

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**



**В.Ф. Болюх, С.М.Кожемякін, В.С. Марков**

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРИБОРІВ**

**Навчальний посібник**

**Харків 2016**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**В.Ф. Болюх, С.М.Кожемякін, В.С. Марков**

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ**

Навчальний посібник  
до курсової роботи з дисципліни  
«Електротехніка та електромеханіка»  
для студентів неелектротехнічних спеціальностей  
денного та заочного відділення

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол №1 від 03.02.2016

Харків  
НТУ «ХП»  
2016

УДК 621.3.011.7  
ББК 31.211  
Б 79

Авторський колектив:

*В.Ф. Болюх, С.М.Кожемякін, В.С. Марков*

Рецензенти:

*Ю.В. Батигін*, д-р. техн. наук, проф., Харківський національний автотодорожний університет;

*Г.М. Сучков*, д-р. техн. наук, проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Болюх В.Ф.**

Б 79 Розрахунок параметрів електротехнічних пристроїв : навч. посібник/  
В.Ф. Болюх, С.М. Кожемякін, В.С. Марков. – Харків: НТУ «ХПІ»,  
2016. – 120 с.

В посібнику наведено загальні теоретичні відомості про будову, принцип дії та розрахунок характеристик різних електротехнічних пристроїв, наведені варіанти та приклади розрахунку завдань. Призначено для самостійної роботи студентів очного та заочного відділення над курсовою роботою або розрахунково-графічними завданнями низки електротехнічних дисциплін, зокрема «Електротехніка та електромеханіка».

УДК 621.3.011.7  
ББК 31.211

Іл.70. Табл.13. Бібліогр.:7 назв.

ISBN

© Болюх В.Ф., Кожемякін С.М.,  
Марков В.С. 2016

## ВСТУП

У даному виданні наведено теоретичний матеріал та завдання до курсової роботи з дисципліни „**Електротехніка і електромеханіка**” за темою „**Розрахунок параметрів електротехнічних пристроїв**”, які спрямовані на закріплення теоретичних знань та відпрацювання практичних навичок розрахунку відповідних пристроїв.

Для індивідуальної роботи студентів подано теоретичний матеріал та приклади розрахунку електротехнічних та електромеханічних пристроїв.

У навчальному посібнику сформульовано завдання курсової роботи та подані варіанти вихідних даних до них, а конкретний обсяг роботи уточнює викладач, який веде курс лекцій з вказаної дисципліни.

При оформленні курсової роботи треба наводити повністю постановку задач і відповідні вихідні дані зі свого варіанта, порядок розрахунку і його результати, необхідні схеми об'єктів і графіки. Загальні правила оформлення повинні відповідати стандарту НТУ “ХП” щодо пояснювальних записок до курсових робіт.

Звіт про курсову роботу треба виконувати, починаючи з титульного аркуша, зразок якого подано у ДОДАТКУ 1 на стор. 111. Схеми та графіки креслять за допомогою інструментів згідно з ДСТУ 3120-95. Графіки залежностей виконують із зазначенням на осях стандартних буквених позначень величин і одиниць вимірювань.

Варіанти вихідних даних до конкретних задач надані в табл. 6.1- 6.8.

# 1. МАГНІТНІ КОЛА

В електротехнічних пристроях перетворення механічної енергії в електричну і навпаки відбувається за допомогою магнітного поля, що відображено в законах електромагнітної індукції і Ампера. Магнітне поле збуджується обмотками зі струмом або постійними магнітами. Для посилення цього поля і концентрації в заданих активних зонах використовуються феромагнітні осердя.

## 1.1. Параметри, що характеризують магнітне поле

Магнітне поле прийнято зображати силовими лініями, направленими від північного до південного полюса постійного магніту (рис. 1.1). Ці силові лінії замкнені і являють собою пружні, натягнуті, нерозривні нитки, між якими діє боковий тиск, внаслідок чого вони не перетинаються друг з другом.

Магнітний потік  $\Phi$  характеризує число силових ліній магнітного поля, які пронизують поверхню площею  $S$  (рис. 1.1). Магнітний потік  $\Phi$  вимірюється в веберах [Вб] і дорівнює

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (1.1)$$

де  $\alpha$  – кут між нормаллю до поверхні  $S$  і напрямком силових ліній;  $B$  – індукція магнітного поля.

Індукція магнітного поля  $B$  – векторна величина, яка характеризує інтенсивність магнітного поля у заданій точці простору. Її напрямком співпадає з дотичною до силової лінії (рис. 1.1)

$$B = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}. \quad (1.2)$$

Індукція  $B$  вимірюється в теслах [Тл]=[Вб/м<sup>2</sup>]. Якщо магнітне поле рівномірне, то

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1.3)$$

Потік вектора індукції магнітного поля через замкнену поверхню дорівнює нулю

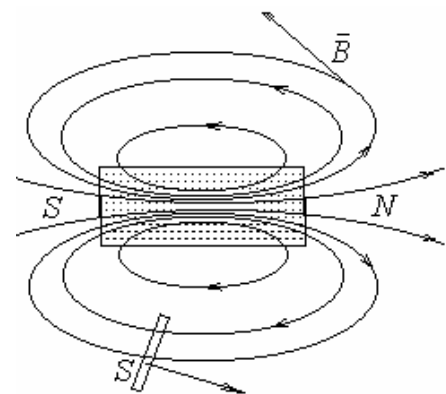


Рисунок 1.1

$$\Phi = \int_s \bar{B} d\bar{s} = 0. \quad (1.4)$$

Це твердження говорить, що силові лінії завжди є замкненими і, таким чином, формулюється принцип неперервності силових ліній.

*Напруженість магнітного поля*  $H$  – векторна величина, яка співпадає з напрямком індукції і характеризує інтенсивність магнітного поля у вакуумі (за відсутністю магнітних речовин). Напруженість вимірюється в [А/м]. Індукція пов'язана з напруженістю магнітного поля співвідношенням

$$\bar{B} = \mu_a \bar{H}, \quad (1.5)$$

де  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність середовища.

Вводять поняття відносної магнітної проникності

$$\mu_r = \mu_a / \mu_0, \quad (1.6)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала, дорівнює абсолютній магнітній проникності у вакуумі.

