кабелю.

4. Викласти методику розрахунку магнітного поля довгої одиночної шини прямокутного поперечного перерізу.

5. Викласти методику розрахунку магнітного поля довільної сукупності довгих шин прямокутного перерізу.

6. Викласти методику розрахунку магнітного поля тороподібної котушки.

7. Викласти методику розрахунку магнітного поля всередині соленоїда відносно великої довжини.

8. Викласти методику розрахунку магнітного поля на осі витка зі струмом із застосуванням закону Біо – Савара – Лапласа.

9. Викласти методику розрахунку магнітного поля провідника кінцевої довжини.

10. Викласти методику розрахунку магнітного поля прямокутного контуру (витка) із струмом.

11. Викласти методику розрахунку магнітного поля прямокутної котушки з кінцевими розмірами поперечного перерізу, а також сукупності таких котушок.

### **Розділ 3. Магнітне поле у середовищах з різними магнітними властивостями**

Граничні умови для магнітної індукції та напруженості магнітного поля на межі розділення двох середовищ з різними магнітними властивостями та умови переломлення силових ліній на межі розділення середовищ. Метод дзеркальних зображень для розрахунку магнітного поля поблизу плоскої межі розділення середовищ. Особливості методу дзеркальних зображень у разі циліндрової межі розділення середовищ, у разі двох екранів, розділених проміжком.

Поняття про магнітні кола. Закони Ома та Кірхгофа для магнітних кіл. Принцип розрахунку магнітного поля методом очікуваних шляхів замикання силових ліній.

Пряма і зворотна задача розрахунку магнітного кола.

#### **Контрольні запитання**

1. Викласти граничні умови для магнітної індукції на межі розділення двох середовищ.
2. Викласти граничні умови для напруженості магнітного поля на межі розділення двох середовищ.
3. Викласти умови переломлення силових ліній на межі розділення середовищ.
4. Викласти сутність методу дзеркальних зображень для розрахунку магнітного поля поблизу плоскої межі розділення середовищ.
5. Викласти особливості методу дзеркальних зображень у разі циліндрової межі розділення середовищ.
6. Викласти особливості методу дзеркальних зображень у разі двох екранів, розділених проміжком.
7. Викласти основні поняття про магнітні кола.
8. Навести закони Ома та Кірхгофа для магнітних кіл.
9. Навести принцип розрахунку магнітного поля методом очікуваних шляхів замикання силових ліній.
10. Навести алгоритм прямої задачі розрахунку магнітного кола.
11. Навести алгоритм зворотної задачі розрахунку магнітного кола.



## **Розділ 4. Рівняння Максвелла та методи розрахунку магнітного поля**

Система рівнянь Максвелла. Зв'язок 1-го рівняння Максвелла з законом повного струму. Закон безперервності магнітного потоку і його зв'язок з 3-м рівнянням Максвелла. Скалярний магнітний потенціал і вираз через нього рівняння з системи Максвелла (рівняння Лапласа). Векторний магнітний потенціал і вираз через нього рівняння з системи Максвелла (рівняння Пуассона) для однорідного середовища та загальний розв'язок цього рівняння.

Вираз через векторний магнітний потенціал рівняння магнітного поля з системи Максвелла для неоднорідного середовища. Вираз складових магнітної індукції через векторний магнітний потенціали в прямокутній та циліндричній системах координат. Магнітне поле кругового витка зі струмом: загальний випадок – просторовий розподіл на основі векторного магнітного потенціалу. Магнітне поле круглої котушки з кінцевими розмірами поперечного перерізу.

Метод розділення змінних для розрахунку магнітних полів. Метод розділення змінних для розрахунку магнітного поля в пристроях з циліндровими межами розділу різнорідних середовищ.

### **Контрольні запитання**

1. Навести систему рівнянь Максвелла та зв'язок 1-го рівняння Максвелла з законом повного струму.
2. Навести закон безперервності магнітного потоку і його зв'язок з 3-м рівнянням Максвелла.
3. Надати визначення скалярному магнітному потенціалу і виразити через нього рівняння з системи Максвелла (рівняння Лапласа).
4. Надати визначення векторному магнітному потенціалу і виразити через нього рівняння з системи Максвелла (рівняння Пуассона) для однорідного середовища та надати загальний розв'язок цього рівняння.
5. Виразити через векторний магнітний потенціал рівняння магнітного поля з системи Максвелла для неоднорідного середовища.
6. Виразити складові магнітної індукції через векторний магнітний потенціали в прямокутній системі координат.

7. Виразити складові магнітної індукції через векторний магнітний потенціали в циліндричній системі координат.

8. Викласти методику розрахунку магнітного поля кругового витка зі струмом на основі векторного магнітного потенціалу.

9. Викласти методику розрахунку магнітного поля круглої котушки з кінцевими розмірами поперечного перерізу.

10. Навести сутність методу розділення змінних для розрахунку магнітних полів.

11. Навести сутність методу розділення змінних для розрахунку магнітного поля в пристроях з циліндровими межами розділу різнорідних середовищ.

## **Розділ 5. Принципи розрахунку магнітного поля методом скінчених різниць**

Загальні принципи розрахунку магнітного поля у неоднорідному середовищі (дискретизація середовищ та чисельні методи розв'язання). Безперервні та дискретні функції електричних і магнітних величин при сітковій та скінчено-елементній структурах. Основи методу скінчених різниць (об'єкт і область розрахунку, сітка та нумерація її елементів, формування масивів магнітних та електричних величин, загальні граничні умови). Подання похідних векторного магнітного потенціалу у скінчених різницях.

Скінчено-різницева апроксимація магнітних величини (магнітної індукції і напруженості магнітного поля) через векторний магнітний потенціал. Скінчено-різницева апроксимація рівняння магнітного поля, вираженого через векторний магнітний потенціал (п'ятиточковий сітковий шаблон і відповідний скінчено-різницевий оператор). Загальна структура системи розрахунку магнітного поля методом скінчених різниць.

Загальний алгоритм і складові програми розрахунку магнітного поля методом скінчених різниць (описи використовуваних величин, формування сіткової моделі та об'єкту розрахунку, розрахунок вузлових струмів, завдання початкових значень векторного магнітного потенціалу).

Загальний алгоритм і складові програми розрахунку магнітного поля мето-

дом скінчених різниць (організація ітераційного перерахунку векторного магнітного потенціалу, магнітних властивостей феромагнетиків, критерії завершення ітераційного процесу, способи прискорення досягнення кінцевих результатів розрахунку).

Отримання електромагнітних параметрів електротехнічних пристроїв за результатами розрахунку магнітного поля: магнітні індукція і напруженість, магнітний потік, магнітне потокозчеплення, електромагнітні характеристики, падіння магнітної напруги, індуктивності і взаємоіндуктивності.

Отримання електромагнітних параметрів електротехнічних пристроїв за результатами розрахунку магнітного поля: електрорушійні сили та їхній гармонічний склад, електромагнітні і електродинамічні зусилля, електромагнітний момент, енергія магнітного поля.

### **Контрольні запитання**

1. Навести загальні принципи розрахунку магнітного поля у неоднорідному середовищі (дискретизація середовищ та чисельні методи розв'язання).

2. Навести безперервні та дискретні функції електричних і магнітних величин при сітковій та скінчено-елементній структурах.

3. Навести основи методу скінчених різниць (об'єкт і область розрахунку, сітка та нумерація її елементів, формування масивів магнітних та електричних величин, загальні граничні умови).

4. Навести принцип подання похідних векторного магнітного потенціалу у скінчених різницях.

5. Навести принцип скінчено-різницевої апроксимації магнітних величини (магнітної індукції і напруженості магнітного поля) через векторний магнітний потенціал.

