

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

Методичні вказівки

*до проведення практичних занять  
з дисципліни*

## ***ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ***

*(для студентів 2 курсу денної та 3 курсу заочної форм навчання за  
напрямом підготовки 6.050702 «Електромеханіка» зі спеціальності  
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)*

**Харків – ХНАМГ – 2012**

Методичні вказівки до проведення практичних занять з дисципліни «Електричні апарати» (для студентів 2 курсу денної та 3 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 «Електромеханіка» зі спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод») / Харк. нац. акад. міськ. госп–ва; уклад.: М. І. Кисельов, В. М. Фатеев.– Х.:, 2012. – 32 с.

Укладачі: М. І. Кисельов, В. М. Фатеев

Рецензент: к.т.н., доц. О. Ф. Білоусов

Затверджено на засіданні кафедри ЕТ, протокол № 1 від 28.08.11 р.

## Зміст

	Стор.
Вступ . . . . .	4
1. Завдання з електромагнітних взаємодій, основних законів для розрахунку магнітних кіл . . . . .	5
2. Завдання з елементів магнітного кола та з розрахунку повітряних зазорів. . . . .	14
3. Розрахунок магнітних кіл при постійному струмі без обліку потоків розсіювання. . . . .	18
4. Розрахунок магнітних кіл при змінному струмі . . . . .	22
5. Тягова характеристика (статична). Протидіючі зусилля (навантаження) . . . . .	24
6. Електричні контакти. Опір електричного контакту. Параметри контактних конструкцій. . . . .	26
Додаток. . . . .	30
Список джерел . . . . .	31

## Вступ

Практичні заняття дисципліни «Електричні апарати» (поряд з лабораторними роботами) сприяють кращому розумінню фізичних процесів в магнітних елементах, зв'язком між магнітними і електричними величинами, а також основним закономірностям, що характерні для різних видів магнітних елементів. Розв'язуючи задачі, студенти знайомляться з розрахунком основних видів магнітних елементів. Крім того, виконуючи розрахунки, вони наглядно бачать порядок тих або інших величин (обмотувальні дані, розміри осердя і та ін.).

Електричні апарати являють собою засоби керування електричним струмом. Функції апаратів полягають у керуванні параметрами, що характеризують струм: електричною напругою, електричною потужністю й енергією, частотою електричного струму (напруги), магнітним потоком і т.ін.

Електричні апарати є основними засобами автоматизації й електрифікації народного господарства. Вони набули широкого застосування в енергетиці (електричні станції), у різних схемах управління електроустановками, електротермії, світлотехніці, плазменній техніці і та ін., а також у системах автоматики, телемеханіки, електрозв'язку, радіотехніці, в автоматизованих системах управління, електричному транспорті, тягових підстанціях.

Методичні вказівки призначені для підготовки студентів до практичних занять, а також буде корисним для студентів – заочників, що самостійно опановують курс.

# 1. Завдання з електромагнітної взаємодії, основних законів для розрахунку магнітних кіл

## 1.1. Перший закон Кирхгофа

Розрахунок магнітних кіл подібний розрахунку електричних кіл і заснований на тих же співвідношеннях, що й до розрахунку електричних кіл.

Алгебраїчна сума магнітних потоків у будь-якому вузлі магнітного кола дорівнює нулю (аналогічно першому закону Кирхгофа до електричних кіл):

$$\sum \Phi_i = 0,$$

де  $\Phi_i$  – магнітні потоки  $i$ -ї витки, Вб.

### Завдання 1

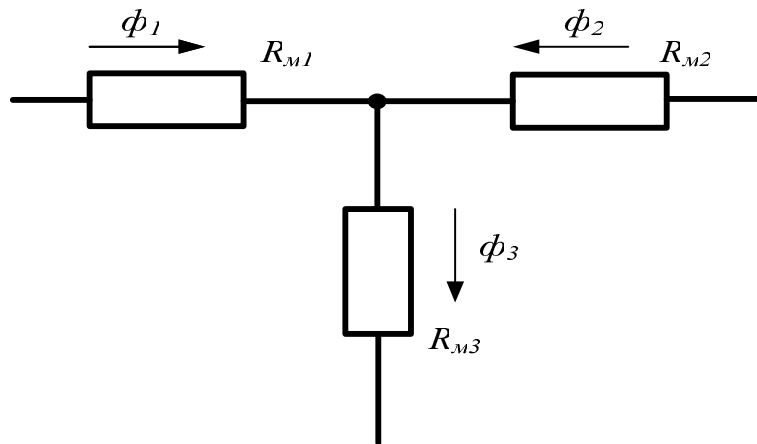


Рис. 1.1 – Схема вузла магнітного кола

Визначити потік  $\Phi_2$  (рис. 1), якщо потік  $\Phi_1 = 0,35$  Вб, а потік  $\Phi_3 = 0,83$  Вб:

### Розв'язання:

Складемо рівняння згідно з першим законом Кирхгофа:

$$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0,$$

Звідси:

$$\Phi_2 = -\Phi_1 + \Phi_3$$

$$\Phi_2 = -0,35 + 0,83 = 0,48 \text{ Вб.}$$

Таким чином визначили потік  $\Phi_2$ .

### Завдання 2

Визначити потік  $\Phi_3$  (рис. 1.2), якщо потік  $\Phi_1 = \Phi_2 = 0,05$  Вб, а потік  $\Phi_4 = 0,07$  Вб:

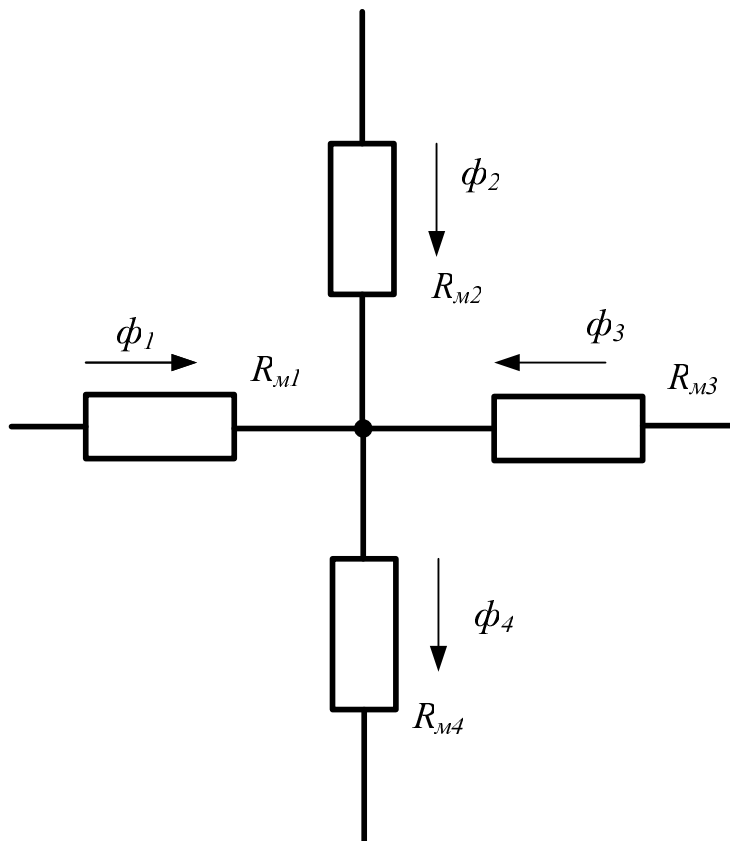


Рис. 1.2 – Схема вузла магнітного кола

### 1.2. Другий закон Кирхгофа

Алгебраїчна сума падінь магнітних потенціалів замкнутого контура магнітного кола дорівнює алгебраїчній сумі магніторушійних сил, що діють у цьому ж контурі (аналогічно другому закону Кирхгофа до електричних кіл):

$$\Sigma I * W = \Sigma \Phi_i * R_{mi} ,$$

де:  $F=I*W$  – магніторушійна сила обмотки з кількістю витків  $W$  при струмі в ній  $I$ .

Під падінням магнітного потенціалу на визначеній ділянці магнітного кола розуміють добуток магнітного потоку  $\Phi$  на магнітний опір  $R_{mi}$  цієї ділянки. Таким чином:

$$F = \Sigma \Phi_i R_{mi} ,$$

де  $R_{i3}$  – магнітний опір ділянки,  $1/Гн$  .

### Завдання 3

$R_{M1} = 5 \cdot 10^5$  D,  
 $R_{M2} = 1 \cdot 10^6$  D,  
 $R_{M3} = 0,7 \cdot 10^6$  D,  
 $R_{M4} = 2,5 \cdot 10^3$  D,  
 $R_{M5} = 1,0 \cdot 10^3$  D,  
 $R_{M6} = 0,3 \cdot 10^3$  D,  
 $R_{M7} = 2,5 \cdot 10^3$  D,  
 $R_{M8} = 1,0 \cdot 10^3$  D,  
 $F_1 = 2000$  A,  
 $F_2 = 5000$  A,  
 $F_4 = 3000$  A

Визначити магнітний потік  $\Phi_1$ .

