

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Методичні вказівки
до практичних занять

з навчальної дисципліни

«ТЯГОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ»

*(для студентів 2, 3 курсів денної і заочної форм навчання
за напрямом підготовки 6.050702 (0922) «Електромеханіка»
і слухачів другої вищої освіти)*

Методичні вказівки до практичних занять з навчальної дисципліни «Тягові електричні апарати» (для студентів 2, 3 курсів денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 (0922) «Електромеханіка» і слухачів другої вищої освіти) / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: М. І. Кисельов, В. М. Фатєєв. – Х.: ХНАМГ, 2008. – 31 с.

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

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

Рекомендовано кафедрою ЕТ,
протокол № 2 від 09.09.2008 р.

ВСТУП

Практичні заняття навчальної дисципліни «Тягові 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, характерним для різних видів магнітних елементів. Вирішуючи задачі, студенти знайомляться з розрахунком основних видів магнітних елементів. Крім того, виконуючи розрахунки, вони наглядно бачать порядок тих або інших величин (обмотувальні дані, розміри сердечників, осерді і т.д.).

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.д.

Електричні апарати є основними засобами автоматизації й електрифікації народного господарства. Вони знайшли широке застосування в енергетиці (електричні станції), у різних схемах керування електроустановками, електротермії, світлотехніці, плазменній техніці і та ін., а також у системах автоматики, телемеханіки, електрозв'язку, радіотехніці, в автоматизованих системах керування, 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 Кірхгофа

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 Кірхгофа до електричних кіл):

$$\sum \Phi_i = 0.$$

Де Φ_i – магнітні потоки i -ї витки, Вб.

Завдання 1

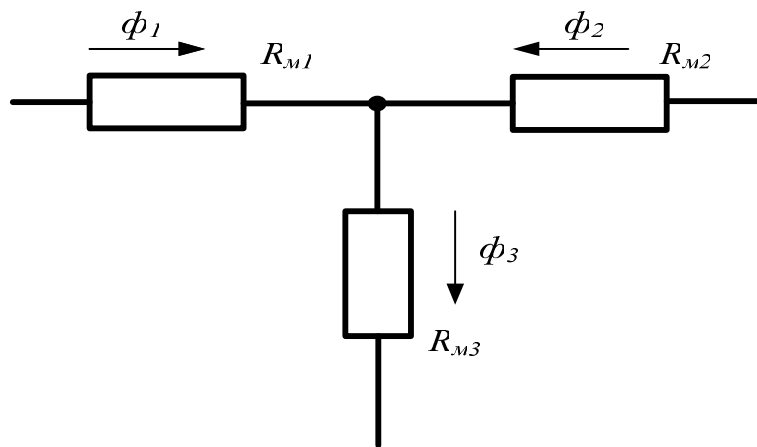


Рис. 1 – Схема вузла магнітного кола

Визначити потік Φ_2 (рис. 1), якщо потік $\Phi_1 = 0,35$ Вб, а потік $\Phi_3 = 0,83$ Вб:

Рішення:

Складемо рівняння згідно з першим законом Кірхгофа:

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

Звідси:

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

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

Таким чином визначили потік Φ_2 .

Завдання 2

Визначити потік Φ_3 , якщо потік $\Phi_1 = \Phi_2 = 0,05$ Вб, а потік $\Phi_4 = 0,07$ Вб:

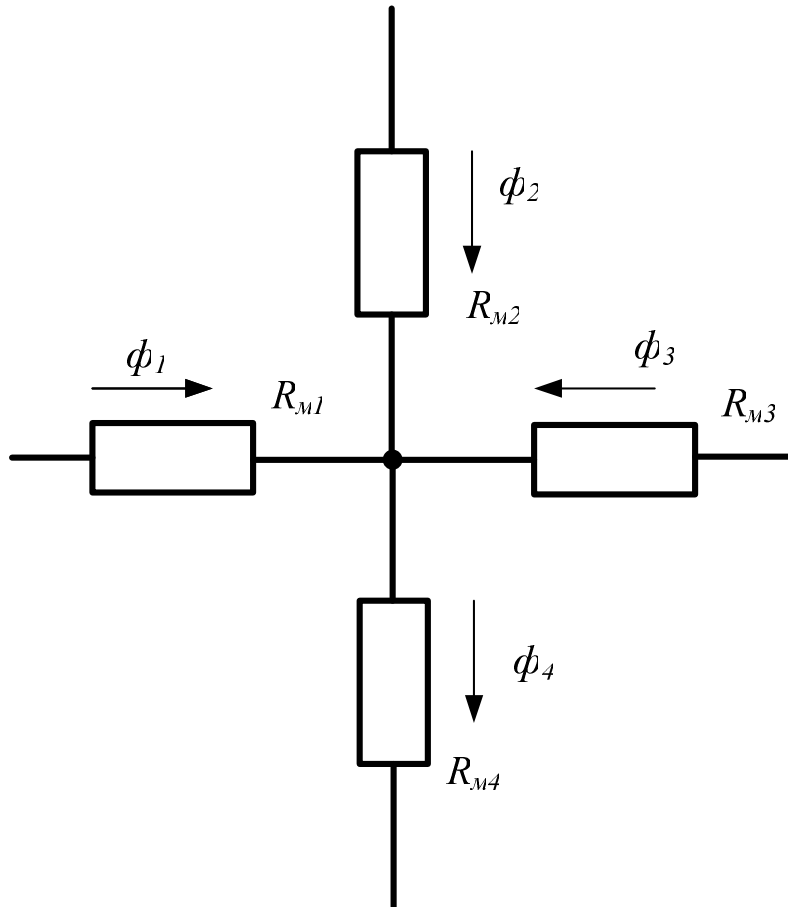


Рис. 2 – Схема вузла магнітного кола

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):

$$\sum I * W = \sum \Phi_i * R_{mi}$$

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 Φ на магнітний опір R_{mi} цієї ділянки. Таким чином:

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

де R_{mi} - магнітний опір ділянки, $1/\mu H$.