Таким чином, у вакуумі індукція і напруженість магнітного поля мають лінійну залежність

$$B = \mu_0 H. \quad (1.7)$$

Магнітне поле завжди утворюється електричним струмом. Електричний струм і його магнітне поле існують одночасно. В постійних магнітах його створюють мікроструми.

## 1.2. Класифікація магнітних кіл

Сукупність елементів, що збуджують і проводять магнітне поле, можна розглядати як *магнітне коло*, якщо контури замикання силових ліній поля очевидні і це поле сконцентровано в межах локальних областей простору, що явно виділяються. Для опису процесів в магнітних колах базовими величинами являються магнітний потік  $\Phi$ , магніторухійна сила (МРС)  $F$  і магнітна напруга  $U_m$ .

До способів, що застосовуються при розрахунку магнітних кіл, відноситься підрозділ магнітопроводу по контурам замикання основних силових ліній  $l$  на однорідні ділянки. Ділянка вважається однорідною, якщо на її довжині  $l_k$  можна прийняти напруженість магнітного поля постійною, тобто  $H_k = \text{const}$ , де  $k$  – номер ділянки. Передбачається також, що по площі поперечного перерізу  $S_k$  поле розподілено рівномірно і вектори  $\bar{H}_k$  і  $\bar{B}_k$

направлені паралельно довжині  $l_k$  і перпендикулярно  $S_k$ . Таким чином, магнітна індукція на однорідній ділянці пов'язана з її магнітним потоком найбільш простою формулою:  $B_k = \Phi_k / S_k$ .

Для неферомагнітних ділянок – проміжків відносна магнітна проникність  $\mu_r \approx 1$  і магнітні властивості характеризуються лінійною залежністю  $B_k = \mu_0 H_k$ . Для феромагнітних осердь  $\mu_r \gg 1$  і ні є постійною величиною. Тому тут використовуються криві намагнічування – залежності  $B(H)$  або  $H(B)$  для конкретних феромагнітних матеріалів. На рис. 1.2 подані криві намагнічування для литої сталі марки Ст.2 і двох марок листової електро-технічної сталі – 1211 і 1512.

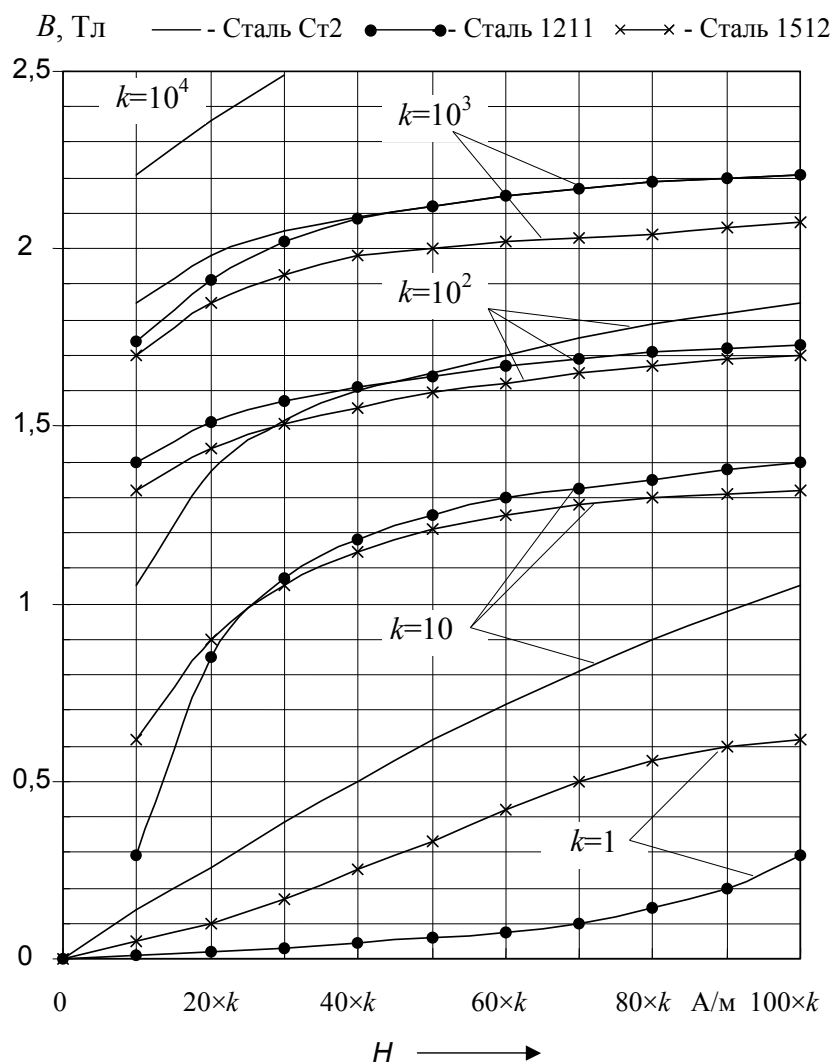


Рисунок 1.2

Магнітні кола класифікуються за способом збудження магнітного потоку, кількості обмоток і контурів замикання основного магнітного потоку: нерозгалужені (рис. 1.3, а, б) або розгалужені (рис. 1.3, в); по струк-

турі магнітопроводу – однорідні (складаються із однієї однорідної ділянки) (рис. 1.3, а) і неоднорідні (рис. 1.3, б, в).