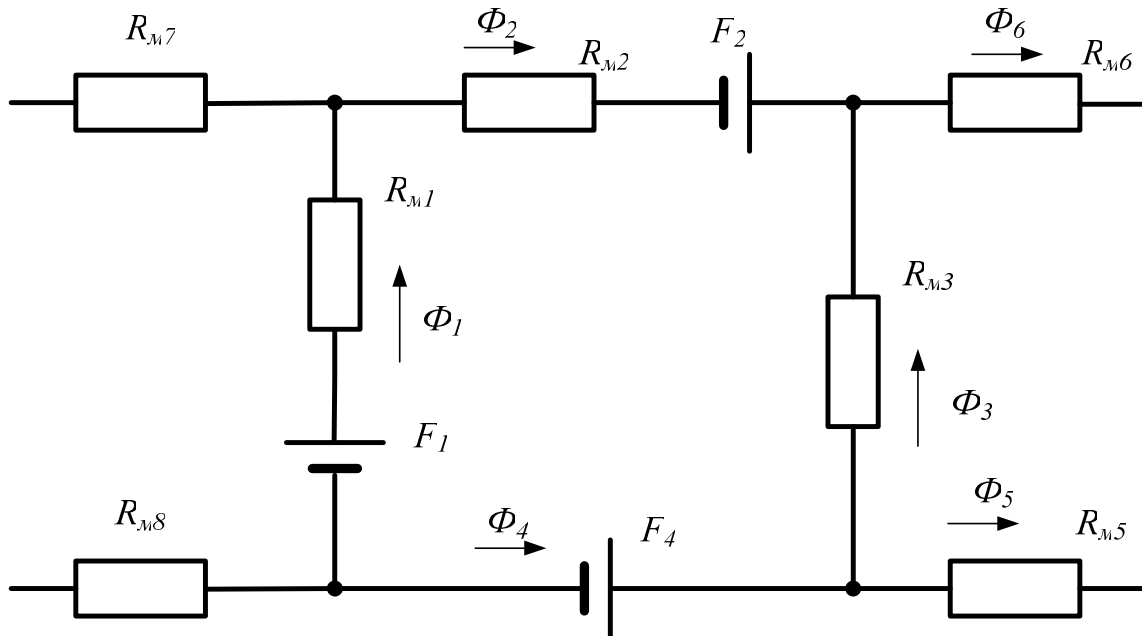


Рис. 1.3 – Схема магнітного кола

### Розв'язання:

- Визначаємо за 1-м законом Кирхгофа магнітний потік  $\Phi_3$ , для чого складемо рівняння:

$$\Phi_4 - \Phi_3 - \Phi_5 = 0;$$

$$\Phi_3 = \Phi_4 - \Phi_5;$$

$$\Phi_3 = 1,0 \cdot 10^{-3} - 0,3 \cdot 10^{-3} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

- Складемо рівняння за 2-м законом Кирхгофа:

$$F_1 + F_2 - F_4 = \Phi_1 * R_{M1} + \Phi_2 * R_{M2} - \Phi_3 * R_{M3};$$

$$\Phi_1 * R_{M1} = F_1 + F_2 - F_4 - \Phi_2 * R_{M2} - \Phi_3 * R_{M3};$$

$$\Phi_1 = \frac{F_1 + F_2 - F_4 - \Phi_2 * R_{M2} + \Phi_3 * R_{M3}}{R_{M1}};$$

$$\Phi_1 = \frac{2000 + 5000 - 3000 - 2,5 \cdot 10^{-3} * 1,0 \cdot 10^6 + 0,7 \cdot 10^{-3} * 0,7 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^5} = 0,398 \cdot 10^{-2} \text{ Вб};$$

#### Завдання 4

Вихідні дані до схеми (рис. 4)  $R_{m1}=0,5 \cdot 10^6$  1/Гн;  $R_{m2}=0,75 \cdot 10^6$  1/Гн;  $R_{m3}=1,2 \cdot 10^6$  1/Гн;  $\Phi_0=5 \cdot 10^{-3}$  Вб;  $\Phi_1=7 \cdot 10^{-3}$  Вб;  $F_1 = 2000$  А;  $F_3 = 5000$  А.

Визначити  $\Phi_3$  та  $\Phi_4$ .

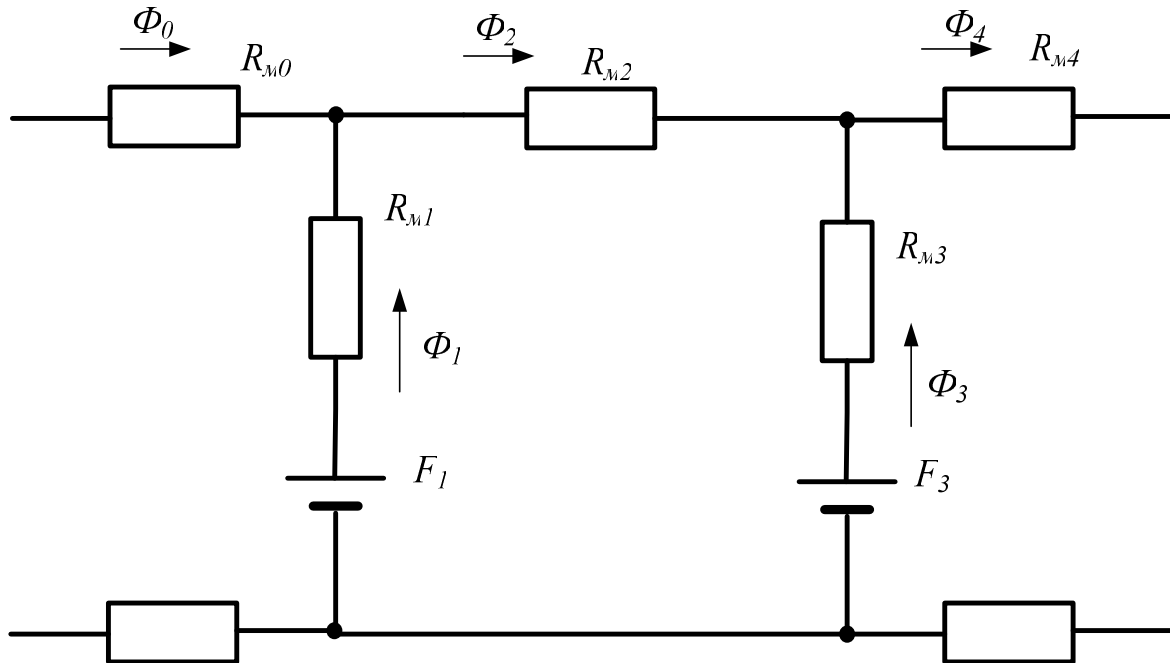


Рис. 1.4 – Схема магнітного кола

**1.3** Взаємозв'язок між потокозчепленням  $\Psi$  ( Вб ) , потоком  $\Phi$  ( Вб ), кількістю витків  $W$ , перерізом магнітопровода  $S$  ( м<sup>2</sup> ), індукцією  $B$  ( Тл ), напруженістю поля  $H$  ( А/м ) і магнітною проникністю  $\mu$  ( Гн/м )

$$\Psi = \Phi * W; \quad \Phi = B * S; \quad B = \mu * H,$$

де  $\mu = \mu_0 * \mu_{отн}$ , де  $\mu_{отн}$  – відносна магнітна проникність,

а  $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$  Гн/м - магнітна проникність повітря.

**Завдання 5** Знайти потокозчеплення  $\Psi$ , для обмотки з числом витків  $W=500$  і потоку  $\Phi = 0,007$  Вб.

**Розв'язання:**

Потокозчеплення  $\Psi$  дорівнює:

$$\Psi = \Phi * W; \quad \Psi = 500 * 0,007 = 3,50 \text{ Вб.}$$



**Завдання 6.** Знайти індукцію  $B$  у магнітопроводі, переріз якого дорівнює  $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  і потік дорівнює  $0,375 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$ .

**Розв'язання:**

Індукція  $B$  у магнітопроводі дорівнює:

$$B = \Phi/S = 0,375 \cdot 10^{-3} / 0,25 \cdot 10^{-3} = 1,5 \text{ Тл.}$$

**1.4. Магнітний опір  $R_m$  ділянки магнітного кола перерізом  $S$  і довжиною  $l$**

$$R_m = l/(\mu \cdot S),$$

де  $\mu$  – магнітна проникність.

Магнітна провідність ділянки  $A_m = l/R_m = (\mu \cdot S)/l$ .

**1.5. Електромагнітні елементи** характеризуються індуктивністю  $L = \Psi/i = (W \cdot \Phi)/I$ , де  $\Phi$  – потік, створений обмоткою з числом витків  $W$  при протіканні нею струму  $i$  (при зчепленні потоку  $\Phi$  із усіма витками обмотки).

Якщо використовувати залежність  $\Phi = (i \cdot W)/R_m$ , одержимо

$$L = (W \cdot \Phi)/i = (W/i) \cdot (i \cdot W)/R_m = W^2/R_m \text{ чи } L = W^2 \cdot A_m.$$

**Завдання 7.** Визначити індуктивність  $L$ , якщо кількість витків обмотки складає  $W=500$ , діаметр осердя дорівнює  $50 \text{ мм}$ , його довжина –  $150 \text{ мм}$ , магнітна проникність сталі –  $\mu = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/м}$ .