Завдання 3

До схеми (рис. 3) задані $R_{M1}=5 \cdot 10^5$ 1/Гн; $R_{M2}=1 \cdot 10^6$ 1/Гн; $R_{M3}=0,7 \cdot 10^6$ 1/Гн;
 $F_1 = 2000$ А; $F_2 = 5000$ А; $F_4 = 3000$ А; $\Phi_2=2,5 \cdot 10^{-3}$ Вб; $\Phi_4=1,0 \cdot 10^{-3}$ Вб;
 $\Phi_5=0,3 \cdot 10^{-3}$ Вб;

Визначити магнітний потік Φ_1 .

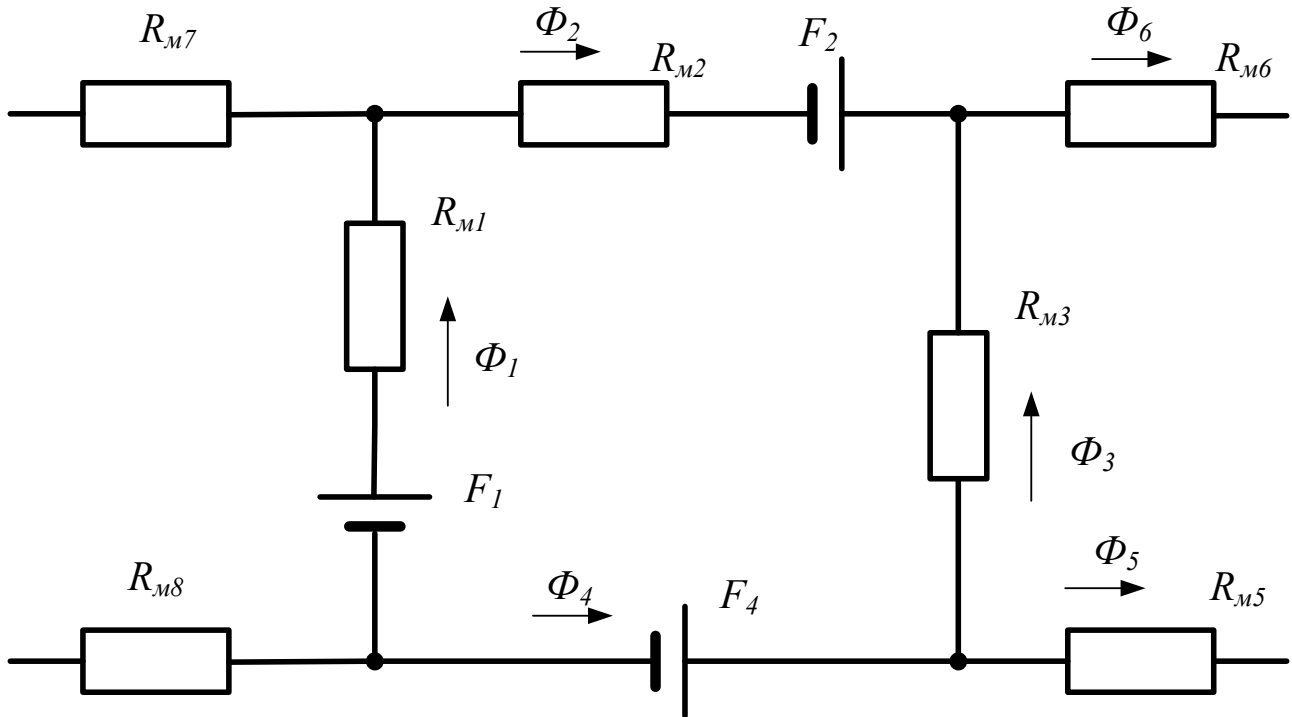


Рис. 3 – Схема магнітного кола

Рішення:

1. Визначаємо за 1-м законом Кирхгофа магнітний потік Φ_3 , для чого складемо рівняння:

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

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

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

2. 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 Φ_3 та Φ_4 .