6. Навести принцип скінчено-різницевої апроксимації рівняння магнітного поля, вираженого через векторний магнітний потенціал (п'ятиточковий сітковий шаблон і відповідний скінчено-різницевий оператор).

7. Навести загальну структуру системи розрахунку магнітного поля методом скінчених різниць.

8. Навести загальний алгоритм і складові програми розрахунку магнітного

поля методом скінчених різниць (описи використовуваних величин, формування сіткової моделі та об'єкту розрахунку, розрахунок вузлових струмів, завдання початкових значень векторного магнітного потенціалу).

9. Навести загальний алгоритм і складові програми розрахунку магнітного поля методом скінчених різниць (організація ітераційного перерахунку векторного магнітного потенціалу, магнітних властивостей феромагнетиків, критерії завершення ітераційного процесу, способи прискорення досягнення кінцевих результатів розрахунку).

10. Навести принцип отримання електромагнітних параметрів електротехнічних пристроїв за результатами розрахунку магнітного поля: магнітні індукція і напруженість, магнітний потік, магнітне потокозчеплення, електромагнітні характеристики, падіння магнітної напруги, індуктивності і взаємоіндуктивності.

11. Навести принцип отримання електромагнітних параметрів електротехнічних пристроїв за результатами розрахунку магнітного поля: електрорушійні сили та їхній гармонічний склад, електромагнітні і електродинамічні зусилля, електромагнітний момент, енергія магнітного поля.

## **Розділ 6. Основні поняття та рівняння електростатичного поля та електричного поля постійного струму**

Способи збудження та зображення електростатичних полів, відповідні величини та їхній взаємозв'язок, властивості матеріалів, що впливають на електричне поле. Характеристика задач розрахунку електростатичного поля та основи їх розв'язання: теорема Гаусса, рівняння системи Максвелла. Рівняння Пуассона і Лапласа для електростатичного поля. Провідники в електростатичному полі і умови на межі провідник-діелектрик.

Умови для електричного поля на межі діелектриків з різними властивостями. Енергія електричного поля. Методи розрахунку електростатичних полів (метод накладання, метод дзеркальних зображень, прикладення теореми Гаусса). Електричне поле зарядженої діелектричної кулі, двохпровідникової лінії. Електричне поле зарядженої осі, двох заряджених паралельних осей та зарядженої осі, що розташована поблизу електропровідної площини.

Стационарне електричне поле постійного струму в провідниковому середовищі і відповідні рівняння. Закони Ома і Джоуля-Ленца в диференційній формі. Перехід струму з середовища в середовище з різною електропровідністю.

### **Контрольні запитання**

1. Наведіть способи збудження та зображення електростатичних полів, відповідні величини та їхній взаємозв'язок, властивості матеріалів, що впливають на електричне поле.
2. Охарактеризуйте задачі розрахунку електростатичного поля та наведіть основи їх розв'язання: теорема Гаусса, рівняння системи Максвелла. Рівняння Пуассона і Лапласа для електростатичного поля.
3. Наведіть характеристику провідників в електростатичному полі і умови на межі провідник-діелектрик.
4. Наведіть умови для електричного поля на межі діелектриків з різними властивостями.
5. Дайте визначення енергії електричного поля.
6. Наведіть сутність методів розрахунку електростатичних полів (метод накладання, метод дзеркальних зображень, прикладення теореми Гаусса).
7. Наведіть принцип розрахунку електричного поля зарядженої діелектричної кулі, двохпровідникової лінії.
8. Наведіть принцип розрахунку електричного поля зарядженої осі, двох заряджених паралельних осей та зарядженої осі, що розташована поблизу електропровідної площини.
9. Наведіть характеристику стаціонарного електричного поля постійного струму в провідниковому середовищі і відповідні рівняння.
10. Наведіть закони Ома і Джоуля-Ленца в диференційній формі.
11. Наведіть принцип переходу струму з середовища в середовище з різною електропровідністю.

### **Розділ 7. Основні рівняння та принципи розрахунку електромагнітних полів та процесів**

Чисельні розрахунки перехідних процесів в нелінійних електромагнітних системах (метод Ейлера – Коши і метод Рунне – Кутта четвертого порядку).

Квазістаціонарне магнітне поле та відповідні рівняння з системи Максвелла.

Векторний електричний потенціал та вираз через нього рівняння вихрових струмів в тонкій пластині (без врахування реакції).

Змінне електромагнітне поле та рівняння системи Максвелла, що його описують. Закон електромагнітної індукції та його зв'язок з рівнянням системи Максвелла. Узагальнений закон електромагнітної індукції.

Теорема Умова – Пойнтінга. Плоска електромагнітна хвиля в діелектричному і електропровідному середовищі. Явище поверхневого ефекту. Поверхневий ефект в циліндричному провіднику. Змінне магнітне поле в плоскому сталевому листі.

Принцип розрахунку вихрових струмів в електропровідних елементах конструкцій з урахуванням їхньої реакції.

### **Контрольні запитання**

1. Наведіть принцип чисельних розрахунків перехідних процесів в нелінійних електромагнітних системах (метод Ейлера – Коши і метод Рунне – Кутта четвертого порядку).

2. Наведіть визначення квазістаціонарного магнітного поля та наведіть відповідні рівняння з системи Максвелла.

3. Наведіть визначення векторного електричного потенціалу та виразіть через нього рівняння вихрових струмів в тонкій пластині (без врахування реакції).

4. Наведіть визначення змінного електромагнітного поля та наведіть рівняння системи Максвелла, що його описують.

5. Наведіть закон електромагнітної індукції та його зв'язок з рівнянням системи Максвелла та узагальнений закон електромагнітної індукції.

6. Наведіть теорему Умова – Пойнтінга.

7. Наведіть характеристику плоскій електромагнітній хвилі в діелектричному і електропровідному середовищі.

8. Наведіть визначення явищу поверхневого ефекту.

9. Наведіть сутність поверхневого ефекту в циліндричному провіднику.

10. Наведіть принцип розрахунку змінного магнітного поля в плоскому сталевому листі.

11. Наведіть принцип розрахунку вихрових струмів в електропровідних елементах конструкцій з урахуванням їхньої реакції.

### 3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Курсова робота охоплює 1, 2, 3-й розділи дисципліни та складається з чотирьох контрольних питань та чотирьох розрахункових завдань.

Номер варіанта студента відповідає номеру за списком в журналі академічної групи (табл. 1). Курсова робота зараховується після співбесіди з викладачем.

Під час підготовки курсової роботи рекомендується користуватися джерелами інформації [1–7] або іншими, знайденими самостійно, які обов'язково привести наприкінці курсової роботи.

Таблиця 1 – Розподіл питань та розрахункових завдань за варіантами

Но- мер варі- анта	Номер питань			Номер розрахункового завдання			
	з розділу 1	з розділу 2	з розділу 3	розрахун- кове за- вдання 1	розрахун- кове за- вдання 2	розрахун- кове за- вдання 3	розрахун- кове за- вдання 4
1	1, 12	1	1	1	1	1	1
2	2, 13	2	2	2	2	2	2
3	3, 14	3	3	3	3	3	3
4	4, 15	4	4	4	4	4	4
5	5, 16	5	5	5	5	5	5
6	6, 17	6	6	6	6	6	6
7	7, 18	7	7	7	7	7	7
8	8, 19	8	8	8	8	8	8
9	9, 20	9	9	9	9	9	9
10	10, 21	10	10	10	10	10	10
11	11, 22	11	11	11	11	11	11

Відповіді на питання курсової роботи повинні відображати сутність питання, при необхідності містити пояснювальні рисунки. Виведення формул повинно бути послідовним. Всі фізичні величини повинні мати літерні позначення із зазначенням одиниць вимірювання. Літерні позначення величин та одиниці їх вимірювання повинні відповідати діючим стандартам [8].