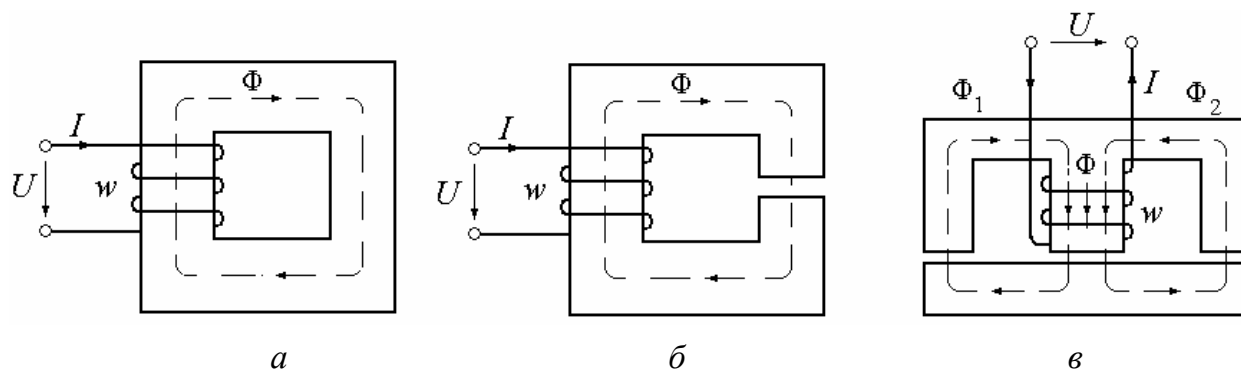


Рисунок 1.3

До однорідних відносяться кола, напруженість магнітного поля в яких по всій довжині магнітопроводу залишається незмінною. До неоднорідних відносяться магнітні кола, які мають по своїй довжині непостійну напруженість, що навіть при одному магнітному потоці обумовлюється різними площами поперечного перерізу та абсолютною магнітною проникливістю окремих ділянок кола. Неоднорідними являються також магнітні кола, які мають поля розсіювання. Зовнішніми признаками, за якими можна судити про однорідність ділянки магнітного кола, є відсутність в її межах відгалужень магнітного потоку, постійність площі перерізу  $S_k$  і однорідність матеріалу за магнітними властивостями.

### 1.3. Закони магнітних кіл

Електромагнітною індукцією називають явище збудження ЕРС у контурі при зміні магнітного потоку, зчепленого з ним. Індукована ЕРС за законом електромагнітної індукції дорівнює швидкості потоку, зчепленого з контуром

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.8)$$

Знак «мінус» відображає *правило Ленца* – струм, створюваний у замкненому контурі індукованої ЕРС, завжди має такий напрям, що магнітний потік струму протидіє зміні магнітного потоку зовнішнього поля, яке його спричинило.

Якщо провідник переміщується у постійному магнітному полі, то індукована ЕРС за законом електромагнітної індукції дорівнює



$$E = BlV \sin \alpha, \quad (1.9)$$

де  $l$  – активна довжина провідника (рис. 1.4);  $V$  – швидкість переміщення провідника;  $B$  – індукція магнітного поля;  $\alpha$  – кут між напрямком силових ліній і напрямком переміщення провідника.

Напряг індукованої в провіднику ЕРС визначається за *правилом правої руки* (рис. 1.4).

Силова дія магнітного поля на провідник зі струмом визначається *законом Ампера*, який лежить в основі розрахунків перетворення електричної енергії в механічну в електродвигунах. За *законом Ампера*, якщо провідник зі струмом  $I$  знаходиться у магнітному полі з індукцією  $B$ , то на провідник довжиною  $l$  діє механічна сила

$$F = BIl \sin \alpha, \quad (1.10)$$

де  $\alpha$  – кут між напрямком силових ліній і напрямком провідника (рис. 1.5).

Напряг електромеханічної сили  $F$  завжди перпендикулярний до провідника зі струмом і магнітним силовим лініям. На практиці цей напрямок визначається за *правилом лівої руки*: (рис. 1.5).

*Закон повного струму* встановлює зв'язок між напругою магнітного поля і струмом, що створив це поле: лінійний інтеграл від вектора напруженості магнітного поля вздовж будь-якого замкненого контуру  $l$ , який пронизують провідники зі струмом, дорівнює повному струму, що охоплює даний контур (рис. 1.6). Повний струм – алгебраїчна сума струмів, охоплених замкненим контуром.

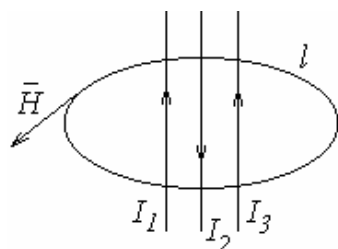


Рисунок 1.6

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^N I_k, \quad (1.11)$$

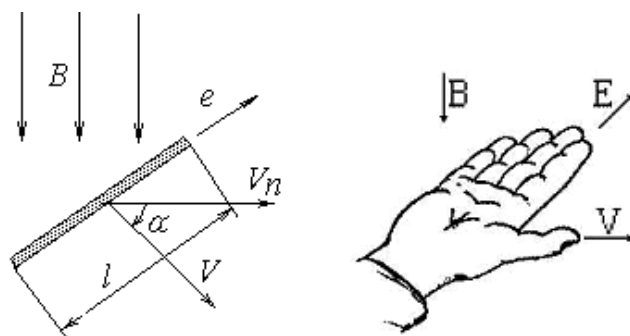


Рисунок 1.4

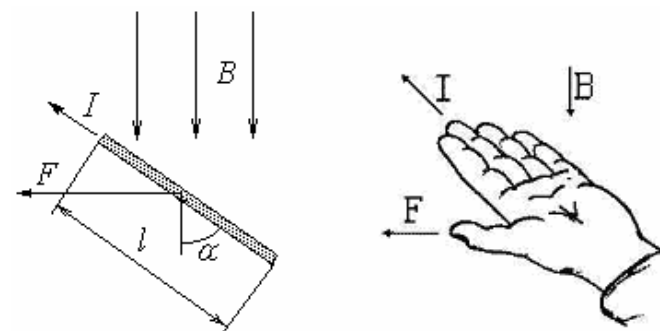


Рисунок 1.5

де  $N$  – кількість струмів.