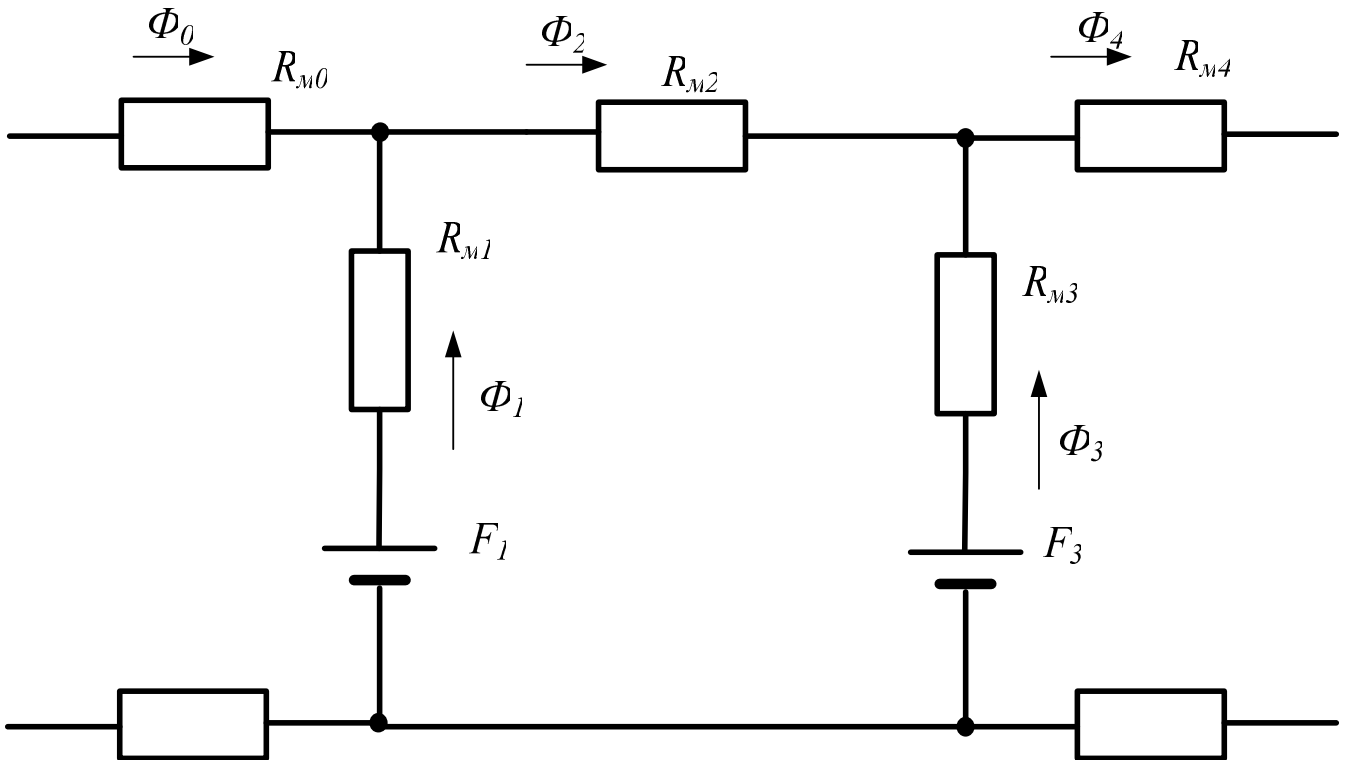


Рис. 4 – Схема магнітного кола

1.3 *Взаємозв'язок між потокозчепленням Ψ (Вб) , потоком Φ (Вб), кількістю витків W , перерізом магнітопровода S (м²), індукцією B (Тл), напруженістю поля H (А/м) і магнітною проникністю μ (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 Ψ , для обмотки з числом витків $W=500$ і потоку $\Phi = 0,007$ Вб.

Рішення:

Потокозчеплення Ψ 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 $0,375 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$.

Рішення:

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 μ - магнітна проникність.

Магнітна провідність ділянки $A_m = 1/R_m = (\mu \cdot S)/l$.

1.5. Електромагнітні елементи характеризуються індуктивністю $L = \Psi/i = (W \cdot \Phi)/I$, де Φ - потік, створений обмоткою з числом витків W при протіканні нею струму i (при зчепленні потоку Φ із усіма витками обмотки). Якщо використовувати залежність $\Phi = (i \cdot W)/R_m$, одержимо $L = (W \cdot \Phi)/i = (W/i) \cdot (i \cdot W)/R_m = W^2/R_m$ чи $L = W^2 \cdot A_m$.

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

Рішення:

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 характеризується наявністю у визначеній області 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 описується **рівняннями Максвелла**.

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

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

де: W - кількість витків; i – струм в обмотці, А; H - напруженість поля, А/м; l – довжина ділянки магнітопровода 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 в 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 чисельний приклад.

Завдання 8. Візьмемо два однакових в геометричному відношенні тороїдальних сердечники (рис. 5).

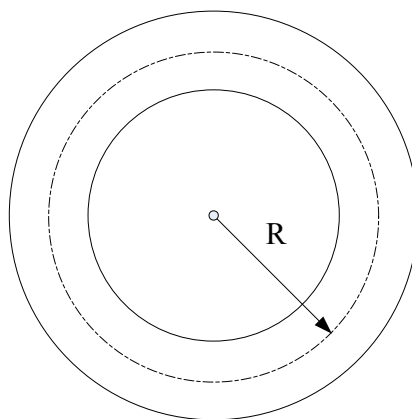


Рис. 5 – Дерев'яний і сталевий сердечник однакового радіусу R

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 сердечниках.