## 4 РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ

### Розрахункове завдання 1 – Магнітне поле провідників в однорідному просторі

Два паралельних і досить довгих провідника круглого перерізу знаходяться в однорідному немагнітному просторі. Розташування провідників, позначення розмірів  $R_0$ ,  $d$  і напрямки струмів  $I$  наведено на рис.1. Розрахувати і побудувати в єдиному масштабі на фоні розрахункової моделі (рис.1) вектори магнітної індукції  $\vec{B}$  в заданих точках (у кожному варіанті по три точки), використовуючи нумерацію вузлів квадратної сітки  $j, i$ . Числові дані для варіантів наведено в табл.2.

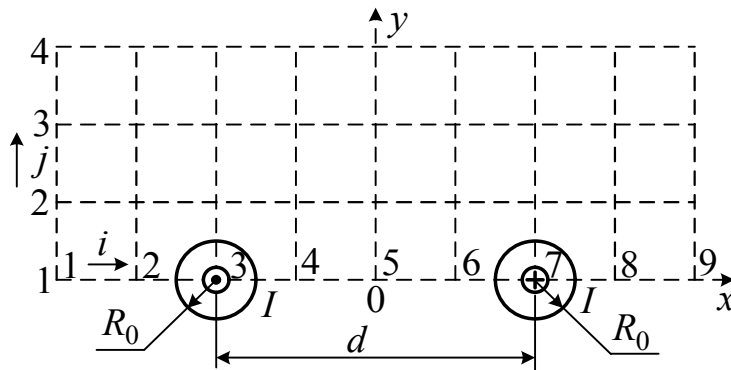


Рисунок 1 – Структура розташування провідників

Таблиця 2 – Дані до розрахункового завдання 1

Варіант	Параметри			Точка					
	$R_0$	$d$	$I$	1		2		3	
	мм	мм	А	$j$	$i$	$j$	$i$	$j$	$i$
1	0,5	4	3	1	1	2	4	4	3
2	0,6	3,6	6	1	2	2	6	3	8
3	0,7	7	7	1	3	3	3	2	7
4	0,8	6,4	6	1	4	3	7	4	9
5	1,0	6	13	1	5	4	2	3	6
6	1,2	12	23	1	6	4	4	2	8
7	1,4	11,2	19	1	7	2	3	3	9
8	1,6	9,6	32	1	8	3	2	4	6
9	1,8	18	50	1	9	3	4	2	2
10	2,0	16	38	2	5	2	1	4	7
11	2,2	13,2	56	3	5	3	1	4	8

*Примітка: масштаби геометричних розмірів та величин магнітної індукції є відокремленими.*



Приклад розв'язання розрахункового завдання 1 для розмірів  $R_0 = 0,5$  мм,  $d = 5$  мм і струму  $I = 4$  А. Напрямки струмів, векторів магнітної індукції та необхідні для розрахунку позначення наведено на рис. 2. Розрахунок наведено для точки з координатами  $j = 3, i = 6$ .

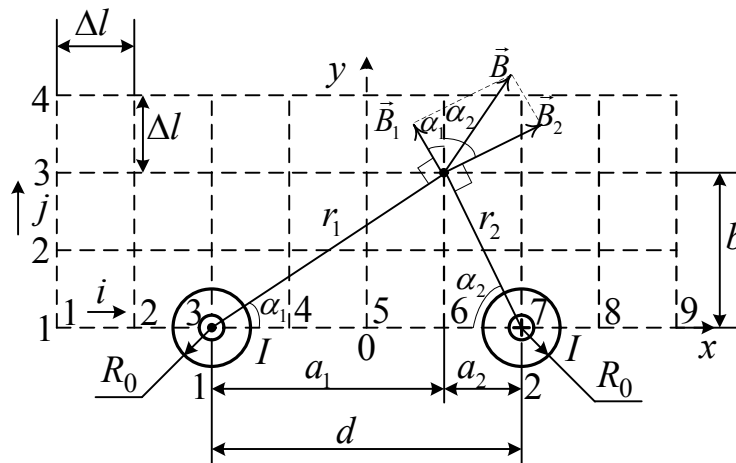


Рисунок 2 – Розташування провідників та векторів магнітної індукції в розрахунковій точці

Розмір однієї клітинки сітки

$$\Delta l = d / 4 = 5 / 4 = 1,25 \text{ мм.}$$

Відстань від поточної точки  $j$  до точки  $j = 1$  по осі  $oy$

$$b = (j - 1) \cdot \Delta l = (3 - 1) \cdot \Delta l = 2 \cdot 1,25 = 2,5 \text{ мм.}$$

Відстань від поточної точки  $i$  до центру першого провідника, тобто до  $i = 3$  по осі  $ox$

$$a_1 = (3 - i) \cdot \Delta l = (3 - 6) \cdot \Delta l = -3 \cdot 1,25 = -3,75 \text{ мм.}$$

Відстань від поточної точки  $i$  до центру другого провідника, тобто до  $i = 7$  по осі  $ox$

$$a_2 = (7 - i) \cdot \Delta l = (7 - 6) \cdot \Delta l = 1 \cdot 1,25 = 1,25 \text{ мм.}$$

Відстань від поточної точки до центру першого провідника

$$r_1 = \sqrt{b^2 + a_1^2} = \sqrt{2,5^2 + (-3,75)^2} = 4,5 \text{ мм.}$$

Відстань від поточної точки до центру другого провідника

$$r_2 = \sqrt{b^2 + a_2^2} = \sqrt{2,5^2 + 1,25^2} = 2,8 \text{ мм.}$$

В розрахунках при підстановці значень струму з напрямом «до нас» приймається знак «+», з напрямом «від нас» – «-».

Величина вектора магнітної індукції  $\vec{B}_1$  в поточній точці від дії струму першого провідника

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (-4)}{2\pi \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}} = -1,78 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Величина вектора магнітної індукції  $\vec{B}_2$  в поточній точці від дії струму другого провідника

$$B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4}{2\pi \cdot 2,8 \cdot 10^{-3}} = 2,86 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Величина проекції вектора  $\vec{B}_1$  на вісь  $ox$

$$B_{1x} = B_1 \cdot \sin \alpha_1 = \frac{B_1 \cdot b}{r_1} = \frac{-1,78 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^{-3}} = -0,99 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Величина проекції вектора  $\vec{B}_2$  на вісь  $ox$

$$B_{2x} = B_2 \cdot \sin \alpha_2 = \frac{B_2 \cdot b}{r_2} = \frac{2,86 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{2,8 \cdot 10^{-3}} = 2,55 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Величина проекції вектора  $\vec{B}_1$  на вісь  $oy$

$$B_{1y} = B_1 \cdot \cos \alpha_1 = \frac{B_1 \cdot a_1}{r_1} = \frac{-1,78 \cdot 10^{-4} \cdot (-3,75) \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^{-3}} = 1,48 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Величина проекції вектора  $\vec{B}_2$  на вісь  $oy$

$$B_{2y} = B_2 \cdot \cos \alpha_2 = \frac{B_2 \cdot a_2}{r_2} = \frac{2,86 \cdot 10^{-4} \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}}{2,8 \cdot 10^{-3}} = 1,28 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Сума проекцій векторів магнітної індукції по осі  $ox$

$$B_x = B_{1x} + B_{2x} = -0,99 \cdot 10^{-4} + 2,55 \cdot 10^{-4} = 1,56 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Сума проекцій векторів магнітної індукції по осі  $oy$

$$B_y = B_{1y} + B_{2y} = 1,48 \cdot 10^{-4} + 1,28 \cdot 10^{-4} = 2,76 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Величина вектора магнітної індукції від дії двох провідників

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \sqrt{(1,56 \cdot 10^{-4})^2 + (2,76 \cdot 10^{-4})^2} = 2,82 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

## Розрахункове завдання 2 – Метод магнітного кола

Для заданого варіанту електромагнітної системи потрібно розв'язати методом магнітного кола пряму задачу: визначити струм котушки  $I$ , знаючи магнітну індукцію в повітряному проміжку  $B_\delta$ . На рис. 3 представлена електромагнітна система, що складається з шихтованого сталевго осердя з двома проміжками  $\delta$  і намотаної на нього котушки, яка живиться постійним струмом  $I$  та має  $N$  витків. Передбачається, що по магнітопроводу замикається основний магнітний потік  $\Phi$ , а на тій ділянці, де розташована котушка, ще проходить магнітний потік розсіяння  $\Phi_\sigma$ .