Між електричними і магнітними колами можна встановити певні аналогії, які подані в табл. 1.1

Таблиця 1.1 – Аналогія між електричними і магнітними колами

Електричні величини	Позначення і вираз		Магнітні величини	Позначення і вираз
Струм	$I$	–	Потік	$\Phi$
ЕРС	$E$	–	МРС	$F = wI$
Опір	$R = \rho \frac{l}{S}$	–	Опір	$R_M = \frac{l}{\mu_a S}$
Напруга	$U = RI$	–	Магнітна напруга	$U_M = H_k l_k = \Phi R_M$
Питома провідність	$\gamma = \frac{1}{\rho}$	–	Магнітна проникність	$\mu_a$

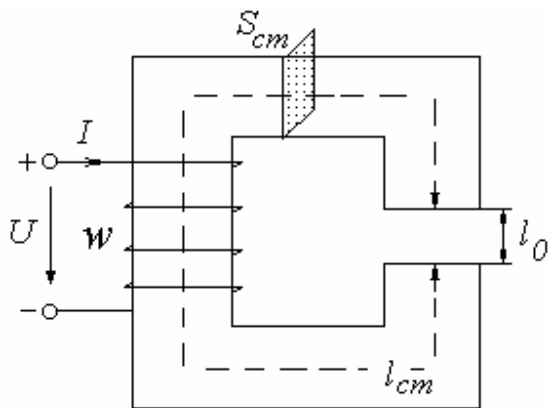


Рисунок 1.7

Розглянемо котушку зі сталевим осердям, що представляють собою нерозгалужене неоднорідне магнітне коло з постійною МРС  $F = wI$  (рис. 1.7), яке має  $l_{ст}$  – довжину силової лінії на протязі всієї ділянки у сталі;  $l_0$  – довжину повітряного проміжку;  $S_{ст}$  – площу поперечного перерізу сталевого осердя;  $w$  – число витків обмотки.

Закон Ома для магнітного кола зв'язує магнітний потік з магнітною напругою однорідної ділянки або з МРС обмотки однорідного магнітного кола

$$\Phi = \frac{Iw}{R_{M_{ст}} + R_{M_0}} = \frac{Iw}{\sum R_M}, \quad (1.12)$$

де  $\sum R_M$  – сумарний магнітний опір [ $\Gamma H^{-1}$ ];

$$R_{M_{ст}} = \frac{l_{ст}}{\mu_{ст} S_{ст}} \text{ – магнітний опір сталевій ділянці}; \quad (1.13)$$

$$R_{M_0} = \frac{l_0}{\mu_0 S_0} - \text{магнітний опір повітряного проміжку.} \quad (1.14)$$

1-й закон Кірхгофа для магнітного кола – алгебраїчна сума магнітних потоків віток розгалуженого магнітного кола у вузлі дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^M \Phi_k = 0, \quad (1.15)$$

де  $M$  – кількість віток розгалуженого магнітного кола у вузлі.

Так для кола, зображеного на рис. 1.2, в можна записати

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (1.16)$$

2-й закон Кірхгофа для магнітного кола – алгебраїчна сума падінь магнітної напруги  $U_M$  на  $k$  ділянках замкненого контуру магнітного кола дорівнює алгебраїчній сумі МРС  $F$ , діючих в цьому ж контурі

$$\sum_{k=1}^n U_{Mk} = \sum_{k=1}^m F_k, \quad (1.17)$$

де  $n$  – кількість ділянок замкненого контуру магнітного кола;

$m$  – кількість МРС, діючих в контурі магнітного кола.

Крім основних магнітних потоків, що замикаються по головним контурам магнітопроводу, в уточнених розрахунках магнітних кіл враховуються також відносно невеликі потоки розсіювання. Приклад розподілу повного потоку  $\Phi_{\Pi}$  в котушці зі сталевим осердям на основний потік  $\Phi$  і потік розсіювання  $\Phi_{\text{роз}}$  подано на рис. 1.8.

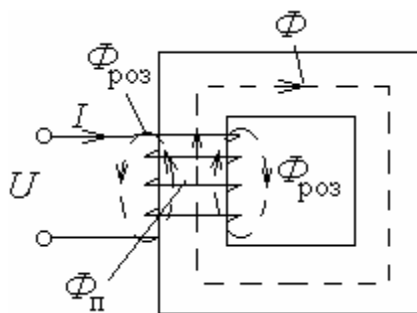


Рисунок 1.8

Потоки розсіювання враховуються на ділянках, укладених усередині обмоток, де приймається

$$\Phi_{\Pi} = \Phi + \Phi_{\text{роз}} = k_{\text{роз}} \Phi, \quad (1.18)$$

тут  $k_{\text{роз}}$  – коефіцієнт розсіювання, який визначається з урахуванням досліду детального розрахунку магнітних полів і може знаходитися

в межах 1...1,5.

Якщо ділянка магнітного кола знаходиться на шихтованій частині магнітопроводу, набраного із листової сталі, то замість габаритної площі поперечного перерізу  $S_0$  враховується безпосередньо сумарна площа пе-

перізу листів  $S_k = k_3 S_0$ , де  $k_3$  – коефіцієнт заповнення осердя сталлю (при товщині листів  $\Delta = 0,2 \dots 0,5$  мм  $k_3$  може знаходитися в межах  $0,83 \dots 0,96$ ).

Для проміжків в магнітопроводі площа поперечного перерізу  $S_k$  береться приблизно рівною габаритній площі  $S_0$  меншого із прилягаючих торців феромагнітного осердя.

#### 1.4. Принцип розрахунку магнітних кіл постійного струму

Основною задачею розрахунку магнітного кола вважають пряму з наступним формулюванням.

*Задано:* магнітний потік  $\Phi$ , розміри магнітопроводу, матеріал осердя, марка сталі, крива намагнічування  $B(H)$ .

*Знайти:*  $F = wI$  – МРС обмотки, яка необхідна для створення цього магнітного потоку  $\Phi$ .

*Послідовність розрахунку:*

1) коло розбивається на ділянки з таким розрахунком, щоб індукція і напруженість магнітного поля на протязі ділянки залишались незмінними. За конструктивними розмірами магнітопроводу визначаються довжина  $l_k$  і площа поперечного перерізу кожної ділянки  $S_k$ . Вважаємо, що потік  $\Phi$  на кожній ділянці однаковий.

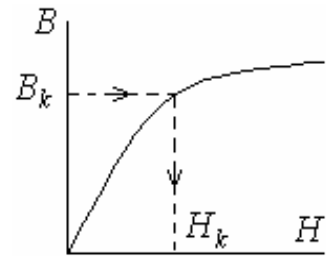


Рисунок 1.9

2) за заданим магнітним потоком  $\Phi$  визначаємо індукцію на кожній ділянці  $B_k = \Phi / S_k$ .

3) потім, знаючи індукцію  $B_k$ , по кривій намагнічування визначаємо напруженість  $H_k$  для феромагнітних ділянок (рис. 1.9). Для немагнітних ділянок напруженість розраховуємо за формулою  $H_k = B_k / \mu_0$ .