Рішення

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

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

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 неферромагнітних матеріалів відносна магнітна проникність, як вважають електрики, практично рівна одиниці. Тому магнітна індукція дерева є лінійною залежністю від напруженості магнітного поля. Звідси для дерев'яного сердечника знаходимо магнітну індукцію

$$B = \mu_0 * H,$$

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

Індукція в дерев'яному сердечнику

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

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; Φ - 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, В; ψ – потокозчеплення, Вб.

$$\psi = \Phi * W .$$

Стосовно до електромагнітних елементів синусоїдального перемінного 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; Φ_m амплітудне значення магнітного потоку, Вб.

Завдання 9. Обмотка, що розміщена на сердечнику дроселя з петлею гістерезису, показана на рис. 6, а, сполучена послідовно з активним навантаженням і підключена до синусоїдальної напруги мережі. Якісно побудувати криві зміни магнітної індукції в сердечнику і струмі в навантаженні у функції ωt за умови, що напруга мережі вище граничної, визначаємо за формулою

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

де $B_m = B_s$.

Рішення. На ділянці $0 — \alpha$ (рис. 6, б) напруга, прикладена до дроселя, майже повністю врівноважується е.р.с., індукованої в обмотці дроселя, оскільки робота дроселя відбувається на крутій ділянці кривої намагнічення. Струм трохи підвищується за рахунок невеликої зміни напруженості. Сердечник 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.

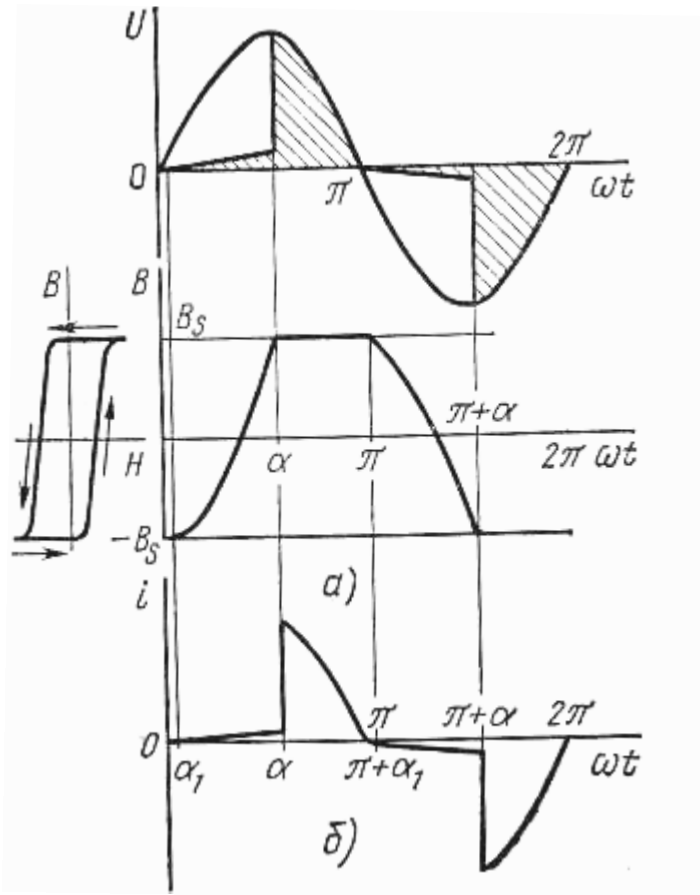


Рис. 6– Петля гістерезису сердечника дроселя і його характеристики

Завдання 10. Дросель із сталевим сердечником 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/см².

Написати рівняння для струму в дроселі. При рішенні нехтувати активним опором обмотки, е.р.с., що наводиться в ній, потоком розсіювання і втратами енергії в сердечнику.

Рішення. 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 назад пропорційну довжині зазору. Для порівняно простих форм полюсів магнітна провідність повітряних зазорів може бути обчислена аналітично. Наприклад, для полюсів (рис. 7) при малому повітряному зазорі між ними і при паралельно йдучих магнітних лініях $\Lambda = (\mu_0 * S) / \delta$, Гн, де S - переріз повітряного зазору, м²; δ - його довжина, м; μ_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;

δ - 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 проводимостей.