**Розв'язання:**

Знаходимо магнітну провідність осердя:

$$A_m = (\mu \cdot S)/l.$$

$$A_m = (1,25 \cdot 10^{-4} \cdot ((3,14 \cdot 0,05^2)/4))/0,15 = 0,654 \cdot 10^{-5} \text{ Гн.}$$

Визначаємо індуктивність  $L$ :

$$L = W^2 \cdot A_m; L = 500^2 \cdot 0,654 \cdot 10^{-5} = 1,64 \text{ Гн.}$$

Електромагнітне поле характеризує наявність у визначеній сфері простору взаємозалежних електричних і магнітних полів. Воно створюється струмами, що протікають провідниками чи обмотками, а також мікрострумами у феромагнітних матеріалах (постійні магніти).

Взаємозв'язок між електричними і магнітними характеристиками цього поля описує **рівняння Максвелла**.

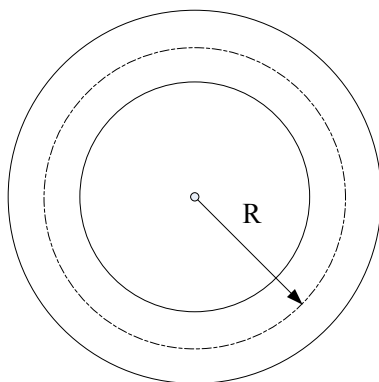
Перше рівняння в елементарних умовах стосовно до обмотки з числом витків  $W$  і струмом  $i$ , або закон повного струму, елементарна форма якого виражена залежністю:

$$\Sigma i * W = \Sigma H * l,$$

де:  $W$  – кількість витків;  $i$  – струм в обмотці, А;  $H$  – напруженість поля, А/м;  $l$  – довжина ділянки магнітопроводу з напруженістю  $H$ .

Електричні машини, трансформатори, електричні апарати і інші пристрої конструюють так, щоб магнітний потік у них був по можливості найбільшим. Переконаємося в тому, що, коли в магнітопровід входить феромагнітний матеріал, то магнітний потік у цьому магнітопроводі при одній і тій же силі, що намагнічує, і інших рівних умовах, виявляється у багато разів більшим, ніж у разі відсутності феромагнітного матеріалу. З цією метою розглянемо числовий приклад.

**Завдання 8.** Візьмемо два однакових у геометричному відношенні тороїдальних осердя (рис. 1.5).



*Рис. 1.5 – Дерев'яний і сталевий осердя однакового радіусу  $R$*

Радіус середньої магнітної лінії їх  $R = 10$  см. Намотаємо на них обмотку з числом витків  $W = 314$  і пропустимо ними однаковий струм  $I = 1$  А. Визначити співвідношення магнітних потоків у сталевому і дерев'яному осердях.

### **Розв'язання**

За другим законом Кирхгофа, нехтуючи потоками розсіювання, визначимо напруженість магнітного поля в осерді. Остання буде однаковою, оскільки не залежить від матеріалу осердя.

$$H * l = I * W, \text{ звідки } H = (I * W) / (2 * \pi * R)$$

Середня довжина силової лінії

$$l = 2 * \pi * R$$

Напруженість магнітного поля

$$H = (1 * 314) / (2 * 3,14 * 10 * 10^{-2}) = 500 \text{ А/м.}$$

По основній кривій намагнічення для сталі знаходимо, що напруженості поля  $H = 500 \text{ А/м}$  відповідає магнітна індукція  $B = 1,05 \text{ Тл}$ .

У ферромагнітних матеріалах відносна магнітна проникність як вважають електрики практично дорівнює одиниці. Тому магнітна індукція дерева є лінійною залежністю від напруженості магнітного поля. Звідси для дерев'яного осердя знаходимо магнітну індукцію

$$B = \mu_0 * H,$$

тут  $\mu_0 = 1,25 * 10^{-6} \text{ Гн/м}$ . - Магнітна проникність повітря

Індукція в дерев'яному осерді

$$B_{дер} = 1,25 * 10^{-6} * 500 = 4 * 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Оскільки  $S_{дер} = S_{ст}$ , то  $(\Phi_{ст} / \Phi_{дер}) = (B_{ст} / B_{дер}) = 1,06 / 4 * 10^{-4} = 2650$ .

**Друге рівняння Максвелла** показує взаємозв'язок між електричними і магнітними параметрами поля в динамічному режимі їхньої зміни:

$$\oint E dl = -d\Phi / dt ,$$

де  $dl$  – довжина ділянки контуру;  $\Phi$  – магнітний потік;  $E$  – напруженість електричного поля;  $t$  – час.

Ця формула виражає закон електромагнітної індукції Фарадея, що в елементарній формі має вигляд:

$$e = - d\psi / dt ,$$

де  $e$  – електрорушійна сила,  $B$ ;  $\psi$  – потокозчеплення,  $B\delta$ .

$$\psi = \hat{O} * W .$$

Стосовно до електромагнітних елементів синусоїдального змінного струму, закон Фарадея записують так:

$$U = 4,44 * f * W * \Phi_m ,$$

де  $U$  – напруга, В (діюче значення);  $f$  – частота, Гц;  $W$  – число витків обмотки;  $\Phi_m$  амплітудне значення магнітного потоку, Вб.

**Завдання 9.** Обмотка, що розміщена на осерді дроселя з петлею гістерезису, зображена на рис. 1.6а, сполучена послідовно з активним навантаженням і підключена до синусоїдальної напруги мережі. Якісно побудувати криві зміни магнітної індукції в осерді і струмі в навантаженні у функції  $\omega t$  за умови, що напруга мережі вище граничної, визначаємо за формулою

$$U = 4,44 * f * W * B_m * S ,$$

де  $B_m = B_s$ .

### Розв'язання

На ділянці  $0 - \alpha$  (рис. 1.6б) напруга, прикладена до дроселя, майже повністю врівноважується ЕРС, що індуквана в обмотці дроселя, оскільки робота дроселя відбувається на крутій ділянці кривої намагнічення. Струм трохи підвищується за рахунок невеликої зміни напруженості. Осердя дроселя досягає насичення і магнітна індукція в ньому перестає змінюватися. У момент  $t = \alpha$  струм стрибком зростає і прикладена напруга врівноважується падінням напруги на навантаженні. Крива струму повторює форму кривої напруги. При  $t = \pi \div (\pi + \alpha)$  робота дроселя відбувається знову на крутій ділянці кривої намагнічення, де виникає зміна індукції. Потім процес повторюється.

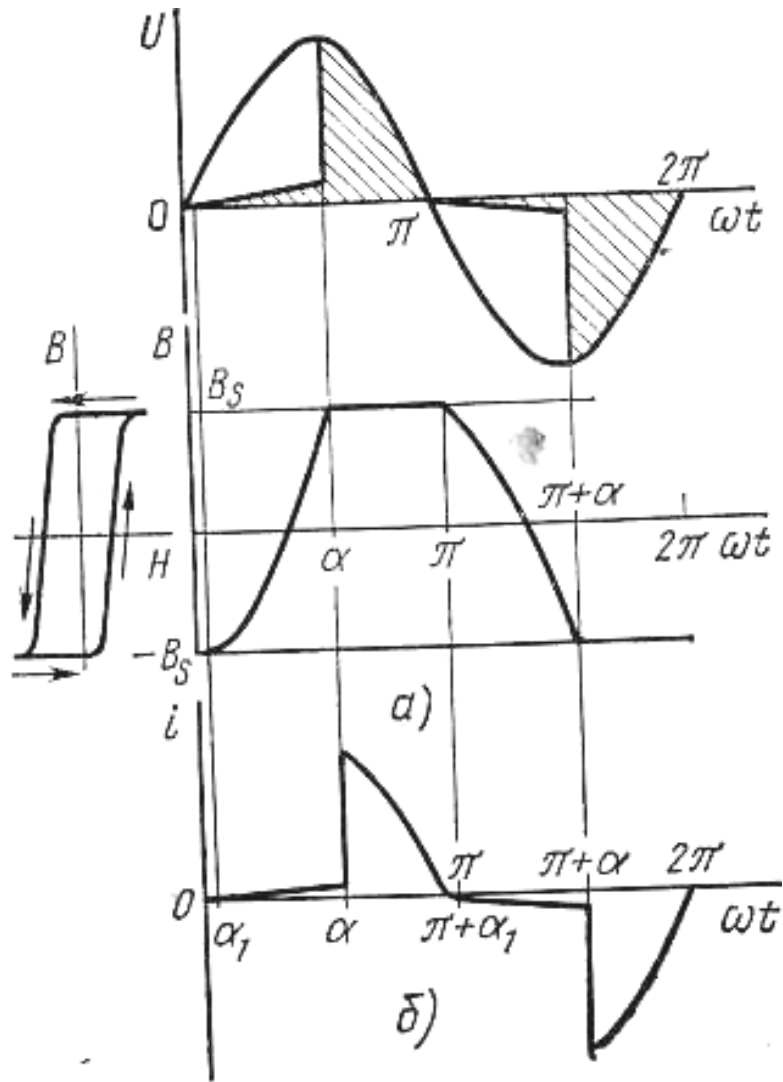


Рис. 1.6— Петля гістерезису осердя дроселя і його характеристики

**Завдання 10.** Дросель із сталевим Осердям підключений до мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. При цьому  $S = 10 \text{ см}^2$ ;  $W = 700$ ;  $l = 25 \text{ см}$ . Крива намагнічення з достатньою точністю для даного сорту сталі може бути виражена залежністю:

$$H = 2 * 10^4 * B + 5 * 10^{12} B^3,$$

де  $H$  — в А/см;  $B$  — в Вб/см<sup>2</sup>.