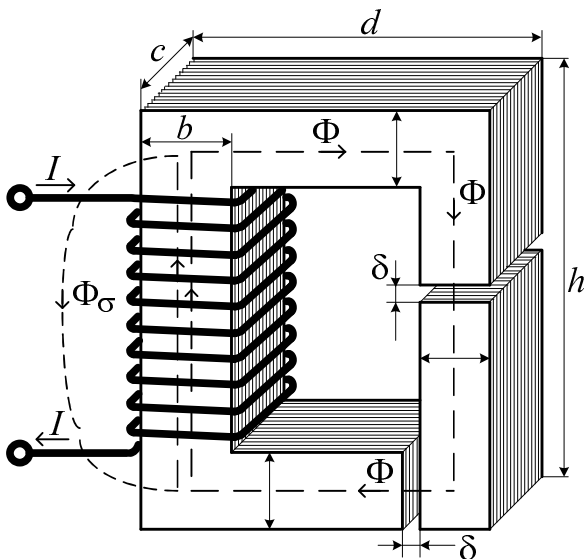


Рисунок 3 – Електромагнітна система

на рис. 3 лінійні розміри повинні доповнитися у відповідних місцях зазначеними на рис. 4 позначеннями  $a$  і (або)  $b$ .

Числові дані для варіантів електромагнітної системи, що отримується перетворенням рис. 3 до рис. 4, представлені в табл.3. Крім вже згаданих величин, тут також зазначені:  $k_{Fe}$  – коефіцієнт заповнення осердя сталлю;  $k_\sigma$  – коефіцієнт розсіювання магнітного потоку, який враховує співвідношення магнітних потоків на ділянці осердя, де розташована котушка:  $k_\sigma = (\Phi + \Phi_\sigma)/\Phi$ .

На рис. 4 задані варіанти структури осердь в припущенні, що вони відповідають системі на рис. 3, але відрізняються розташуванням проміжків. Котушки представляється її перерізами – прямокутниками, які заштриховані. Варіант рис. 4 відповідає варіанту завдання.

Показані на рис. 4 позначення розмірів  $b, c, d, h$  зберігають свої позиції і на рис. 3, а вільні від позначень

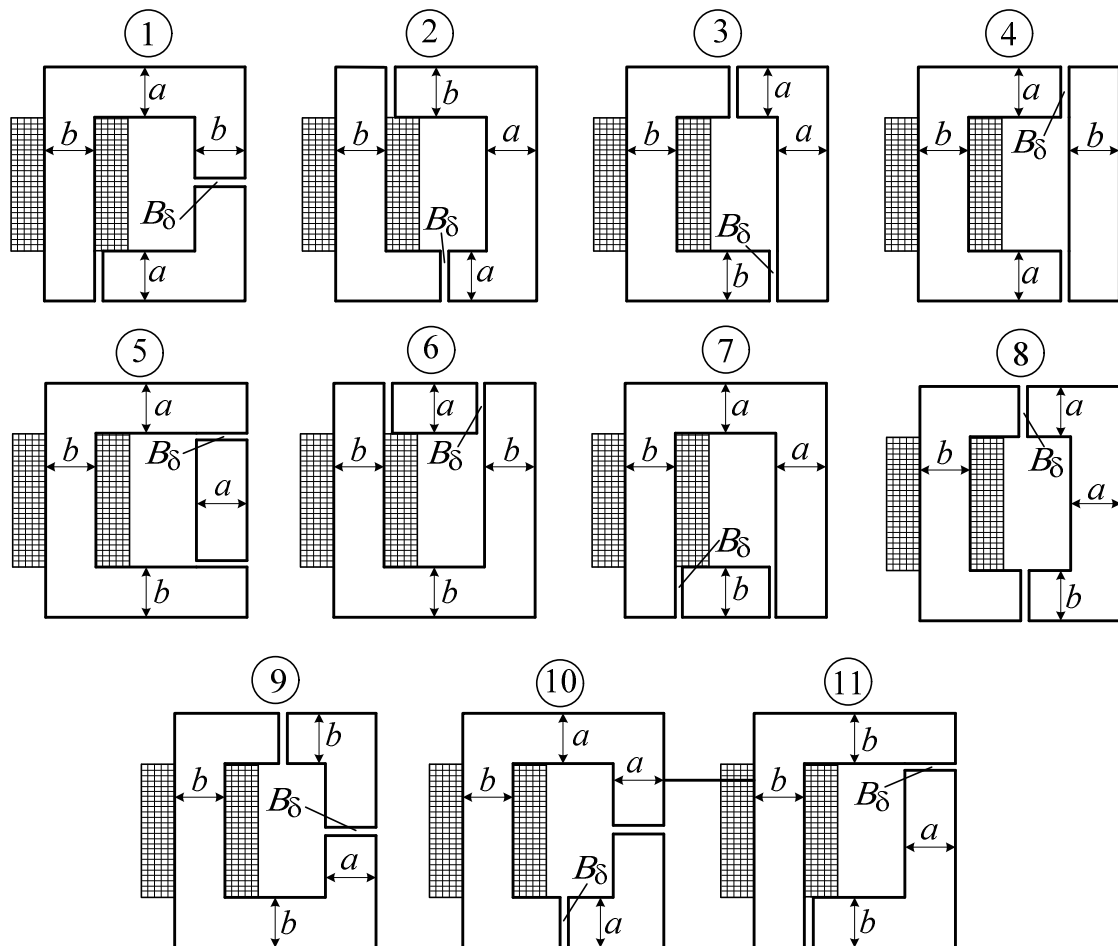


Рисунок 4 – Варіанти електромагнітних систем

Таблиця 3 – Дані до розрахункового завдання 2

Варіанти завдання (рис. 4)	Розміри осердя, мм						$N$	$k_{Fe}$	$k_{\sigma}$	$B_{\delta}$ , Тл
	$d$	$h$	$a$	$b$	$c$	$\delta$				
1	105	95	23	26	20	1,0	750	0,92	1,10	1,1
2	115	100	25	28	22	1,2	800	0,93	1,05	1,15
3	120	105	27	30	24	1,4	850	0,94	1,06	1,2
4	130	110	29	32	26	1,6	900	0,95	1,07	1,25
5	135	115	31	34	28	1,8	950	0,92	1,08	1,3
6	140	120	33	36	30	2,0	1000	0,93	1,09	1,1
7	110	90	24	27	21	1,1	700	0,94	1,10	1,2
8	115	95	26	29	23	1,3	750	0,95	1,05	1,3
9	125	100	28	31	25	1,5	800	0,92	1,06	1,15
10	135	110	30	33	27	1,7	850	0,93	1,07	1,4
11	140	120	32	35	29	1,9	900	0,94	1,08	1,1

Крива намагнічування  $B(H)$  сталі марки ст.2, з якої виконане осердя, в числовій формі представлена в табл.4 (до значення магнітної індукції 0,5 Тл та після 2,45 Тл крива намагнічування подається відрізками прямої лінії).