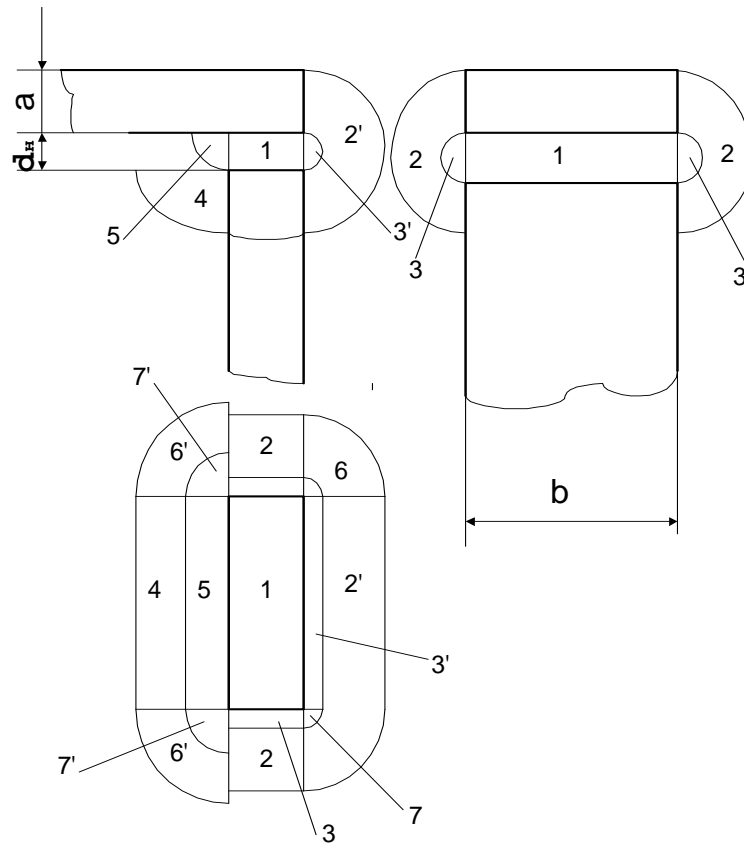


Рис. 7 – Магнітне поле між якорем і скобою:

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

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 т.д.)

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.

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).

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

$$\delta_H = \frac{a}{2} * tg \alpha$$

і потім після розбивки поля на прості фігури (рис. 7) визначаємо їхню провідність. Формули провідності окремих фігур мають такий вигляд:

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

$$G_3' = \mu_0 * 0,26 * b , G_4 = \mu_0 * \frac{2 * b}{\pi * (\delta_H / a + 0,5)} , G_5 = \mu_0 * 0,52 * b , G_6 = G_6' = \mu_0 * 0,25 * a ,$$

$$G_7 = \mu_0 * 0,077 * \delta_H .$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Повна провідність дорівнює:

$$G_{\delta_n} = (0,66 + 2 \cdot 0,0039 + 0,0555 + 2 \cdot 0,0018 + 0,026 + 0,1 + 0,052 + 4 \cdot 0,0018) \cdot 10^{-6} = 0,983 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

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

3.1. Тороїд з розподіленою обмоткою

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

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

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

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

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

Якщо заданий потік Φ 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 Φ :

$$\Phi = B_1*S.$$

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

Рішення:

Знаходимо напруженість магнітного поля у магнітопроводі

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

$$H_1 = 1000 / (3,14*50*10^{-3}) = 6370 \text{ А/м} = 63,7 \text{ А/см}.$$

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. 8) - повний потік $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$, де Φ_1, Φ_2 - потоки в розгалуженій частині магнітопроводу; Повна магніторушійна сила $F = F_1 + F_2$, де F_1, F_2 - падіння магнітних потенціалів на ділянках обтічних потоками Φ, Φ_1, Φ_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 т.д., а $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi/2$ і розрахунок ведеться для половини магнітопроводу, як для

тороїда. Обидві половини являють собою два паралельно включених магнітопровода з потоком $\Phi/2$, у яких діє МДС F .

Якщо заданий потік Φ , 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 т.д.

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

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

Завдання 12. Знайти струм в обмотці та розподіл потоку за магнітопроводом для симетричного електромагніта, наведеного на рис. 8.

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 $B_0 = 1,5 \text{ Тл}$.