4) знаючи  $H_k$ , за законом повного струму знаходимо МРС

$$F = Iw = \sum_{k=1}^n H_k l_k,$$

а потім знаходимо і струм  $I = \frac{F}{w}$ .

## 1.5. Магнітні кола зі змінною магніторушійною силою

Магнітні кола змінного магнітного потоку потребують особистого підходу. Із них найменш складний для розрахунку, але практично широко розповсюджений, випадок синусоїдного характеру магнітного потоку

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (1.19)$$

де  $\Phi_m$  – амплітуда;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота;  $t$  – час.

Цей випадок відповідає синусоїдній електричній напрузі джерела, що живить обмотки магнітної системи. Функція струму  $i(t)$  також вважається синусоїдною, хоча при наявності феромагнітних осердь вона несинусоїдна і лише представляється еквівалентною синусоїдою. Відповідно змінюються за синусоїдним законом також величини  $F$ ,  $U_m$ ,  $H$  і  $B$ .

В часі ці магнітні величини можуть бути зсунуті одна відносно другої по фазі. Перша причина цього – фазові зсуви струмів різних обмоток, друга – магнітні втрати потужності в феромагнітних осердях. Тому замість постійних значень магнітних величин в магнітних колах синусоїдного магнітного потоку використовуються комплексні значення, наприклад, для потоку, МРС і магнітної напруги:

$$\underline{\Phi} = \Phi e^{j\psi_\Phi}; \quad \underline{F} = F e^{j\psi_F}; \quad \underline{U}_m = U_m e^{j\psi_{U_m}}, \quad (1.20)$$

де  $\Phi$ ,  $F$ ,  $U_m$  – діючі значення;  $\psi_\Phi$ ,  $\psi_F$ ,  $\psi_{U_m}$  – початкові фази магнітного потоку, МРС, магнітної напруги.

Однорідні ділянки магнітного кола тепер представляються комплексними магнітними опорами

$$\underline{Z}_\mu = R_\mu + jX_\mu, \quad (1.21)$$

де  $R_\mu$ ,  $X_\mu$  – відповідно активний і реактивний опори ділянки:

$$R_\mu = \rho_{\mu R} \frac{l_k}{S_k}; \quad X_\mu = \rho_{\mu X} \frac{l_k}{S_k},$$

$l_k$ ,  $S_k$  – відповідно довжина і площа поперечного перерізу ділянки.

Питомі магнітні опори  $\rho_{\mu R}$  і  $\rho_{\mu X}$  залежать від частоти  $f$  магнітного поля і повинні визначатися експериментально, як і сімейства петель гістерезису, для кожної конкретної електротехнічної сталі. На неферомагнітних

ділянках магнітного кола присутній тільки  $R_\mu$ , визначення якого таке ж, як для неферомагнетиків  $\rho_{\mu R} = \mu_0^{-1}$ .

Закон Ома, 1-й і 2-й закони Кірхгофа для магнітного кола синусоїдного магнітного потоку справедливі для комплексних величин, а саме:

$$\text{Закон Ома } \underline{U}_M = \underline{Z}_\mu \underline{\Phi}; \quad \underline{\Phi} = \frac{\underline{F}}{\underline{Z}_\mu}; \quad (1.22)$$

$$\text{1-й закон Кірхгофа } \sum_{k=1}^p \underline{\Phi}_k = 0; \quad (1.23)$$

$$\text{2-й закон Кірхгофа } \sum_{k=1}^n \underline{H}_k l_k = \sum_{k=1}^m \underline{F}_k \quad \text{або} \quad \sum_{k=1}^n \underline{Z}_{\mu k} \underline{\Phi}_k = \sum_{k=1}^m \underline{F}_k, \quad (1.24)$$

де  $p$  – кількість стержнів осердя, що сходяться у розгалуженні;  $n$  – кількість однорідних ділянок;  $m$  – кількість обмоток.

### 1.6. Втрати потужності в магнітних колах і рівняння електричної рівноваги в їх обмотках

Змінна напруга  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$  приводить до відповідної зміни (хоча, можливо, і з деяким відхиленням від синусоїд) величин  $i$ ,  $\Phi$ ,  $\Phi_{\text{роз}}$ ,  $e$  і  $e_{\text{роз}}$ . Нові величини ЕДС, що з'явилися,  $e$  і  $e_{\text{роз}}$  спричинені (відповідно з законом електромагнітної індукції) магнітними потоками  $\Phi$  і  $\Phi_{\text{роз}}$ , що змінюються. Діюче значення ЕРС прийнято визначати наступним чином

$$E = 4,44 f w \Phi_m. \quad (1.25)$$

Основне рівняння рівноваги напруги має вигляд

$$\underline{U} = -\underline{E} - \underline{E}_{\text{роз}} + \underline{I}R, \quad (1.26)$$

де  $\underline{E}_{\text{роз}} = -jX_{L_{\text{роз}}} \underline{I}$  – ЕРС розсіювання;  $X_{L_{\text{роз}}}$  – індуктивний опір обмотки, спричинений потоком розсіювання.

Це рівняння можна записати у спрощеному вигляді

$$\underline{U} = -\underline{E} + \underline{Z} \underline{I}, \quad (1.27)$$

де  $\underline{Z} = R + jX_{\text{роз}}$  – повний опір котушки;  $R$  – активний опір котушки.

Представляючи  $\underline{U}$ ,  $\underline{I}$ ,  $\underline{E}$  і  $\underline{E}_{\text{роз}}$  комплексними значеннями або векторами, треба пам'ятати, що  $\underline{E}$  відстає по фазі від основного магнітного

потоків на чверть періоду або на  $\pi/2$ , а  $\underline{E}_{\text{роз}}$  – від струму  $\underline{I}$  на такий же кут, тобто

$$\underline{E}_{\text{роз}} = -jX_{L_{\text{роз}}} \underline{I}. \quad (1.28)$$

Струм  $\underline{I}$  розкладається на активну  $\underline{I}_a$  і реактивну  $\underline{I}_p$  складові: перша проходить по вітці з активною провідністю  $G_{\text{п}}$ , чим заміщаються магнітні втрати  $P_M$  в сталевому осерді, друга – по вітці з реактивною потужністю  $B_p$ , чим заміщається індукована дія основного потоку  $\Phi$ , приводячи, як було відмічено, до виникнення ЕРС  $E$ , причому напруга на розгалуженій ділянці  $\underline{U}' = -\underline{E}$  (див. рис. 1.22).