Таблиця 4 – Крива намагнічування сталі марки ст.2

$B$ , Тл	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
$H$ , А/м	250	275	300	320	343	370	401	436	477	524
$B$ , Тл	1,0	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45
$H$ , А/м	577	636	702	777	872	1000	1150	1330	1550	1840
$B$ , Тл	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	1,85	1,9	1,95
$H$ , А/м	2280	3000	4000	5350	7000	9350	11900	15150	19200	24300
$B$ , Тл	2,0	2,05	2,1	2,15	2,2	2,25	2,3	2,35	2,4	2,45
$H$ , А/м	30700	38400	47000	58000	71500	93000	120000	156000	194000	233000

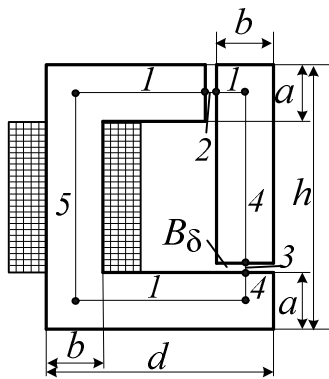


Рисунок 5 – Приклад структури електромагнітної системи з позначенням однорідних ділянок

востей матеріалу;

- постійність площі поперечного перерізу;
- постійність величини магнітного потоку.

Для даної конструкції магнітопроводу їх кількість становитиме 5.

Приклад розв'язання розрахункового завдання 2 для значень, наведених на рис. 5 та табл. 5.

У прямій задачі задається магнітна індукція  $B_\delta$ , а потрібно знайти струм  $I$  котушки.

По середній лінії магнітопровод розбивається на  $k$  однорідних ділянок з довжинами  $l_k$ , враховуючи ознаки:

– постійність магнітних власти-

Таблиця 5 – Дані для прикладу розрахункового завдання 2

Розміри осердя, мм						$N$	$k_{Fe}$	$k_\sigma$	$B_\delta$
$d$	$h$	$a$	$b$	$c$	$\delta$	–	–	–	Тл
120	105	27	29	25	1,3	850	0,92	1,08	1,2

На кожній ділянці магнітного кола обчислюється площа його поперечного перерізу  $S_k$  ( $k$  – номер ділянки). Якщо ділянка є повітряним проміжком, то для розрахунку габаритної площі поперечного перерізу враховується випучування силових ліній магнітного поля. В цьому разі площа поперечного перерізу  $S_{\delta k} = (a + \delta) \cdot (c + \delta)$  або  $S_{\delta k} = (b + \delta) \cdot (c + \delta)$ . Якщо ділянка знаходиться на шихтованій частині магнітопроводу, враховується безпосередньо сумарна площа перерізу сталевих листів  $S_k = a \cdot c \cdot k_{Fe}$  або  $S_k = b \cdot c \cdot k_{Fe}$ .

Площа поперечного перерізу на кожній ділянці магнітопроводу

$$S_1 = a \cdot c \cdot k_{Fe} = 0,027 \cdot 0,025 \cdot 0,92 = 0,000621 \text{ м}^2;$$

$$S_{\delta 2} = (a + \delta) \cdot (c + \delta) = (0,027 + 0,0013) \cdot (0,025 + 0,0013) = 0,000744 \text{ м}^2;$$

$$S_{\delta 3} = (b + \delta) \cdot (c + \delta) = (0,029 + 0,0013) \cdot (0,025 + 0,0013) = 0,000797 \text{ м}^2;$$

$$S_4 = S_5 = b \cdot c \cdot k_{Fe} = 0,029 \cdot 0,025 \cdot 0,92 = 0,000667 \text{ м}^2.$$

Крізь проміжок та інші частини магнітопроводу проходить основний магнітний потік

$$\Phi = B_{\delta 3} \cdot S_{\delta 3} = 1,2 \cdot 0,000797 = 0,000956 \text{ Вб.}$$

На тій ділянці, де розташовується котушка, до основного потоку додається відносно невеликий потік розсіювання  $\Phi_{\sigma}$ . Тоді тут повний магнітний потік

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi + \Phi_{\sigma} = k_{\sigma} \Phi = 1,08 \cdot 0,000956 = 0,001033 \text{ Вб.}$$

На кожній ділянці розраховується магнітна індукція,  $B_k = \frac{\Phi_k}{S_k}$ :

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{0,000956}{0,000621} = 1,54 \text{ Тл,}$$

$$B_4 = \frac{\Phi}{S_4} = \frac{0,000956}{0,000667} = 1,43 \text{ Тл,}$$

$$B_{\delta 2} = \frac{\Phi}{S_{\delta 2}} = \frac{0,000956}{0,000744} = 1,28 \text{ Тл,}$$

$$B_5 = \frac{\Phi_{\Sigma}}{S_5} = \frac{0,001033}{0,000667} = 1,55 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля:

- в повітряних проміжках розраховується як  $H_k = \frac{B_k}{\mu_0}$ :

$$H_2 = \frac{B_{\delta 2}}{\mu_0} = \frac{1,28}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 1019 \cdot 10^3 \text{ А/м; } H_3 = \frac{B_{\delta 3}}{\mu_0} = \frac{1,2}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 955 \cdot 10^3 \text{ А/м;}$$

• для феромагнітних ділянок визначається за кривими намагнічування відповідних матеріалів (табл. 4), тобто  $H_k = H(B_k)$ :

$$H_1 = 2980 \text{ А/м}; \quad H_4 = 1815 \text{ А/м}; \quad H_5 = 3000 \text{ А/м}.$$

Довжини однорідних ділянок

$$l_1 = 2 \cdot d - 2 \cdot b - \delta = 2 \cdot 0,120 - 2 \cdot 0,029 - 0,0013 = 0,1807 \text{ м};$$

$$l_2 = l_3 = \delta = 0,0013 \text{ м};$$

$$l_4 = h - a - \delta = 0,105 - 0,027 - 0,0013 = 0,0767 \text{ м};$$

$$l_5 = h - a = 0,105 - 0,027 = 0,078 \text{ м}.$$

На підставі другого закону Кірхгофа для магнітного кола визначається необхідна МРС котушки і її струм:

$$F = \sum_{k=1}^n H_k l_k = 2980 \cdot 0,1807 + 10191 \cdot 10^3 \cdot 0,0013 + 955 \cdot 10^3 \cdot 0,0013 +$$

$$+ 1815 \cdot 0,0767 + 3000 \cdot 0,078 = 3579,58 \text{ А}.$$

$$I = F / N = 3578,58 / 850 = 4,21 \text{ А}.$$

### Розрахункове завдання 3 – Магнітне поле на осі кругового витка

На рис. 6 зображено в двох проекціях круговий виток, по якому проходить струм  $I$ . Виток розташований в однорідному немагнітному просторі і має середній радіус  $a$ .

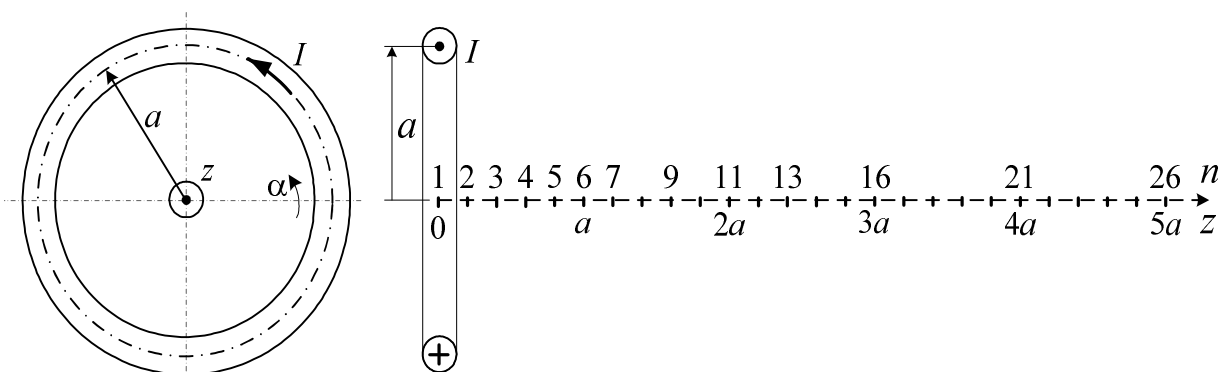


Рисунок 6 – Круговий виток

Необхідно розрахувати і побудувати графік розподілу магнітної індукції  $B_z$

(z) на осі z кругового витка при заданих в табл.6 параметрах.