Написати рівняння для струму в дроселі. При розв'язанні нехтувати активним опором обмотки,  $E_{PC}$ , що наводиться в ній, потоком розсіювання і втратами енергії в осерді.

## Розв'язання:

Користуючись співвідношеннями

$$i = \frac{H * l}{W} \quad \text{та} \quad B = \frac{\Phi}{S}, \text{ визначаємо}$$

$$i = \frac{l}{W * S} * 2 * 10^4 * \Phi + \frac{l}{W * S^3} * 5 * 10^{12} * \Phi^3.$$

Тоді рівняння для струму приймає наступний:

$$i = (l/(W * S)) * 2 * 10^4 * 1,41 * 10^{-3} \sin 314t + (l/(W * S^3)) * 5 * 10^{12} (1,41 * 10^{-3})^3 314t.$$

При  $\sin^3 \omega t = (3/4) * \sin \omega t - (1/4) \sin 3 \omega t$  остаточно одержуємо:

$$i = 0,48 \sin 314t - 0,126 \sin 942t.$$

## 2. Завдання з елементів магнітного кола та з розрахунку повітряних зазорів

При розрахунку магнітного кола необхідно визначити провідність повітряного зазору, прямо пропорційну перерізу обсягу, яким проходить магнітний потік і обернено пропорційну довжині зазору. Для порівняно простих форм полюсів магнітна провідність повітряних зазорів може бути обчислена аналітично. Наприклад, для полюсів (рис. 2.1) при малому повітряному зазорі між ними і при паралельно йдучих магнітних лініях  $\Lambda = (\mu_0 * S) / \delta$ , Гн, де  $S$  – переріз повітряного зазору,  $\text{м}^2$ ;  $\delta$  – його довжина, м;  $\mu_0$  – магнітна проникність повітря,  $\mu_0 = 1,25 * 10^{-6}$  Гн/м.

Провідність також можна знаходити за емпіричною формулою, запропонованою В.В.Вишніовським:

$$G_{\delta} = \mu_0 * \frac{d_n^2}{0,00233 * d_n + 1,068 * \delta}, \quad (1)$$

де  $\mu_0 = 1,25 * 10^{-6}$  Гн/м – магнітна проникність повітря;

$\delta$  – величина повітряного зазору, м;

$d_n$  – діаметр полюсного наконечника, м.

**Графічний метод** заснований на побудові картини магнітного поля з наступною розбивкою його на елементарні трубки. Цей метод точний, але складний і трудомісткий.

Найбільше широко використовують **метод розбивки поля на найпростіші фігури**. Цей метод дає достатню для практики точність. Полягає він у наступному:

магнітне поле в повітряному зазорі розбивають на ряд найпростіших геометричних фігур, для яких відомі аналітичні вираження провідностей.

Сутність цього методу полягає в тому, що все поле повітряного зазору розбивають на ряд трубок магнітного потоку, які мають форму простих геометричних фігур (циліндрів, напівциліндрів, паралелепіпедів і та ін.)

Провідність елементарної трубки потоку пропорційна відношенню середнього перерізу трубки  $S_{cp}$  і її довжини  $l_{cp}$

$$G_i = \mu_0 * \frac{S_{cp}}{l_{cp}} . \quad (5)$$

Якщо середнє значення визначити важко, то провідність такої фігури знаходять за формулою

$$G_i = \mu_0 * \frac{V_i}{l_{cp}^2} , \quad (6)$$

де:  $V_i$  – обсяг  $i$  – ї фігури.

Для визначення магнітної провідності неробочого повітряного зазору знаходимо величину неробочого зазору за формулою

$$\delta = \frac{a}{2} * tg\alpha .$$

Потім після розбивки поля на прості фігури (рис. 2.1) визначаємо їхню провідність. Формули провідності окремих фігур мають такий вигляд:

$$G_1 = \mu_0 * \frac{a * b}{\delta} , \quad G_2 = \mu_0 * \frac{2 * a}{\pi * (\delta_H / a + 1)} , \quad G_{2'} = \mu_0 * \frac{2 * b}{\pi * (\delta_H / a + 1)} , \quad G_3 = \mu_0 * 0,26 * a ,$$

$$G_{3'} = \mu_0 * 0,26 * b , \quad G_4 = \mu_0 * \frac{2 * b}{\pi * (\delta_H / a + 0,5)} , \quad G_5 = \mu_0 * 0,52 * b ,$$

$$G_6 = G_{6'} = \mu_0 * 0,25 * a , \quad G_7 = \mu_0 * 0,077 * \delta_H .$$

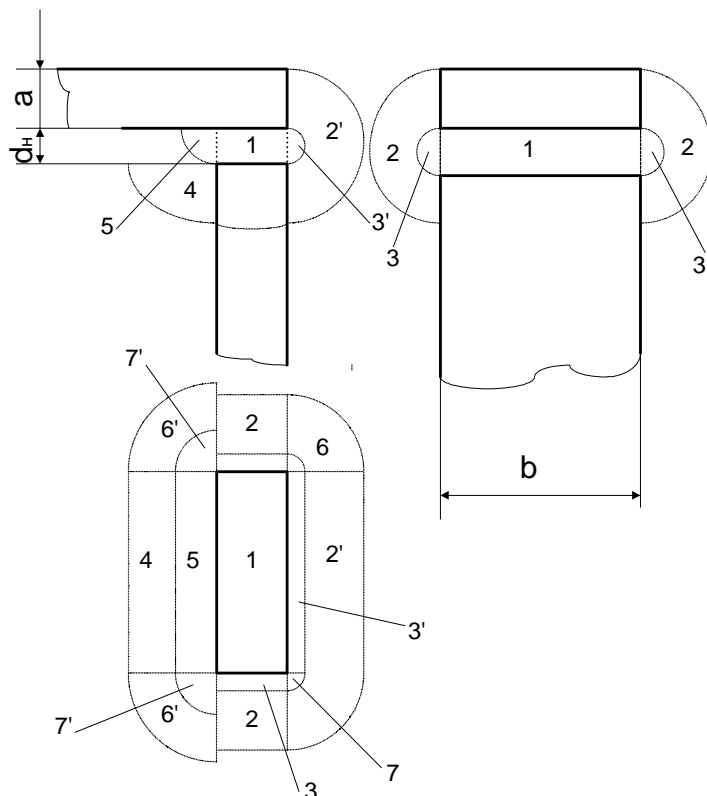


Рис. 2.1 – Магнітне поле між якорем і скобою:

- 1– прямокутний паралелепіпед розмірами  $a * b * \delta_n$ ;
- 2– половина порожнього циліндра довжиною  $a$ , внутрішній діаметр  $\delta_n$ , зовнішній діаметр  $\delta_n + 2 * a$ ;
- 2'– половина порожнього циліндра довжиною  $b$ , внутрішній діаметр  $\delta_n$  і зовнішній діаметр  $\delta_n + 2 * a$ ;
- 3– половина циліндра довжиною  $a$  і діаметром  $\delta_n$ ;
- 3'– половина циліндра довжиною  $b$  і діаметром  $\delta_n$ ;
- 4– чверть порожнього циліндра довжиною  $b$  із внутрішнім радіусом  $\delta_n$ , зовнішнім  $\delta_n + a$ ;
- 5– чверть циліндра довжиною  $b$  і радіусом  $\delta_n$ ;
- 6– чверть кульової оболонки діаметром  $\delta_n + 2 * a$ ;
- 6'– чверть кульової оболонки діаметром  $2 * (\delta_n + a)$ ;
- 7– чверть кулі діаметром  $\delta_n$ ;
- 7'– чверть кулі діаметром  $2 * \delta_n$ .

Загальна провідність зазору дорівнює сумі провідностей окремих фігур, тому що прикладену до кінців різницю магнітних потенціалів для усіх фігур можна вважати однаковою (фігури з'єднані паралельно).



Підставляючи значення величин, що входять до цих формул, відповідно до завдання, знаходимо провідність окремих фігур і повну провідність неробочого повітряного зазору:

$$G_{\delta_n} = G_1 + 2 * G_2 + G_2' + 2 * G_3 + G_3' + G_4 + G_5 + 4 * G_6.$$

Провідність  $G_7$  незначна і нею можна знехтувати.