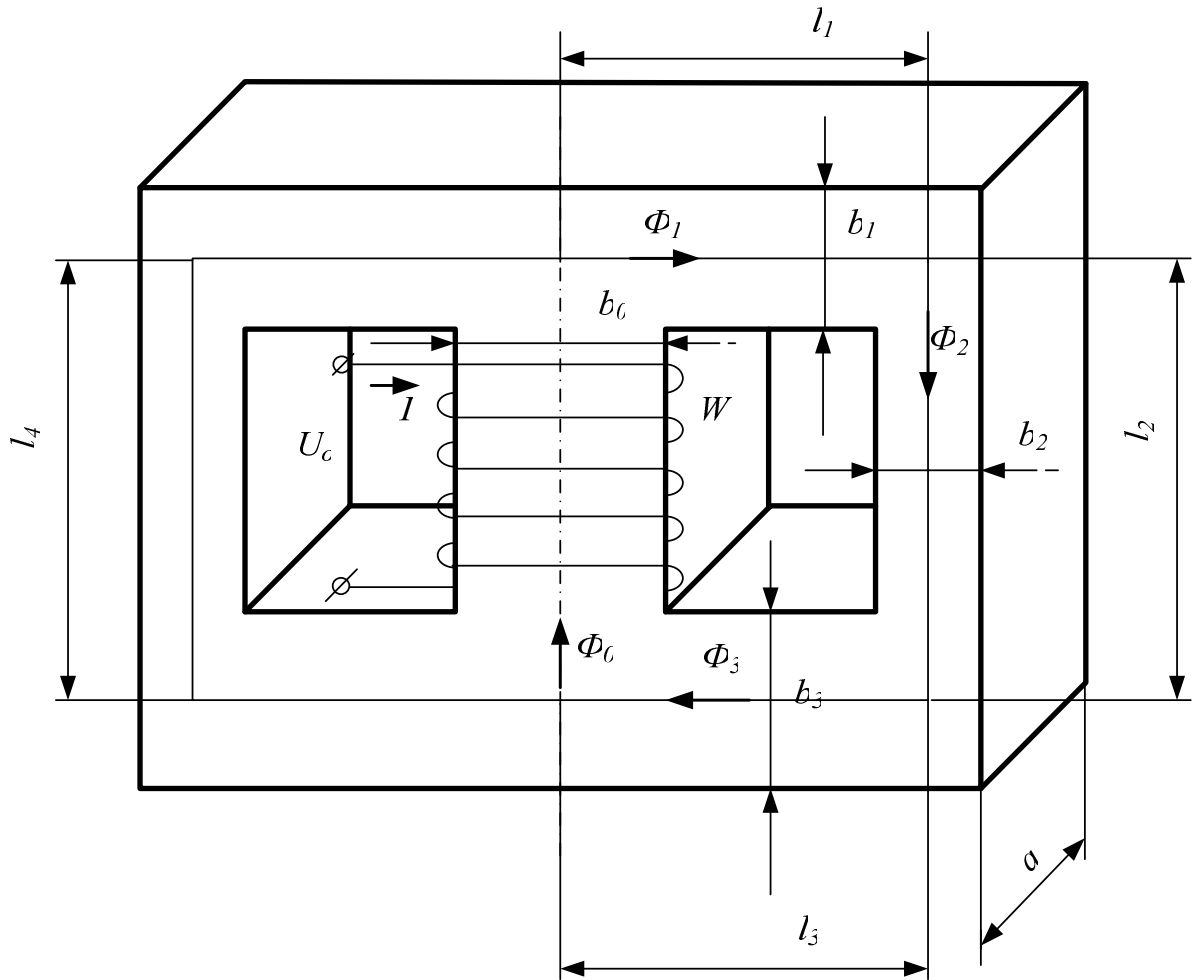


Рис. 8 – Схема електромагніта

Рішення:

Визначаємо магнітний потік Φ_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 Φ_1, Φ_2, Φ_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:

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

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

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

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

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

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

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

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 $S = 1,77 * 10^{-4} \text{ м}^2$, рахуючи магнітну систему ненасиченою, а магнітну проникність – постійною. Порівняти отримане значення P_{e-} та $P_{e\sim}$.

Рішення.

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

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

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 сердечника підключена до мережі змінної напруги $U = 50 \text{ В}$, частотою $f = 400 \text{ Гц}$. Переріз сталі сердечника $S = 0,16 \text{ см}^2$, число витків обмотки $W = 1600$. Визначити амплітуду магнітної індукції в сердечнику.

Рішення. 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 сердечнику з амплітудою $1,0 \text{ Тл}$, якщо частота джерела живлення $f = 50 \text{ Гц}$; $W = 1000$; $S = 10 \text{ см}^2$.

Рішення:

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

Завдання 15. Обмотку сердечника, розраховану на напругу $U = 127 \text{ В}$ при частоті $f = 50 \text{ Гц}$, включили під напругу $U_1 = 200 \text{ В}$ частотою $f_1 = 400 \text{ Гц}$. Що відбудеться з амплітудою магнітної індукції?

Рішення:

Амплітуда магнітної індукції

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

$$\text{Де } k = \frac{1}{4,44 * W * S}.$$

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 сердечнику дроселя, підключеного до синусоїдальної напруги з амплітудою 141 В і частотою 400 Гц, дорівнює 1,0 Тл; $S = 0,16$ см². Визначити амплітуду магнітної індукції в тому ж сердечнику при $W = 3000$.

Рішення. 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 електромагніту змінного струму в порівнянні з електромагнітом постійного струму при однакових силі тяги і ході якоря, якщо найбільше значення індукції зберегти незмінним.

Рішення. 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:

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

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 $I_{cp}=const$ во всьому діапазоні зміни ходу якоря, проходила вище протидіючої; для чіткого відпускання (повернення) навпаки, тягова характеристика, побудована при $I_{отп}=const$, повинна проходити нижче протидіючої.

Завдання 18. Визначити силу спрацьовування $F_{спр}$, що намагнічує, зображеного на рис. 9 магнітопроводу, необхідну для створення при початковому робочому зазорі $\delta = 5 * 10^{-3}$ м тягового зусилля $Q_{то} = 5$ Н.

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

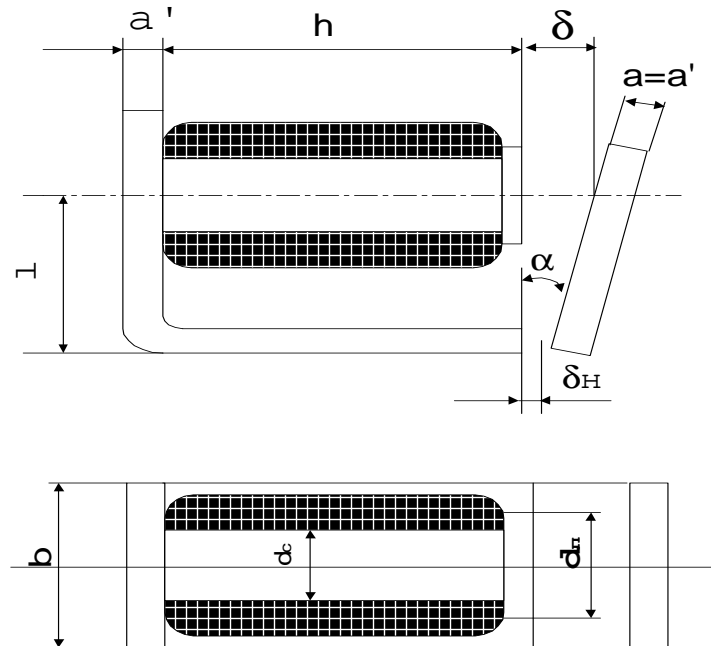


Рис. 9 – Електромагніт клапанного типу

Рішення.