Рекомендується координату z змінювати від 0 до значення, при якому досягається  $B_z = 0,05 B_{z0}$ , де  $B_{z0}$  – магнітна індукція в центрі витка. Орієнтовна дислокація і номера n розрахункових точок 1,2,3... показана на рис.6.

Таблиця 6 – Вихідні дані щодо розрахункового завдання 3

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
a, м	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
I, А	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400

Приклад розв'язання розрахункового завдання 3 для значень  $I = 1000\text{А}$ ,  $a = 0,1\text{ м}$ .

Величина магнітної індукції  $B_z$  для координати  $z = 0\text{ м}$

$$B_{z0} = \frac{\mu_0 I a^2}{2(a^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 0,1^2}{2(0,1^2 + 0^2)^{3/2}} = 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ Тл.}$$

Значення величин магнітної індукції  $B_z$ , що відповідають координатам z, зведено до табл. 7.

Таблиця 7 – Залежність магнітної індукції  $B_z$  від координати z та номеру n розрахункових точок

n	1	2	3	4	5	6	7
z, м	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12
$B_z$ , мТл	6,28	5,92	5,03	3,96	2,99	2,22	1,65
n	9	11	13	16	21	26	
z, м	0,16	0,2	0,24	0,3	0,4	0,5	
$B_z$ , мТл	0,93	0,56	0,35	0,19	0,09	0,05	

Графік розподілу магнітної індукції  $B_z(z)$  на осі z, що проходить через центр витка, надано на рис.7.



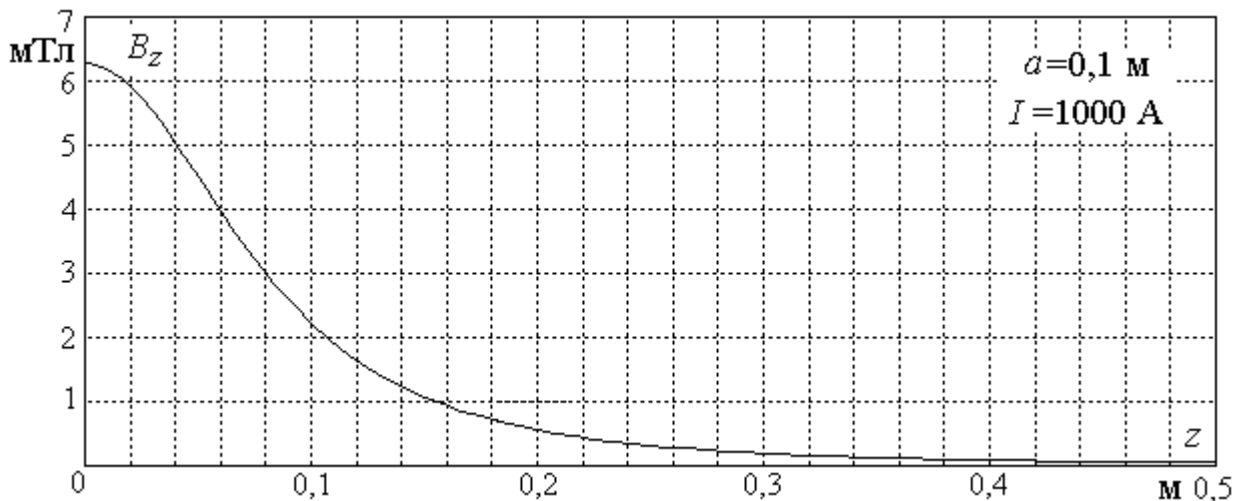


Рисунок 7 – Розподіл магнітної індукції  $B_z$  на осі  $z$

#### Розрахункове завдання 4 – Магнітне поле на осі прямокутного витка

На рис.8 зображено прямокутний виток з розмірами  $d \times a$  і струмом  $I$ . Виток розташований в однорідному немагнітному просторі.

Необхідно згідно наданих в табл.8 параметрів розрахувати і побудувати графік розподілу магнітної індукції  $B_y$  ( $y$ ) на лінії  $c-b$ , яка перпендикулярна площині витка і проходить через його центр.

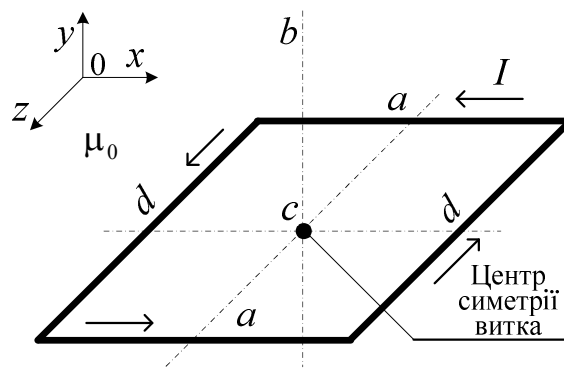


Рисунок 8 – Прямокутний виток

Рекомендується координату  $y$  змінювати від точки  $c$  до такого значення, при якому досягається  $B_y = 0,05 B_{yc}$ , де  $B_{yc}$  – магнітна індукція в центрі витка.

Таблиця 8 – Вихідні дані щодо розрахункового завдання 4

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$a$ , м	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
$d$ , м	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,28	0,30	0,32	0,20	0,22	0,24
$I$ , А	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400

Сторони довжиною  $a$  орієнтовані паралельно осі  $x$ , а сторони довжиною  $d$  –

паралельно осі  $z$  (рис.9). Конкретне положення контуру забезпечується фіксацією координат кута контуру, найближчого до початку системи координат  $(x_0, y_0, z_0)$ . Завдання полягає в отриманні значень магнітної індукції в довільній точці простору з координатами  $(x, y, z)$ . Використовуючи згадані координати і розміри сторін контуру, можна отримати значення складових індукції  $B_x, B_y, B_z$ . Кінцеве вираження магнітної індукції від контуру в цілому можна отримати на основі накладення полів окремих сторін контуру з використанням моделей з рис. 8 і рис. 9, які мають повторювані частини.

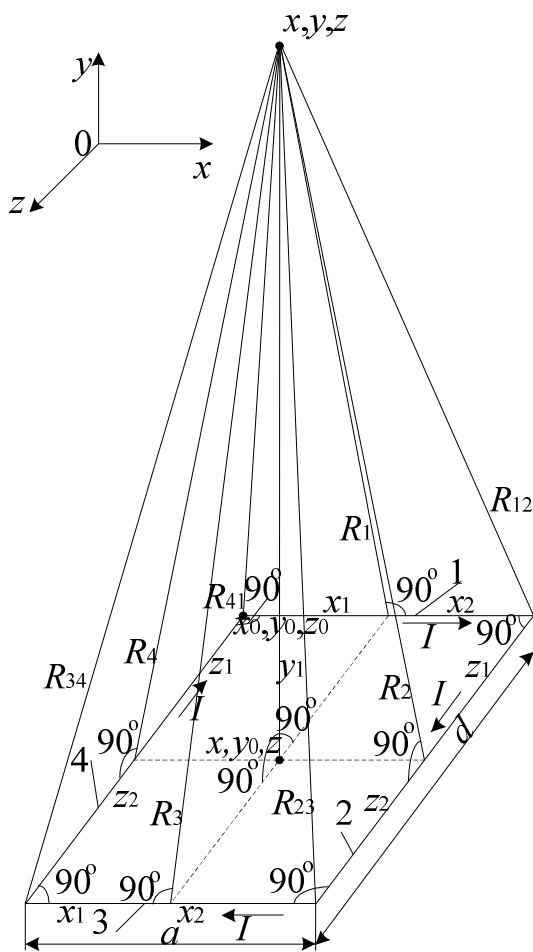


Рисунок 9 – Прямокутний контур зі струмом

дення полів окремих сторін контуру з використанням моделей з рис. 8 і рис. 9, які мають повторювані частини.