Згідно основного рівняння напруги будуюмо векторну діаграму. За основу діаграми вибирається вектор магнітного потоку  $\underline{\Phi}_m$ , який відстає від вектора струму  $\underline{I}$ , який його створює, по фазі на кут втрат у сталі  $\delta$ . ЕРС самоіндукції  $\underline{E}$  відстає від вектора потоку на  $90^\circ$ , ЕРС розсіювання  $\underline{E}_{\text{роз}}$  від струму – на  $90^\circ$ . Напруга на виводах котушки  $\underline{U}$ , яка випереджає струм  $\underline{I}$  за фазою на кут  $\varphi$ , є геометричною сумою векторів  $-\underline{E}$ ,  $jX_{L_{\text{роз}}} \underline{I}$  та  $\underline{I}R$  (рис. 1.10).

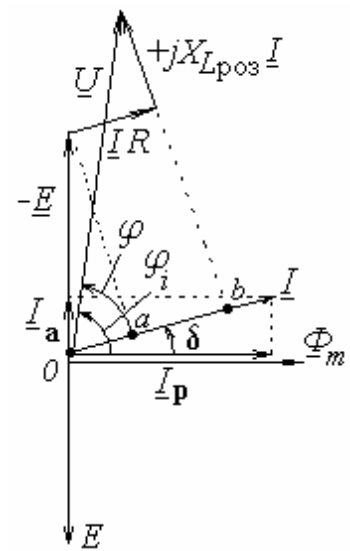


Рисунок 1.10

Активна потужність, яка споживається котушкою, дорівнює  $P = UI \cos \varphi$ . З векторної діаграми витікає, що значення  $U \cos \varphi$  дорівнює сумі двох відрізків  $Oa + ab$ . Причому відрізок  $Oa = E \cos \varphi_i = E \cos(90^\circ - \delta)$ , відрізок  $ab = IR$ , тому

$$U \cos \varphi = IR + E \cos \varphi_i = IR + E \cos(90^\circ - \delta).$$

Таким чином отримуємо вираз для потужності

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R + IE \cos \varphi_i = \Delta P_e + \Delta P_M, \quad (1.29)$$

де  $\Delta P_e = I^2 R$  – потужність, що витрачається в активному опорі обмотки. Її називають електричними втратами;

$\Delta P_M = IE \cos \varphi_i = EI \sin \delta$  – втрати у сталі осердя, які називаються магнітними і їх можна представити наступним чином

$$\Delta P_M = P_\Gamma + P_B, \quad (1.30)$$

$P_\Gamma$  – втрати на гістерезис;  $P_B$  – втрати на вихрові струми.

Відомий ряд емпіричних формул для розрахунку цих втрат, наприклад:

$$P_\Gamma = \sigma_{\text{гс}} f B_m^2 \gamma G \cdot 10^{-4}; \quad (1.31)$$

$$P_B = \sigma_{\text{вх}} f^2 B_m^2 \gamma G \cdot 10^{-7}, \quad (1.32)$$

де  $\sigma_{\text{гс}}$ ,  $\sigma_{\text{вх}}$  – коефіцієнти, що визначаються експериментально, залежать від марки сталі і товщини листа;  $G$  – об'єм осердя,  $\text{см}^3$ ;  $\gamma$  – щільність сталі,  $\text{г/см}^3$ ;  $B_m$  – [Тл];  $f$  – [Гц].

В цілому  $\Delta P_M \sim B_m^2$  (пропорційні), з урахуванням  $\Phi_m = B_m S$  також  $P_M \sim \Phi_m^2$ . Звичайно в магнітних системах змінного струму, що використовуються,  $E \gg E_{\text{роз}}$  і  $E \gg R_k I$ . Тоді в основному рівнянні рівноваги напруги (1.26) можна вважати  $\underline{U} \approx -\underline{E}$ , і на основі формули (1.25) утворюється

$$\Phi_m \approx \frac{U}{4,44 f w}. \quad (1.33)$$

В підсумку можна прийняти, що  $P_M \sim U^2$ , очевидно, також  $P_M \sim I^2$ . Це дозволяє виявити роль  $U$  і  $I$  в поділі загальних втрат потужності в магнітних системах на  $P_M$  і  $P_e$ .

### 1.7. Схема заміщення котушки зі сталевим осердям

Для аналізу і розрахунку реальну котушку з осердям заміняють еквівалентною схемою, наприклад, у вигляді схеми з послідовним з'єднанням елементів (рис. 1.11). Підставою для заміни є рівняння  $\underline{U} = -\underline{E} + jX_{L_{\text{роз}}} I + \underline{I}R$

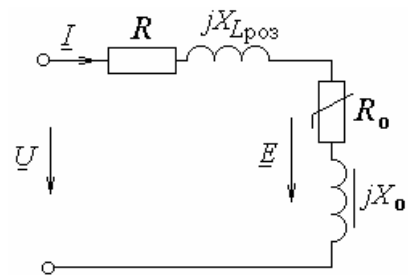


Рисунок 1.11

Параметри схеми заміщення можна знайти наступним чином:

$$R = \frac{P_{\text{об}}}{I^2}; \quad R_0 = \frac{P_M}{I^2}; \quad X_p = L_p \omega; \quad Z_0 = \frac{E}{I}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (1.34)$$

Елементи схеми заміщення мають наступний фізичний смисл:



$X_{L\text{роз}}$  – індуктивний опір, через який заміщується індуктивна дія потоку розсіювання  $\Phi_p$ ;

$R$  – активний опір, через який заміщуються втрати потужності у провідниках обмотки  $P_{\text{об}}$ ;

$X_0$  – індуктивний опір, через який заміщується індуктивна дія основного магнітного потоку;

$R_0$  – активний опір, через який заміщуються магнітні втрати потужності у сталевому осердді  $P_{\text{ст}}$ .

## 1.8. Розрахунок магнітних кіл постійного струму

### 1.8.1. Однорідні магнітні кола

#### Пряма задача

**Приклад 1.1.** Тороподібне осердя виконано із литої сталі марки Ст. 2, кількість витків його обмотки  $w = 27$ . Діаметри: тора  $d = 10$  см, його поперечного перерізу  $d_0 = 2$  см (рис. 1.12).