За формулою Максвелла знаходимо магнітний потік спрацьовування

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

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:

$$G_{\partial} = m_0 * \frac{d_n^2}{0,00233 * d_n + 1,068 * \partial} = \frac{1,25 * 10^{-6} * 15^2 * 10^{-6}}{0,00233 * 15 * 10^{-3} + 1,068 * 5 * 10^{-3}} = 5,2 * 10^{-8} \text{ Гн}$$

Сумарна провідність:

$$G_Y = \frac{G_{\partial n} * G_{\partial}}{G_{\partial n} + G_{\partial}} = \frac{20 * 10^{-8} * 5,2 * 10^{-8}}{20 * 10^{-8} + 5,2 * 10^{-8}} = 4 * 10^{-8} \text{ Гн}$$

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 повинен 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 ρ - 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

$$U_{кдоп} = (0,5 \div 0,8) U_p,$$

де U_p – напруга розм'якшення.

Звідси припустимий опір контакту буде

$$R_{кдоп} = U_{кдоп} / I = ((0,5 \div 0,8) * U_p) / I$$

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

При рішенні задачі необхідно враховувати, що місток має два контакти (рис. 10) і опором плівки можна зневажити, тобто

$$R_k = R_n$$

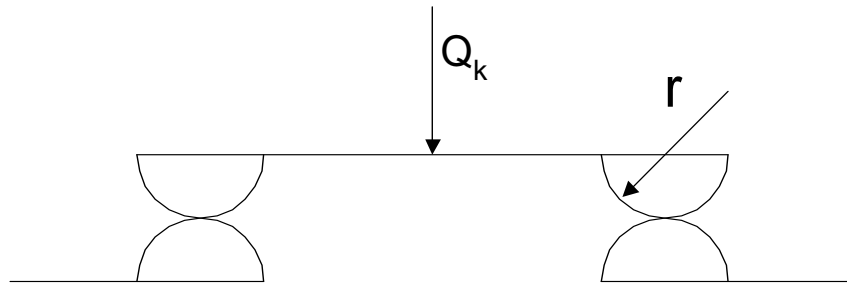


Рис. 10- Контактний місток.

Завдання

$\rho_m = 1,62 \cdot 10^{-6}$ 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/см² – модуль пружності міді;

$E_c = 7350000$ Н/см² – модуль пружності срібла;

Визначити величину контактного 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 r

Матеріал контакту : мідь

Струм I , А – 5А

Радіус сфери r – 8,5мм

Допустима напруга на контакт

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

Допустимий опір контакту

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

Перехідний опір контакту

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

Радіус еквівалентної площадки дотику, a

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

Сила стиску контакту

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

$$Q_k = (a^3 * E) / (0,86^3 * r) \quad Q_k = 3,06 * 10^{-6} H$$

Сила стиску для контактної містки

$$Q_{км} = 2 * Q_k \quad Q_{км} = 2 * 3,06 * 10^{-6} H = 6,12 * 10^{-6} H.$$

Завдання 19. Визначити величину шунтуючого опору r (рис. 11), який необхідно включити паралельно індуктивності кола для недопущення іскрового розряду між контактами. Напряга батареї $U = 60$ В, активний опір обмотки $R = 500$ Ом.

Рішення. Напряга на контактах в момент розмикання ключа ($t=0$)

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

Где $i(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{R+r}{L}t}$ - переходний струм в колі, що визначається під час рішення

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

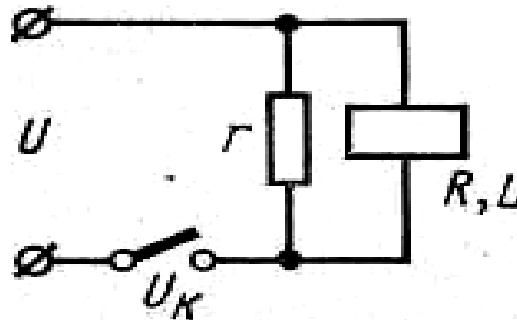


Рис. 11 – Запобіг іскрового розряду на контактах

Найбільша напряга на контактах буде в перший момент після їх розмикання, т. е. при $t = 0$. Підставляя 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