*Приклад розв'язання розрахункового завдання 4 для значень  $I = 550$  А,  $a = 0,1$  м,  $d = 0,2$  м.*

Розрахунок величини магнітної індукції  $B_y$  для координати  $y = 0,4$ :

– для розрахунку приймаємо, що координати вершини кута контуру зафіксовані в початку системи координат, тобто  $x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 0$ . Тоді центр витка матиме координати  $x = a/2 = 0,1/2 = 0,05$  м,  $y = y_0 = 0, z = d/2 = 0,2/2 = 0,1$  м;

– довжини частин сторін прямокутного витка

$$x_1 = x - x_0 = 0,05 - 0 = 0,05 \text{ м};$$

$$z_1 = z - z_0 = 0,1 - 0 = 0,1 \text{ м};$$

$$x_2 = a - x_1 = 0,1 - 0,05 = 0,05 \text{ м};$$

$$z_2 = d - z_1 = 0,2 - 0,1 = 0,1 \text{ м};$$

$$y_1 = y - y_0 = 0 - 0 = 0 \text{ м}.$$

– відстані від сторін витка до точки простору, в якій проводиться розрахунок, що необхідні для визначення складових магнітної індукції

$$R_1 = \sqrt{y_1^2 + z_1^2} = \sqrt{0^2 + 0,1^2} = 0,1\text{м}; \quad R_2 = \sqrt{x_2^2 + y_1^2} = \sqrt{0,05^2 + 0^2} = 0,05\text{м};$$

$$R_3 = \sqrt{y_1^2 + z_2^2} = \sqrt{0^2 + 0,1^2} = 0,1\text{м}; \quad R_4 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} = \sqrt{0,05^2 + 0^2} = 0,05\text{м};$$

$$R_{12} = \sqrt{R_1^2 + x_2^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,05^2} = 0,112\text{м};$$

$$R_{23} = \sqrt{R_2^2 + z_2^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,1^2} = 0,112\text{м};$$

$$R_{34} = \sqrt{R_3^2 + x_1^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,05^2} = 0,112\text{м};$$

$$R_{41} = \sqrt{R_4^2 + z_1^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,1^2} = 0,112\text{м}.$$

– модулі магнітної індукції від сторін контуру

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot R_1} \left( \frac{x_1}{R_{41}} + \frac{x_2}{R_{12}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 550}{4\pi \cdot 0,1} \left( \frac{0,05}{0,112} + \frac{0,05}{0,112} \right) = 0,492 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot R_2} \left( \frac{z_1}{R_{12}} + \frac{z_2}{R_{23}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 550}{4\pi \cdot 0,05} \left( \frac{0,1}{0,112} + \frac{0,1}{0,112} \right) = 1,968 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_3 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot R_3} \left( \frac{x_2}{R_{23}} + \frac{x_1}{R_{34}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 550}{4\pi \cdot 0,1} \left( \frac{0,05}{0,112} + \frac{0,05}{0,112} \right) = 0,492 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_4 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot R_4} \left( \frac{z_2}{R_{34}} + \frac{z_1}{R_{41}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 550}{4\pi \cdot 0,05} \left( \frac{0,1}{0,112} + \frac{0,1}{0,112} \right) = 1,968 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

– складові магнітної індукції від сторін контуру

$$B_{x2} = -B_2 \frac{y_1}{R_2} = -1,968 \cdot 10^{-3} \frac{0}{0,05} = 0; \quad B_{x4} = B_4 \frac{y_1}{R_4} = 1,968 \cdot 10^{-3} \frac{0}{0,05} = 0;$$

$$B_{y1} = -B_1 \frac{z_1}{R_1} = -0,492 \cdot 10^{-3} \frac{0,1}{0,1} = -0,492 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{y2} = -B_2 \frac{x_2}{R_2} = -1,968 \cdot 10^{-3} \frac{0,1}{0,1} = -1,968 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{y3} = -B_3 \frac{z_2}{R_3} = -0,492 \cdot 10^{-3} \frac{0,1}{0,1} = -0,492 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{y4} = -B_4 \frac{x_1}{R_4} = -1,968 \cdot 10^{-3} \frac{0,05}{0,05} = -1,968 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{z1} = B_1 \frac{y_1}{R_1} = 0,492 \cdot 10^{-3} \frac{0}{0,1} = 0; \quad B_{z3} = -B_3 \frac{y_1}{R_3} = 0,492 \cdot 10^{-3} \frac{0}{0,1} = 0.$$

– складові і модуль магнітної індукції від контуру в цілому

$$B_x = B_{x_2} + B_{x_4} = 0 + 0 = 0;$$

$$B_y = B_{y_1} + B_{y_2} + B_{y_3} + B_{y_4} = -0,492 \cdot 10^{-3} - 1,968 \cdot 10^{-3} - \\ -0,492 \cdot 10^{-3} - 1,968 \cdot 10^{-3} = -4,92 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_z = B_{z_1} + B_{z_3} = 0 + 0 = 0;$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} = \sqrt{0^2 + (-4,92 \cdot 10^{-3})^2 + 0^2} = 4,92 \cdot 10^{-3} \text{Тл}.$$

Розрахунок величини магнітної індукції  $B_y$  для координати  $y = 0,4$ :

– для розрахунку приймаємо, що координати вершини кута контуру зафіксовані в початку системи координат, тобто  $x_0 = 0$ ,  $y_0 = 0$ ,  $z_0 = 0$ . Тоді розрахункова точка матиме координати  $x = a/2 = 0,1/2 = 0,05$  м,  $y = 0,4$  м,  $z = d/2 = 0,2/2 = 0,1$  м;

– довжини частин сторін прямокутного витка

$$x_1 = x - x_0 = 0,05 - 0 = 0,05 \text{м}; \quad z_1 = z - z_0 = 0,1 - 0 = 0,1 \text{м}; \\ x_2 = a - x_1 = 0,1 - 0,05 = 0,05 \text{м}; \quad z_2 = d - z_1 = 0,2 - 0,1 = 0,1 \text{м}; \\ y_1 = y - y_0 = 0,4 - 0 = 0,4 \text{м}.$$

– відстані від сторін витка до точки простору, в якій проводиться розрахунок, що необхідні для визначення складових магнітної індукції

$$R_1 = \sqrt{y_1^2 + z_1^2} = \sqrt{0,4^2 + 0,1^2} = 0,412 \text{м}; \quad R_2 = \sqrt{x_2^2 + y_1^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,4^2} = 0,403 \text{м}; \\ R_3 = \sqrt{y_1^2 + z_2^2} = \sqrt{0,4^2 + 0,1^2} = 0,412 \text{м}; \quad R_4 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,4^2} = 0,403 \text{м}; \\ R_{12} = \sqrt{R_1^2 + x_2^2} = \sqrt{0,412^2 + 0,05^2} = 0,415 \text{м}; \\ R_{23} = \sqrt{R_2^2 + z_2^2} = \sqrt{0,403^2 + 0,1^2} = 0,415 \text{м}; \\ R_{34} = \sqrt{R_3^2 + x_1^2} = \sqrt{0,412^2 + 0,05^2} = 0,415 \text{м}; \\ R_{41} = \sqrt{R_4^2 + z_1^2} = \sqrt{0,403^2 + 0,1^2} = 0,415 \text{м}.$$