Завдання: визначити магнітну провідність неробочого повітряного зазору при  $\delta_n = 0,85$  мм,  $a = 80$  мм методом розбивки на прості фігури за приведеними вище формулами:

$$G_1 = 1,25 * 10^{-6} * ((5,6 * 80) * 1 * 10^{-6}) / 0,85 * 10^{-3} = 0,660 * 10^{-6} \text{ Гн};$$

$$G_2 = (1,25 * 10^{-6} * 2 * 5,6 * 10^{-3}) / (3,14 * (0,85/5,6 + 1)) = 0,39 * 10^{-8} \text{ Гн};$$

$$G_2' = (1,25 * 10^{-6} * 2 * 80 * 10^{-3}) / (3,14 * (0,85/5,6 + 1)) = 0,555 * 10^{-7} \text{ Гн}$$

$$G_3 = 1,25 * 10^{-6} * 0,26 * 5,6 * 10^{-3} = 0,18 * 10^{-8} \text{ Гн};$$

$$G_3' = 1,25 * 10^{-6} * 0,26 * 80 * 10^{-3} = 0,26 * 10^{-7} \text{ Гн};$$

$$G_4 = (1,25 * 10^{-6} * 2 * 80 * 10^{-3}) / (3,14 * (0,85/5,6 + 0,5)) = 0,1 * 10^{-6};$$

$$G_5 = 1,25 * 10^{-6} * 0,52 * 80 * 10^{-3} = 0,52 * 10^{-7} \text{ Гн};$$

$$G_6 = 1,25 * 10^{-6} * 5,6 * 10^{-3} * 0,25 = 0,18 * 10^{-8};$$

$$G_7 = 1,25 * 10^{-6} * 0,077 * 0,85 * 10^{-3} = 0,8 * 10^{-10};$$

Повна провідність дорівнює:

$$G_{\delta_n} = (0,66 + 2 * 0,0039 + 0,555 + 2 * 0,0018 + 0,026 + 0,1 + 0,052 + 4 * 0,0018) * 10^{-6} = 0,983 * 10^{-6} \text{ Гн}.$$

### 3. Розрахунок магнітних кіл при постійному струмі без обліку потоків розсіювання

#### 3.1. Торойд з розподіленою обмоткою

Торойд з розподіленою обмоткою – це найбільш просте нерозгалужене коло, коли потоки розсіювання практично відсутні. Для цього кола відповідно до другого закону Кирхгофа:

$$\Phi * R_m = I * W;$$

$$\Phi * (l / (\mu * S)) = I * W.$$

МДС ( $I * W$ ) тут витрачають тільки на проведення магнітного потоку через магнітопровід, і значення її  $f$ , що приходить на одиницю довжини магнітопроводу  $l = \pi * D$ , буде дорівнювати напруженості магнітного поля в сталі:

$$f = I * W = H \quad (A/m).$$

Якщо заданий потік  $\Phi$  і відомий переріз магнітопроводу  $S = (\pi * D^2) / 4$ , обчислюємо індукцію  $B_1 = \Phi / S$ . За кривою намагнічування знаходимо відповідну напруженість магнітного поля  $H_1$ . Шукана МДС:

$$F = I * W = H_1 * l = H_1 * \pi * D.$$

Якщо задана МДС  $F = I * W$ , обчислюємо напруженість магнітного поля  $H_1 = (I * W) / l$ . За кривою намагнічування знаходимо індукцію  $B_1$  і, знаючи переріз, визначаємо шуканий потік  $\Phi$ :

$$\Phi = B_1 * S.$$

**Завдання 11.** Знайти магнітний потік  $\Phi$ , який протікає магнітопроводом тороїда, якщо його діаметр складає  $D = 50$  мм, діаметр магнітопроводу  $d = 10$  мм, сила, що намагнічує  $F = 1000$  А.

#### Розв'язання:

Знаходимо напруженість магнітного поля у магнітопроводі

$$H_1 = F / (\pi * D)$$

$$H_1 = 1000 / (3,14 * 50 * 10^{-3}) = 6370 \text{ A/m} = 63,7 \text{ A/cm}.$$

З кривої намагнічування сталі (рис. 1Д додатку) знаходимо індукцію магнітного поля  $B = 1,23$  Тл.

Визначаємо магнітний потік:

$$\Phi = B_1 * S = B_1 * (\pi * d^2 / 4) = 1,23 * (3,14 * (10 * 10^{-3})^2 / 4) = 0,966 * 10^{-4} \text{ Вб.}$$

### 3.2. Розгалужене магнітне коло

Магнітний потік у нерозгалуженій частині магнітного кола (рис. 3.1) – повний потік  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ , де  $\Phi_1, \Phi_2$  – потоки в розгалуженій частині магнітопроводу; повна магніторушійна сила –  $F = F_1 + F_2$ , де  $F_1, F_2$  – падіння магнітних потенціалів на ділянках, що обтікають потоки  $\Phi, \Phi_1, \Phi_2$ ;  $F_1 = \Phi * R_{m1}$ ;  $F_2 = \Phi_1 * (R_{m2} + R_{m3} + R_{m4})$ ;  $F_2 = \Phi_2 * (R_{m5} + R_{m6} + R_{m7})$ ; де  $R_{m1}, R_{m2} \dots R_{m7}$  – магнітні опори відповідних ділянок магнітопроводу.

При симетричному щодо осі 1–1 магнітопроводі  $R_{m2} = R_{m5}, R_{m3} = R_{m6}$  і та ін., а  $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi / 2$  і розрахунок ведеться для половини магнітопроводу, як для тороїда. Обидві половини являють собою два паралельно включених магнітопроводи з потоком  $\Phi / 2$ , у яких діє МДС  $F$ .

Якщо заданий потік  $\Phi$ , то знаходимо:

$$B_1 = (\Phi / 2) / (S_{1/2}); B_2 = \Phi_1 / S_2 = (\Phi / 2) / S_2; B_3 = \Phi_1 / S_3 = (\Phi / 2) / S_3; B_7 = \Phi_1 / S_7 = (\Phi / 2) / S_7;$$

Знаходимо за кривими намагнічування  $H_1, H_2$  і та ін.

$$F = H_1 * l_1 + H_5 * l_5 + H_6 * l_6 + H_7 * l_7;$$

$$F = H_1 * l_1 + H_2 * l_2 + H_3 * l_3 + H_4 * l_4.$$

**Завдання 12.** Знайти струм в обмотці та розподіл потоку за магнітопроводом для симетричного електромагніта, що зображений на рис. 3.1.

Вихідні дані до розрахунку:

$$a = 5 * 10^{-2} \text{ м}; b_0 = 6 * 10^{-2} \text{ м}; b_1 = 4 * 10^{-2}; b_2 = 3 * 10 \text{ м}; b_3 = 5 * 10^{-2};$$

$$l_0 = l_2 = 12 * 10^{-2} \text{ м}; l_1 = l_3 = 15 * 10^{-2} . W = 500;$$

Індукція в центральному стрижні  $B_0 = 1,5$  Тл.

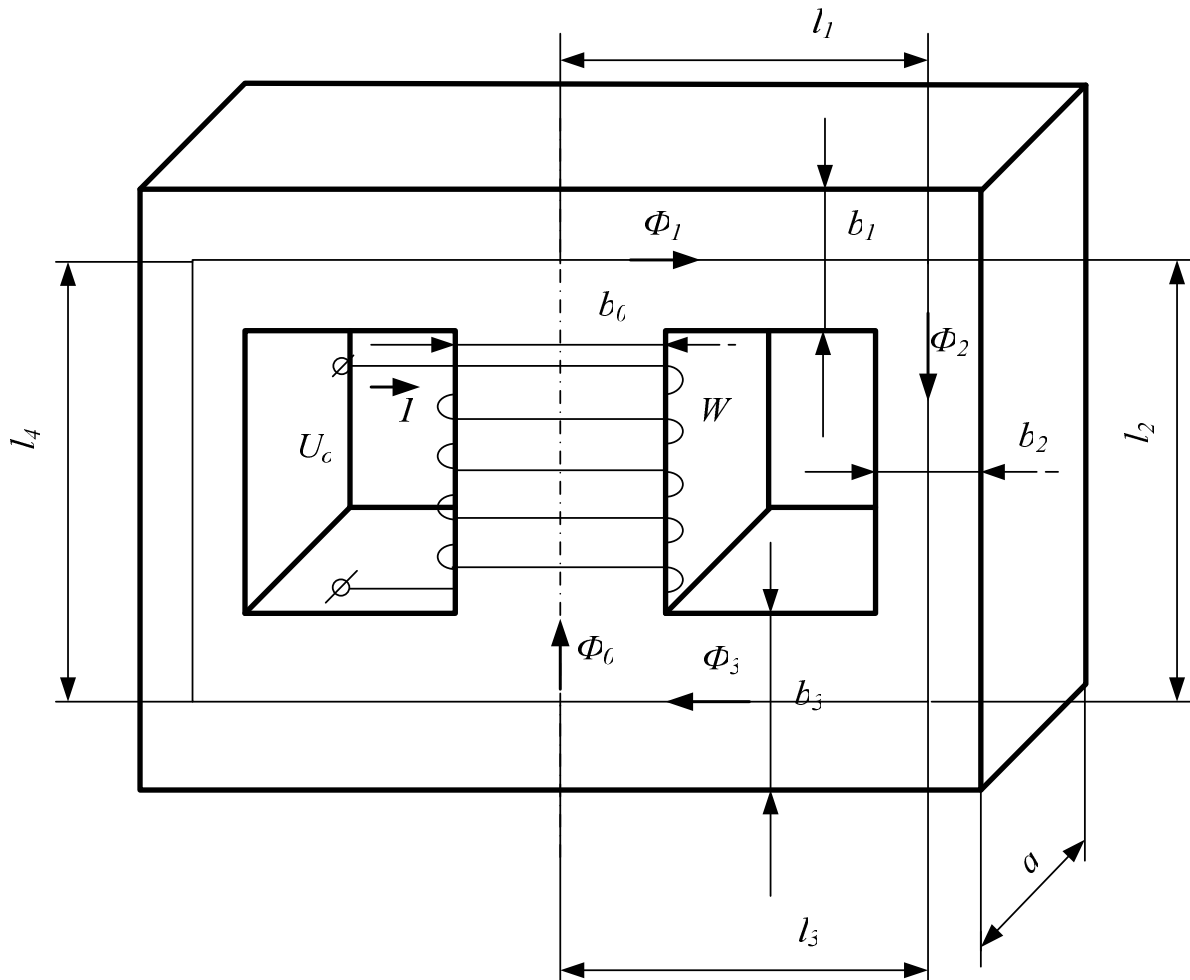


Рис. 3.1 – Схема електромагніта

**Розв'язання:**

Визначаємо магнітний потік  $\Phi_0$  за формулою:

$$\Phi_0 = B_0 * S_0,$$

де  $S_0$  –переріз центрального стрижня:  $S_0 = a * v_0 = 5 * 10^{-2} * 6 * 10^{-2} = 3 * 10^{-3} \text{ м}^2$ .