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

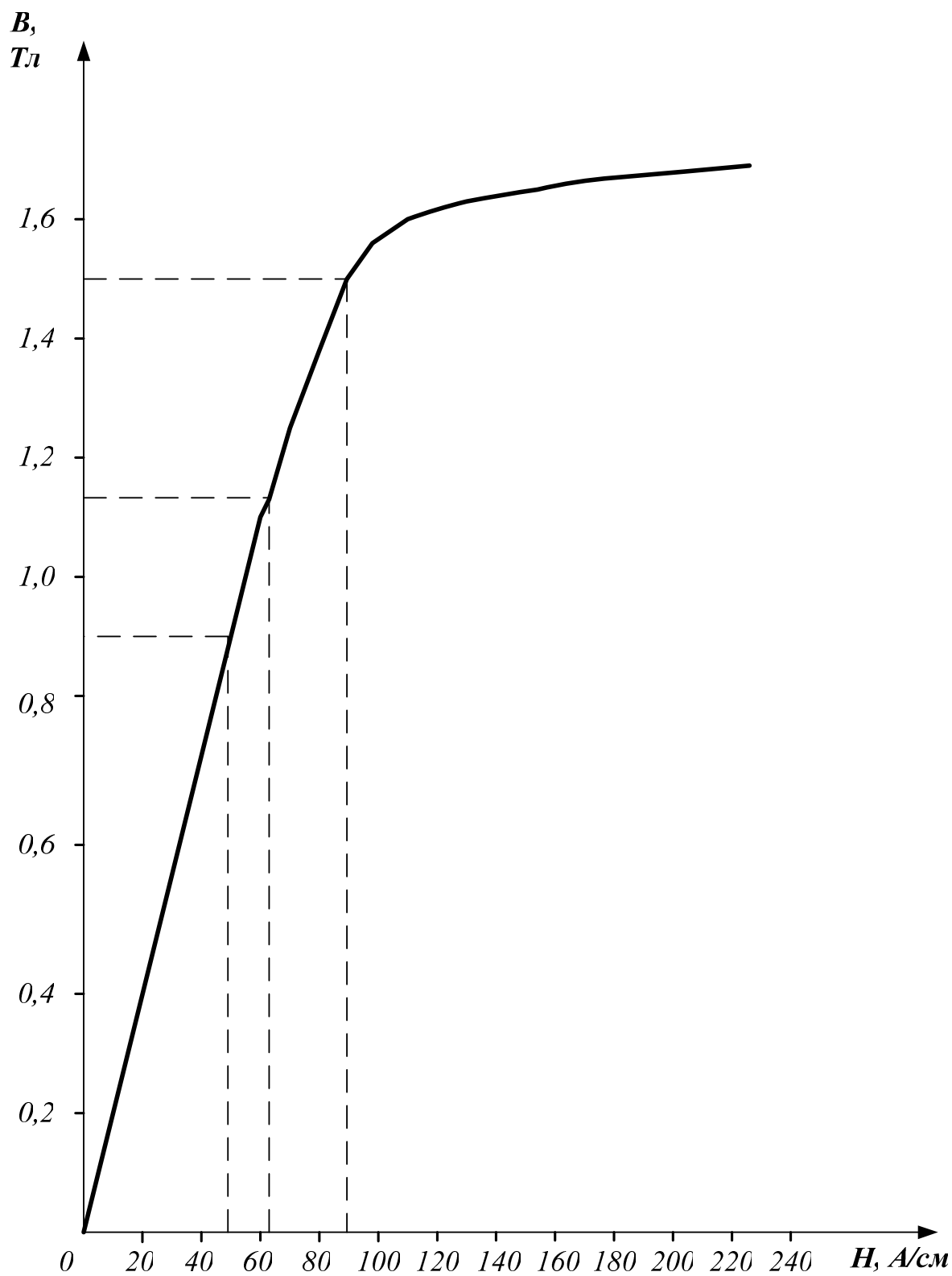


Рис. 1Д – Крива намагнічування сталі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кисельов М.І., Нем В.К. Тягові електричні апарати. Конспект лекцій.- Харків, ХДАМГ, 2003 р.-74с.
2. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов по спец. «Электрические аппараты» И.С.Таев и др.-М.:Высшая школа, 1987.-352 с.
3. Захарченко Д.Д. Тяговые электрические аппараты: Учебник для вузов ж.д. транспорта.-М.: Транспорт, 1991.-247 с.
4. Родштейн Л.А. Электрические аппараты: Учеб. для техникумов.- 4-е изд. Перераб. и дополнен.- Энергоатомиздат. Ленинград.отделение, 1989.-304 с
5. Методичні вказівки до курсового проектування для студентів 2, 3 курсів денної форми навчання спеціальності 7.092.202/ Уклад. М.І.Кисельов, К.О.Сорока.-Харків,ХГАГХ,2002 р.- 45с
6. Миловзорова З.И. Электромагнитная техника в задачах, упражнениях и расчетах. Учеб. пособие для специальности «Автоматика и телемеханика».М.: Высшая школа, 1975.-216с.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	3
1. Завдання з електромагнітних взаємодій, основних законів для розрахунку магнітних кіл.	4
2. Завдання з елементів магнітного кола та з розрахунку повітряних зазорів.	13
3. Розрахунок магнітних кіл при постійному струмі без обліку потоків розсіювання.	16
4. Розрахунок магнітних кіл при змінному струмі.	21
5. Тягова характеристика (статична). Протидіючі зусилля (навантаження).	23
6. Електричні контакти. Опір електричного контакту. Параметри контактних конструкцій.	25
Список літератури.	30

Навчальне видання

Методичні вказівки до практичних занять з навчальної дисципліни «**Тягові електричні апарати**» (для студентів 2, 3 курсів денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 (0922) «Електромеханіка» і слухачів другої вищої освіти).

Укладачі: Кисельов Михайло Іванович,
Фатеев Віктор Миколайович

Редактор *Д. Ф. Курильченко*
Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2008, поз. 266 М

Підп. до друку 04.10.2008 р.	Формат 60x84 1/16
Друк на ризографі.	Ум. друк арк. 1,3
Тираж 300 пр.	Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 731 від 19.12.2001