– модулі магнітної індукції від сторін контуру

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot R_1} \left( \frac{x_1}{R_{41}} + \frac{x_2}{R_{12}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 550}{4\pi \cdot 0,412} \left( \frac{0,05}{0,415} + \frac{0,05}{0,415} \right) = 0,032 \cdot 10^{-3} \text{Тл}; \\ B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot R_2} \left( \frac{z_1}{R_{12}} + \frac{z_2}{R_{23}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 550}{4\pi \cdot 0,403} \left( \frac{0,1}{0,415} + \frac{0,1}{0,415} \right) = 0,066 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_3 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot R_3} \left( \frac{x_2}{R_{23}} + \frac{x_1}{R_{34}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 550}{4\pi \cdot 0,412} \left( \frac{0,05}{0,415} + \frac{0,05}{0,415} \right) = 0,032 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_4 = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot R_4} \left( \frac{z_2}{R_{34}} + \frac{z_1}{R_{41}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 550}{4\pi \cdot 0,403} \left( \frac{0,1}{0,415} + \frac{0,1}{0,415} \right) = 0,066 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

– складові магнітної індукції від сторін контуру

$$B_{x2} = -B_2 \frac{y_1}{R_2} = -0,066 \cdot 10^{-3} \frac{0,4}{0,403} = -0,065 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{x4} = B_4 \frac{y_1}{R_4} = 0,066 \cdot 10^{-3} \frac{0,4}{0,403} = 0,065 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{y1} = -B_1 \frac{z_1}{R_1} = -0,032 \cdot 10^{-3} \frac{0,1}{0,412} = -0,008 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{y2} = -B_2 \frac{x_2}{R_2} = -0,066 \cdot 10^{-3} \frac{0,05}{0,403} = -0,008 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{y3} = -B_3 \frac{z_2}{R_3} = -0,032 \cdot 10^{-3} \frac{0,1}{0,412} = -0,008 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{y4} = -B_4 \frac{x_1}{R_4} = -0,066 \cdot 10^{-3} \frac{0,05}{0,403} = -0,008 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{z1} = B_1 \frac{y_1}{R_1} = 0,033 \cdot 10^{-3} \frac{0,4}{0,412} = 0,032 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_{z3} = -B_3 \frac{y_1}{R_3} = -0,033 \cdot 10^{-3} \frac{0,4}{0,412} = -0,032 \cdot 10^{-3} \text{Тл}.$$

– складові і модуль магнітної індукції від контуру в цілому

$$B_x = B_{x2} + B_{x4} = -0,065 \cdot 10^{-3} + 0,065 \cdot 10^{-3} = 0;$$

$$B_y = B_{y1} + B_{y2} + B_{y3} + B_{y4} = -0,008 \cdot 10^{-3} - 0,008 \cdot 10^{-3} - 0,008 \cdot 10^{-3} - 0,008 \cdot 10^{-3} = -0,032 \cdot 10^{-3} \text{Тл};$$

$$B_z = B_{z1} + B_{z3} = 0,032 \cdot 10^{-3} - 0,032 \cdot 10^{-3} = 0;$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} = \sqrt{0^2 + (-0,032 \cdot 10^{-3})^2 + 0^2} = 0,032 \cdot 10^{-3} \text{Тл}.$$

Значення величин магнітної індукції  $B_y$  для координат  $y$  зведено до табл. 9.

Графік розподілу модуля магнітної індукції  $B_y(y)$  по осі  $y$ , що проходить крізь центр витка, наведено на рис. 10. Зауважимо, що розподіл магнітної індукції симетричний відносно центру витка.

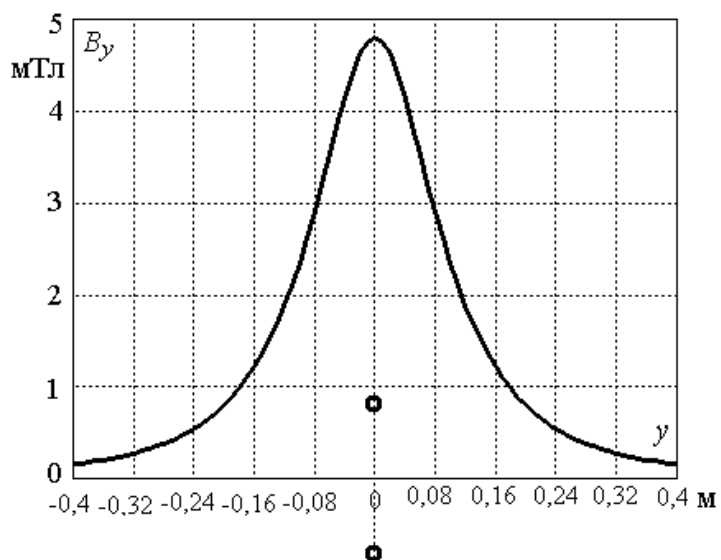


Рисунок 10 – Розподіл магнітної індукції  $B_y$  на осі  $y$

Таблиця 9 – Залежність магнітної індукції  $B_y$  від координати  $y$

$y$ , м	0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,15
$B_y$ , мТл	4,92	3,976	2,515	1,528	0,953	0,416
$y$ , м	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	
$B_y$ , мТл	0,209	0,1172	0,0715	0,0466	0,032	

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Теория и практика электромагнитных полей и процессов в электротехнике: учебное пособие / В. И. Милых. – Харьков: ФЛП Панов А. Н., 2018. – 374 с. – На рус. яз.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973.
3. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники в 2-х т. Т.2 / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. – Энергоиздат, 1981.
4. Теоретические основы электротехники. Том II. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля / под ред. П.А. Ионкина. – М.: Высшая школа, 1976.
5. Бинс К. Анализ и расчёт электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон. – М.: Энергия, 1976.
6. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка / В.І. Мілих, О.О. Шавьолкін. – К.: Каравела, 2008.
7. Сборник задач по ТОЭ / под ред. Бессонова Л.А. – М.: Высшая школа, 1980.
8. Мілих В.І. Літерні позначення величин та параметрів електричних машин: методичні вказівки до використання в навчальному процесі кафедри «Електричні машини» для студентів і викладачів електротехнічних спеціальностей / Укладач В.І. Мілих. – Харків: НТУ «ХП», 2007.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Структура дисципліни.....	5
2 Типова програма та контрольні запитання.....	5
3 Методичні вказівки до виконання курсової роботи.....	15
4 Розрахункові завдання.....	16
Перелік джерел інформації.....	31

Навчальне видання

# ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ І ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

ТИПОВА ПРОГРАМА, ЗАВДАННЯ,  
КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ  
для студентів спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
освітньо-професійної програми «Електричні машини» заочної форми навчання

Укладачі МІЛИХ Володимир Іванович  
ШИЛКОВА Лариса Василівна

Роботу до видання рекомендував проф. Долбня В.Т.  
В авторській редакції

План 2019 р., п. 113

Підп. до друку 20.02.2019 р. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Папір офсет.

Друк. цифровий. Гарнітура Bookman Old Style. Ум. друк. лист. .

Наклад 50 прим. Зам. № 1/12/2018.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ» Харків – 2, вул. Кирпичова, 2  
Свідоцтво про державну реєстрацію 5478 від 21.08.2017 р.

---

Видавець і виготовлювач: ФОП Панов А.М.

Свідоцтво серії ДК №4847 від 06.05.2015 р.

м. Харків, вул. Жон Мироносиць (Раднаркомівська), 10, оф. 6 тел.+38(057)714-06-74, +38(050)

976-32-87

[copi@vlavke.com.ua](mailto:copi@vlavke.com.ua), <http://vlavke.com.ua>