$$\Phi_0 = 1,5 * 3 * 10^{-3} = 4,5 * 10^{-3} \text{ Вб}.$$

Визначаємо потоки  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ :

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \frac{\Phi_0}{2} = \frac{4,5 * 10^{-3}}{2} = 2,25 * 10^{-3} \text{ Вб}.$$

Визначаємо індукцію на ділянках 1,2,3:

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1}; B_2 = \frac{\Phi_2}{S_2}; B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3},$$

де:  $S_1, S_2, S_3$  – перерізи ділянок 1,2,3:

$$S_1 = a * v_1; S_2 = a * v_2; S_3 = a * v_3.$$

$$S_1 = 5 * 10^{-2} * 4 * 10^{-2} = 2 * 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$S_2 = 5 \cdot 10^{-2} * 3 \cdot 10^{-2} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$S_3 = 5 \cdot 10^{-2} * 5 \cdot 10^{-2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$B_1 = \frac{2,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,13 \text{ Тл};$$

$$B_2 = \frac{2,25 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 1,5 \text{ Тл};$$

$$B_3 = \frac{2,25 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 0,9 \text{ Тл};$$

Знаходимо напруженість поля  $H_1, H_2, H_3, H_0$  з кривої намагнічування (рис. 1Д додатку):

$$H_1 = 63 \text{ А/см}, H_2 = 90 \text{ А/см}, H_3 = 48 \text{ А/см}, H_0 = 90 \text{ А/см}.$$

Визначаємо намагнічуючу силу обмотки за формулою закону повного струму:

$$I * W = H_0 * l_0 + H_1 * l_1 + H_2 * l_2 + H_3 * l_3;$$

$$I * W = 90 * 12 + 63 * 15 + 90 * 12 + 48 * 15 = 3825 \text{ А};$$

При цьому струм в обмотці дорівнює:

$$I = \frac{I * W}{W} = \frac{F}{W} = \frac{3825}{500} = 7,65 \text{ А}.$$

**Завдання 17.** Знайти силу тяжіння електромагніту постійного струму  $P_{e-}$  і змінного струму  $P_{e\sim}$  при одному і тому ж максимальному значенні індукції  $B_m = 0,2 \text{ Тл}$  і площі перерізу полюса  $S = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , рахуючи магнітну систему ненасиченою, а магнітну проникність – постійною. Порівняти отримане значення  $P_{e-}$  та  $P_{e\sim}$ .

### Розв'язання

Сила тяжіння електромагніта постійного струму за формулою Максвелла

$$P_{e-} = \frac{B_m^2 * S}{2 * \mu_0} = \frac{0,2^2 * 1,77 * 10^{-4}}{2 * 4 * 3,14 * 10^{-7}} = 2,82 \text{ Н}.$$

Середнє значення сили тяжіння електромагніту змінного струму

$$P_{e\sim} = \frac{(B_m / \sqrt{2})^2 * S}{2 * \mu_0} = \frac{(0,2 / \sqrt{2})^2 * 1,77 * 10^{-4}}{2 * 4 * 3,14 * 10^{-7}} = 1,41 \text{ Н}.$$

Отже, при заданій площі перерізу полюсів, створюючих робочий повітряний зазор, і при однаковому значенні індукції, середня величина сили тяжіння електромагніту змінного струму вдвічі менше сили тяжіння електромагніту постійного струму.

#### 4. Розрахунок магнітних кіл при змінному струмі

**Завдання 13.** Обмотка осердя підключена до мережі змінної напруги  $U = 50$  В, частотою  $f = 400$  Гц. Переріз сталі осердя  $S = 0,16$  см<sup>2</sup>, число витків обмотки  $W = 1600$ . Визначити амплітуду магнітної індукції в осерді.

##### Розв'язання:

Зв'язок між діючим значенням напруги і амплітудою магнітної індукції виражається формулою:

$$U = 4,44 * f * W * \Phi_m,$$

$$\text{або } U = 4,44 * f * W * B_m * S$$

звідси:

$$B_m = U / (4,44 * f * W * S) = 50 * 10^4 / (4,44 * 400 * 1600 * 0,16) = 1,1 \text{ Тл.}$$

**Завдання 14.** Визначити напругу змінного струму, прикладену до обмотки дроселя, при якому відбувається зміна магнітної індукції в осерді з амплітудою 1,0 Тл, якщо частота джерела живлення  $f = 50$  Гц;  $W = 1000$ ;  $S = 10$  см<sup>2</sup>.

##### Розв'язання:

$$\text{Знаходимо } U = 4,44 * 50 * 1000 * 10 * 10^{-4} * 1,0 = 222 \text{ В.}$$

**Завдання 15.** Обмотку осердя, що розрахована на напругу  $U = 127$  В при частоті  $f = 50$  Гц, включили під напругу  $U_1 = 200$  В частотою  $f_1 = 400$  Гц. Що відбудеться з амплітудою магнітної індукції?

**Розв'язання:**

Амплітуда магнітної індукції

$$B_m = k * \frac{U}{f},$$

де  $k = \frac{1}{4,44 * W * S}$ .

При  $U=127$  В та  $f=50$  Гц

$$B_{m1} = k * 2,54.$$

При  $U_1=200$  В та  $f_1=400$  Гц

$$B_{m2} = k * 0,5.$$

Розглядаючи  $B_{m1}/B_{m2} = 5$ , бачимо, що амплітуда магнітної індукції зменшилася в п'ять разів.

**Завдання 16.** Амплітуда магнітної індукції в осерді дроселя, що підключений до синусоїдальної напруги з амплітудою 141 В і частотою 400 Гц, дорівнює 1,0 Тл;  $S = 0,16$  см<sup>2</sup>. Визначити амплітуду магнітної індукції в тому ж осерді при  $W = 3000$ .

**Розв'язання:**

Число витків обмотки

$$W = \frac{U}{4,44 * f * S * B_m} = \frac{100 * 10^4}{4,44 * 400 * 0,16 * 1,0} = 3500.$$

Отже, при  $W = 3000$

$$B_m = \frac{3500}{3000} = 1,17 \text{ Тл.}$$

**Завдання 17.**

Як зміниться вага електромагніта змінного струму в порівнянні з електромагнітом постійного струму при однакових силі тяги і ході якоря, якщо найбільше значення індукції зберегти незмінним.

**Розв'язання** При заданих силі тяги і ході якоря електромагніт змінного струму виявляється значно більшої ваги, ніж електромагніт постійного струму, оскільки удвічі збільшується переріз, а отже, і вага сталі. Крім того, в 1,41 рази зростає довжина витка, що приводить до збільшення ваги міді при однаковому числі витків обмоток у обох електромагнітів.

## 5. Тягова характеристика (статична).

### Протидіючі зусилля (навантаження)

Протидіючі зусилля (навантаження) являють собою залежність електромагнітної сили від робочого зазору для різних постійних значень напруги, підведеної до обмотки, чи струму в обмотці:  $Q_{em}=f(\delta)$  при  $U=const$  чи  $Q_{em}=f(\delta)$  при  $i=const$ .

У найпростішому випадку, коли можна зневажити розсіюванням і магнітним опором сталі ( $R_{m\Sigma}=R_\delta$ ), вважаючи поле в робочому зазорі рівномірним, застосувавши формулу  $A_m=I/R_m=(\mu*S)/l$  для його провідності, застосувавши формулу Максвелла  $Q_{em}=(B^2*S)/(2*\mu_0)$ , для електромагнітної тягової характеристики, одержимо залежність:

$$\begin{aligned} Q_{em} &= \frac{B_\delta^2 * S}{2 * \mu_0} = \frac{\Phi_\delta^2 * S}{2 * \mu_0 * S^2} = \frac{\Phi_\delta^2}{2 * \mu_0 * S} = \frac{(I * W)^2 * A_\delta^2}{2 * \mu_0 * S} = \\ &= \frac{(I * W)^2}{2 * \mu_0 * S} * \left(\frac{\mu_0 * S}{\delta}\right)^2 = \\ &= \frac{\mu_0 * S * (I * W)^2}{2 * \delta^2} = \frac{\mu_0 * S * F^2}{2 * \delta^2}, \end{aligned}$$

де  $\Phi=(I*W)/R_m=I*W*A_\delta$ .