Визначити постійний струм  $I$  обмотки для збудження в осердді магнітного потоку  $\Phi = 2,83 \cdot 10^{-4}$  Вб.

**Розв'язання.** Площа поперечного перерізу осердя

$$S = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ см}^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

довжина його середньої силової лінії

$$l = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 10 = 31,4 \text{ см} = 0,314 \text{ м.}$$

Магнітна індукція в осердді

$$B = \Phi/S = 2,83 \cdot 10^{-4} / 3,14 \cdot 10^{-4} = 0,9 \text{ Тл.}$$

По кривій намагнічування сталі Ст. 2 знаходимо напруженість магнітного поля  $H = H(B) = 800 \text{ А/м}$  (див. рис. 1.2).

МРС по контуру середньої силової лінії  $F = Hl = 800 \cdot 0,314 = 251 \text{ А}$ ;  
струм обмотки  $I = F/w = 9,3 \text{ А}$ .

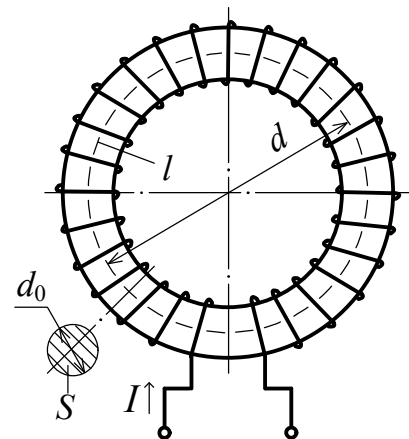


Рисунок 1.12

## Зворотна задача

**Приклад 1.2.** На рис. 1.13 зображене магнітне коло, що складається з шихтованого осердя і намотаної на нього обмотки. Розміри осердя:

$D = 5,5$  см;  $d = 5,5$  см;  $a = 1,5$  см;  
 $c = 2$  см; кількість витків обмотки  $w = 300$ . Листова сталь марки 1512 має товщину листів  $0,5$  мм; для цього випадку коефіцієнт заповнення осердя  $k_3 = 0,93$ . Визначити величину магнітного потоку в осерді при постійному струмі обмотки  $I = 2$  А. Розсіянням магнітного потоку знехтувати.

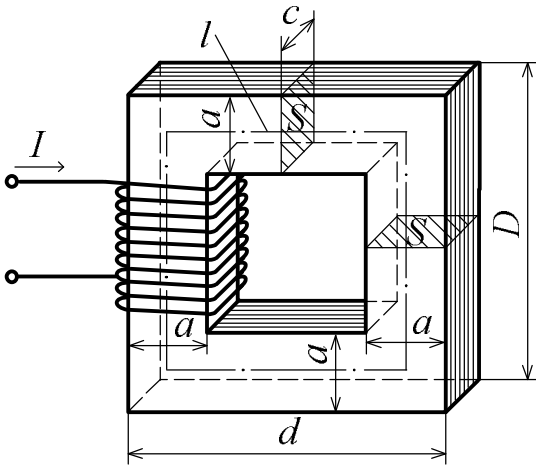


Рисунок 1.13

**Розв'язання.** На всьому контурі

замикання магнітного поля по осердю

його поперечний переріз практично зберігається, матеріал один і той же, потік – також. Таке магнітне коло розглядається як однорідне.

Довжина середньої силової лінії  
 $l = (D - a + d - a) \cdot 2 = 16$  см =  $0,16$  м; площа поперечного перерізу осердя (по сталевим листам)  $S_c = k_3 a c = 0,93 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>.

На основі закону повного струму напруженість магнітного поля  
 $H = wI/l = 320 \cdot 2/0,16 = 4000$  А/м.

По кривій намагнічування для сталі 1512 (див. рис. 1.2) знаходимо магнітну індукцію в осерді:  $B = B(H) = 1,55$  Тл.

Магнітний потік в шихтованому осерді

$$\Phi = B \cdot S_c = 1,55 \cdot 2,79 \cdot 10^{-4} = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

### 1.8.2. Неоднорідні магнітні кола

#### Пряма задача

**Приклад 1.3.** На рис. 1.14 зображене магнітне поле, утворене прямокутним і напівкільцевим осердями, поділеними проміжком  $\delta$ , причому обмотка збудження намотана тільки на другому із них і кількість її витків  $w = 1000$ . Розміри:  $\delta = 2$  мм;  $R_1 = 60$  мм;  $R_2 = 100$  мм;  $h = 100$  мм;  $a = 40$  мм;  $b = 46$  мм;  $c = 30$  мм. Осердя виконано із листової сталі марки

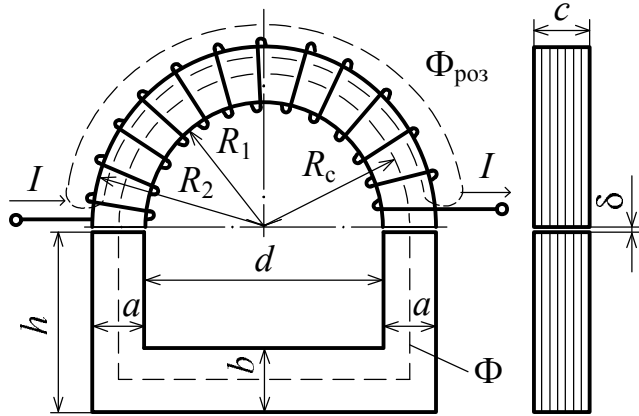


Рисунок 1.14

1211 і має коефіцієнт заповнення  $k_3 = 0,95$ . Визначити постійний струм котушки, необхідний для збудження в проміжках магнітного поля з індукцією  $B_\delta = 1,5$  Тл. Коефіцієнт розсіяння магнітного потоку котушки  $k_{роз}$  прийняти рівним 1.1.

**Розв'язання.** По контуру середньої силової лінії магнітопровід поділимо на однорідні ділянки (рис. 1.15).

Ділянка 1 об'єднує обидва проміжки, відділена за ознакою різних магнітних властивостей і має загальну довжину  $l_1 = 2\delta = 4 \cdot 10^{-3}$  м. Ділянка 2 відрізняється від інших магнітним потоком, тому що всередині обмотки повний потік  $\Phi_{повн} = \Phi + \Phi_{роз}$ , де  $\Phi$  – основний потік, що замикається по всьому магнітопроводу;  $\Phi_{роз}$  – магнітний потік розсіяння.