Протидіючі зусилля електромагніта являють собою залежність протидіючих сил ( у загальному випадку приведених до точки додатка електромагнітної сили) від робочого зазору  $P_n=f(\delta)$ . Зіставлення протидіючої і тягової характеристики дає можливість зробити висновок (попереднє, без обліку динаміки) про працездатність електромагніта. Для нормального спрацьовування електромагніта необхідно, щоб тягова статична характеристика, побудована при  $I_{cp} = const$  у всьому діапазоні зміни ходу якоря, проходила вище протидіючої; для чіткого відпускання (повернення) навпаки, тягова характеристика, побудована при  $I_{отп} = const$ , має проходити нижче протидіючої.



**Завдання 18.** Визначити силу спрацьовування  $F_{спр}$ , що намагнічує, зображеного на рис. 5.1 магнітопроводу, необхідну для створення при початковому робочому зазорі  $\delta = 5 * 10^{-3}$  м тягового зусилля  $Q_{мо} = 5$  Н.

$$d_n = 15 * 10^{-3} \text{ м}; \delta = 5 * 10^{-3} \text{ м}; \delta_n = 0,5 * 10^{-3} \text{ м};$$

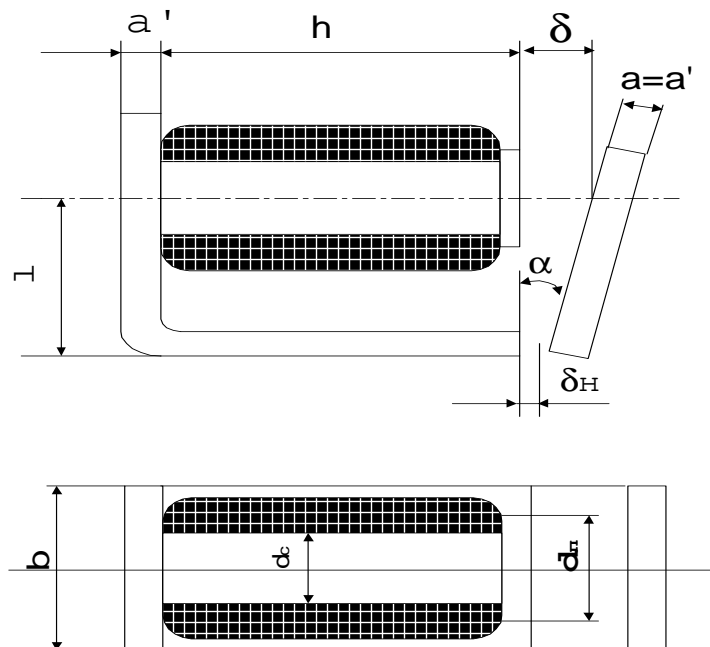


Рис. 5.1 – Електромагніт клапанного типу

**Розв'язання:**

За формулою Максвелла знаходимо магнітний потік спрацьовування

$$\Phi_{спр} = \sqrt{2 * \mu_0 * Q_{мо} * S_n} = \sqrt{(2 * 4 * 3,14 * 10^{-7} * 5 * 3,14 * 15^2 * 10^{-6}) / 4} = 0,47 * 10^{-4} \text{ Вб}$$

Нехтуючи потоками випучування в неробочому повітряному зазорі, знаходимо провідність цього зазора:

$$G_{\delta_n} = \mu_0 \frac{S_{ск}}{\delta_n} = \frac{1,25 * 10^{-6} * 80 * 10^{-6}}{0,5 * 10^{-3}} = 20 * 10^{-8} \text{ Гн}$$

Провідність робочого зазора визначимо за емпіричною формулою Вишніовського:

$$G_{\delta} = \mu_0 * \frac{d_n^2}{0,00233 * d_n + 1,068 * \delta} = \frac{1,25 * 10^{-6} * 15^2 * 10^{-6}}{0,00233 * 15 * 10^{-3} + 1,068 * 5 * 10^{-3}} = 5,2 * 10^{-8} \text{ Гн.}$$

Сумарна провідність:

$$G_{\Sigma} = \frac{G_{\delta_H} * G_{\delta}}{G_{\delta_H} + G_{\delta}} = \frac{20 * 10^{-8} * 5.2 * 10^{-8}}{20 * 10^{-8} + 5.2 * 10^{-8}} = 4 * 10^{-8} \text{ Гн}.$$

Без урахування опору сталі сила спрацьовування, що намагнічує, дорівнюватиме:

$$(I*W)_{cp} = F_{CP} = (0,47 * 10^{-4}) / (4 * 10^{-8}) = 1175 \text{ А}.$$

Відповідь:  $F_{cp} = 1175 \text{ А}$ .

## 6. Електричні контакти. Опір електричного контакту.

### Параметри контактних конструкцій

Одним з основних елементів електричних апаратів є електричний контакт, який у значній мірі визначає їх надійність. Для створення електричного контакту притискають один до одного контактні поверхні апаратів з деякою силою  $Q_k$ . При цьому на місці зіткнення відбувається зминання матеріалу і збільшення контактної поверхні, тобто виникнення нових точок дотику. Розмір і число таких площадок залежить від міцності матеріалу провідників і від сили взаємного натискання  $Q_k$ .

Радіус еквівалентної площадки торкання у випадку пружної деформації при стиску гладких поверхонь куля–площина з однакових матеріалів силою  $Q_k$  можна виразити формулою:

$$a = 1,11 * \sqrt[3]{\frac{Q_k * r}{E}},$$

де  $E$  – модуль пружності;  $r$  – радіус кулі.

Для кульових поверхонь, що контактують, радіус площадки

$$a = 0,86 * \sqrt{\frac{Q_k * r}{E}}.$$

Опір електричного контакту може бути представлений як сума опорів стягування  $R_C$  і сторонніх шарів з плівкою  $R_{ПЛ}$ :

$$R_K = R_C + R_{ПЛ}.$$

Опір стягування обумовлений тим, що при стиску двох провідників, обернених один до одного плоскими гранями, торкання буде відбуватися не по всій площині, а тільки окремими площадками, розташованими по площинах відповідно до мікрогеометрії здавлюваних граней. При цьому картина протікання струму різко змінюється, оскільки він має пройти не через весь переріз, а лише через його частину. Тому опір струму зростає. Опір плівок може мінятися в процесі експлуатації в дуже широких межах.

Опір обох контактуючих провідників, тобто опір стягування в ідеалізованому контакті можна представити у вигляді:

$$R_C = \rho / (2 \cdot a),$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір середовища, в якому розглядається розтікання струму;  $a$  – радіус площадки торкання чи зминання.

Для надійної роботи контактів необхідно, щоб падіння напруги на них було не більше напруги розм'якшення матеріала контакту. Допутиме падіння напруги на контактах за дослідними даними складає:

$$U_{\text{кон}} = (0,5 \div 0,8) U_p,$$

де  $U_p$  – напруга розм'якшення.

Звідси припустимий опір контакту буде

$$R_{\text{кон}} = U_{\text{кон}} / I = ((0,5 \div 0,8) \cdot U_p) / I$$

Наведені вище формули дозволяють вирішувати задачі щодо визначення сили контактної натискання і перехідного опору контакту.

При розв'язанні задачі необхідно враховувати, що місток має два контакти (рис. 6.1) і опором плівки можна зневажити, тобто

$$R_k = R_n$$

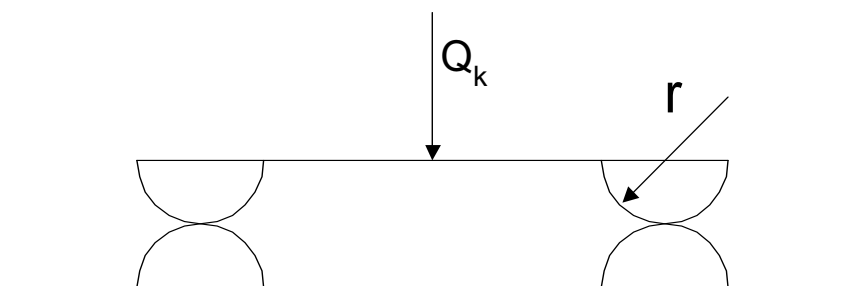


Рис. 6.1 – Контактний місток

### Завдання 19:

$\rho_m = 1,62 \cdot 10^{-6}$  Ом\*см – питомий опір міді;

$\rho_c = 1,5 \cdot 10^{-6}$  Ом\*см – питомий опір срібла;

$U_{pm} = 0,12$  В – напруга розмягчення для міді;

$U_{pc} = 0,09$  В – напруга розмягчення для срібла;

$E_m = 11800000$  Н/см<sup>2</sup> – модуль пружності міді;

$E_c = 7350000$  Н/см<sup>2</sup> – модуль пружності срібла.

Визначити величину контактної натиску мостового блок – контакту апарата, якщо через контакт проходить струм  $I$ , а контакти як пересувні, так і не пересувні, виконані з накладок полусферичної форми радіуса.

Матеріал контакту : мідь

Струм  $I$ , А – 5А.

Радіус сфери  $r$  – 8,5мм.

Допустима напруга на контакт:

$$U_{\text{кдоп}} = 0,65 \cdot U_{\text{рм}} ; \quad U_{\text{кдоп}} = 0,078 \text{ В.}$$

Допустимий опір контакту:

$$R_{\text{кдоп}} = U_{\text{кдоп}} / I ; \quad R_{\text{кдоп}} = 0,0156 \text{ Ом.}$$

Перехідний опір контакту:

$$R_{\text{п}} = R_{\text{кдоп}} = 0,0156 \text{ Ом.}$$

Радіус еквівалентної площадки дотику,  $a$ :

$$R_n = \rho / (2a) ; \quad a = \rho / (2R_n) ; \quad a = 5,19 \cdot 10^{-5} \text{ см.}$$

Сила стиску контакту

$$a^3 = 0,86^3 \cdot (Q_k / E) \cdot r ; \quad a^3 \cdot E = 0,86^3 \cdot Q_k \cdot r ;$$

$$Q_k = (a^3 \cdot E) / (0,86^3 \cdot r) ; \quad Q_k = 3,06 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

Сила стиску для контактної містки

$$Q_{\text{км}} = 2 \cdot Q_k ; \quad Q_{\text{км}} = 2 \cdot 3,06 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 6,12 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

**Завдання 19.** Визначити величину шунтуючого опору  $r$  (рис. 6.2), який необхідно включити паралельно індуктивності кола для недопущення іскрового розряду між контактами. Напруга батареї  $U = 60$  В, активний опір обмотки  $R = 500$  Ом.

### Розв'язання:

Напруга на контактах в момент розмикання ключа ( $t=0$ )

$$U_k = U + r * i(t),$$

де  $i(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{R+r}{L}t}$  – переходний струм в колі, що визначається під час розв'язання

диференціального рівняння  $(r + R)i + L \frac{di}{dt} = 0$ .

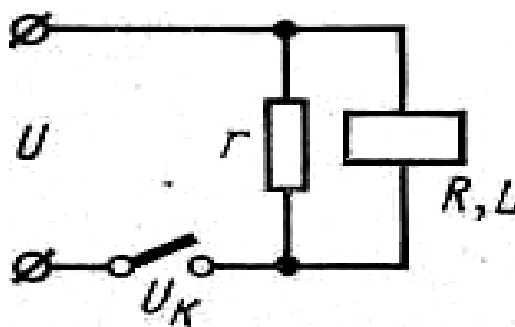


Рис. 6.2 – Запобіг іскрового розряду на контактах

Найбільша напруга на контактах буде в перший момент після їх розмикання, тобто при  $t = 0$ . Підставляючи значення струму  $i(t)$  у формулу для  $U_k$  при  $t = 0$ , знаходимо

$$U_k = U + \frac{r}{R} * U = U * (1 + \frac{r}{R}).$$

Для запобігання іскрового розряду на контактах необхідно, щоб  $U_k \leq 300$  В, або  $U[1+(r/R)] \leq 300$  В, звідси

$$R \leq [(300/U)-1]r = [(300/60)-1]500 = 2000 \text{ Ом.}$$

## Додаток

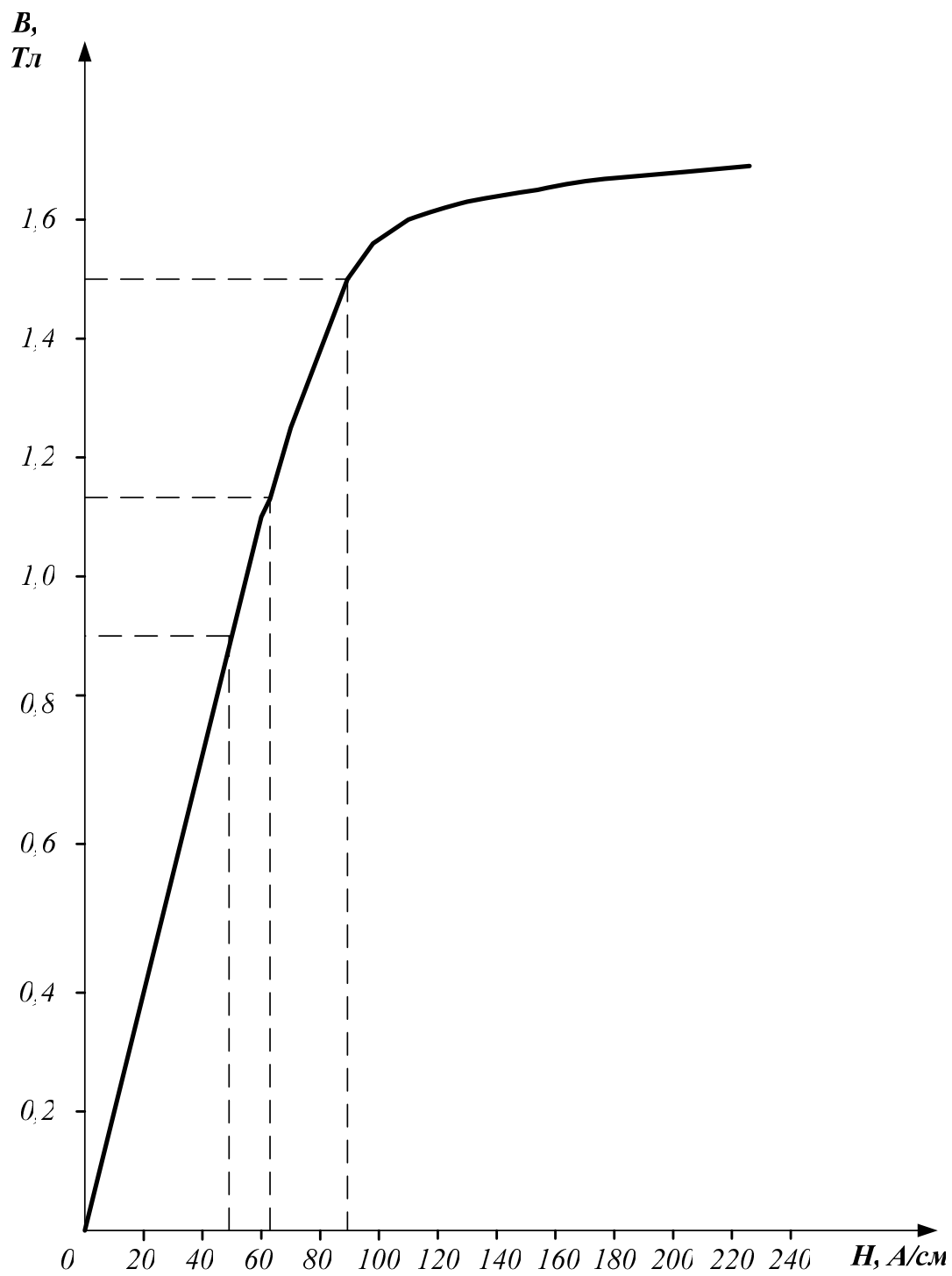


Рис. 1Д – Крива намагнічування сталі

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов по спец. «Электрические аппараты» И.С. Таев и др.–М.: Высшая школа, 1987.–352 с.
2. Захарченко Д.Д. Тяговые электрические аппараты: Учебник для вузов ж.д. транспорта.–М.: Транспорт, 1991.–247 с.
3. Родштейн Л.А. Электрические аппараты: Учеб. для техникумов.– 4–е изд. Перераб. и дополнен.– Энергоатомиздат. Ленинград.отделение, 1989.–304 с.
4. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни «Тягові електричні апарати» (для студентів 2–3 курсів денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 0922 – «Електромеханіка» ) Харківська національна академія міського господарства. – Х.: ХНАМГ, 2009.– 46 с.
5. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ до виконання лабораторних робіт з курсу “Тягові електричні апарати” (для студентів 2 – 3 курсів денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 (0922) „Електромеханіка” зі спеціальностей „Електричні системи і комплекси транспортних засобів”, „Електричний транспорт”)./Уклад. Кисельов М.І., Фатеєв В.М. –Х.: ХНАМГ , 2009. –70 с.
6. Миловзорова З.И. Электромагнитная техника в задачах, упражнениях и расчетах. Учеб. пособие для специальности «Автоматика и телемеханика».М.: Высшая школа, 1975.–216 с.

# НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки  
до проведення практичних занять  
з дисципліни

## «Електричні апарати»

(для студентів 2 курсу денної та 3 курсу заочної форм навчання за напрямом  
підготовки 6.050702 «Електромеханіка» зі спеціальності  
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

Укладачі: **КИСЕЛЬОВ** Михайло Іванович,  
**ФАТЕЄВ** Віктор Миколайович

Редактор *О. Ю. Кригіна*

Комп'ютерний набір *М. І. Кисельов*  
Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2011, поз. 176М

---

Підп. до друку 09.12.2011  
Друк на ризографі  
Тираж 50 пр.

Формат 60x84/16  
Ум. друк. арк. 1,5  
Зам. №

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4064 від 12.05.2011 р.