Довжина цієї ділянки по середній лінії

$$l_2 = \pi R_c = \pi \frac{R_1 + R_2}{2} = 0,251 \text{ м.}$$

Частина магнітопроводу, що залишилась, поділена на ділянки 3 і 4 за ознакою різних розмірів їх поперечних перерізів. Довжини цих ділянок:

– третьої

$$l_3 = 2 R_c = 2 \frac{R_1 + R_2}{2} = 0,16 \text{ м;}$$

– четвертої (яка об'єднує два відрізка однакового поперечного перерізу)

$$l_4 = 2(h - b/2) = 0,154 \text{ м.}$$

Площу поперечного перерізу проміжку приймаємо за площею прилеглих торців осердя  $S_1 = a c = 12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

На решті ділянок площі перерізів беруться безпосередньо за сталевими листами:

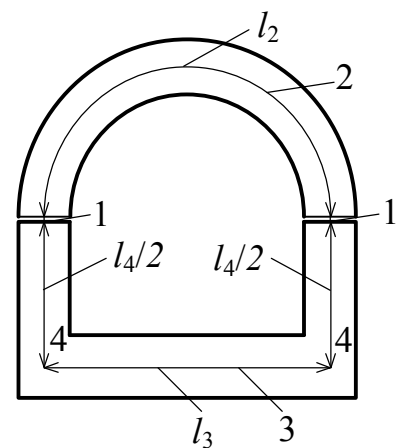


Рисунок 1.15

$$S_2 = c(R_2 - R_1)k_3 = 11,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$S_3 = b c k_3 = 13,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad S_4 = a c k_3 = 11,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Магнітний потік у проміжку – основний потік

$$\Phi = B_\delta S_1 = 1,5 \cdot 12 \cdot 10^{-4} = 18 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Магнітні потоки в межах окремих однорідних ділянок:

$$\Phi_1 = \Phi_3 = \Phi_4 = \Phi = 18 \cdot 10^{-4} \text{ Вб};$$

$$\Phi_2 = k_{\text{роз}} \Phi = 1,1 \cdot 18 \cdot 10^{-4} = 19,8 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Магнітна індукція на ділянках:

$$B_1 = B_\delta = 1,5 \text{ Тл}; \quad B_2 = \Phi_2 / S_2 = 1,74 \text{ Тл};$$

$$B_3 = \Phi_3 / S_3 = 1,37 \text{ Тл}; \quad B_4 = \Phi_4 / S_4 = 1,58 \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля на феромагнітних ділянках визначаємо по кривій намагнічування  $H = H(B)$  для сталі марки 1211 (див. рис. 1.2):

$$H_2 = H(1,74) = 9250 \text{ А/м}; \quad H_3 = H(1,37) = 950 \text{ А/м}; \quad H_4 = H(1,58) = 3500 \text{ А/м.}$$

У проміжку магнітні властивості є лінійними і із формули  $B = \mu_0 H$  маємо  $H_1 = B_1 / \mu_0 = 1,5 / (4\pi \cdot 10^{-7}) = 1,194 \cdot 10^6 \text{ А/м.}$

На основі закону повного струму в алгебраїчній формі отримуємо магніторушійну силу обмотки

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 = 1,194 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-3} + 9250 \cdot 0,251 + 950 \cdot 0,16 + 3500 \cdot 0,154 = 4776 + 2322 + 152 + 539 = 7789 \text{ А.}$$

$$\text{Струм обмотки } I = F / w = 7789 / 1000 \approx 7,8 \text{ А.}$$

### **Зворотна задача**

**Приклад 1.4.** На рис. 1.16 зображена в двох проекціях магнітна система, що складається із литого сталевого осердя і обмотки збудження. Осердя виконано з марки сталі Ст. 2 і має проміжок. Розміри на рис. 1.16 дані в міліметрах. Визначити магнітну індукцію в проміжку  $B_\delta$  при МРС обмотки  $F = 3500 \text{ А}$ . Поток розсіяння обмотки знехтувати.

**Розв'язання.** Коло, що розглядається, неоднорідне, і розв'язати зворотну задачу, слідуючи безпосередньо від МРС до величини магнітного поля, не вдається. Тому розв'язання будемо шукати методом побудови магнітної характеристики  $B_\delta(F)$  (можливий ще метод послідовних наближень).

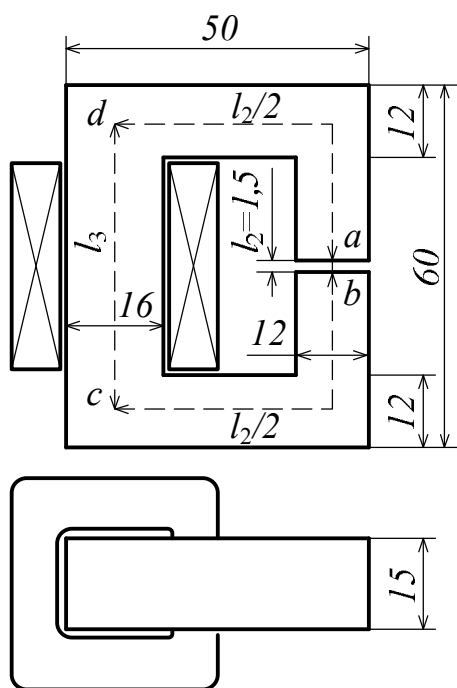


Рисунок 1.16

Очевидно, магнітне коло на рис. 1.16 можна розбити по довжині середньої силової лінії на три однорідних ділянки, позначення і параметри яких дані в табл. 1.2.

Для побудови магнітної характеристики  $B_{\delta}(F)$  необхідно задати ряд значень  $B_{\delta}$  і, розв'язуючи кожний раз пряму задачу (див. приклад 1.3), отримати відповідний ряд значень МРС  $F$ . Алгоритм розв'язання прямої задачі поданий блок-схемою, яка подана на рис. 1.17, де  $\Phi$  – загальний для всіх ділянок магнітний потік;  $B_1, B_2, B_3, H_1, H_2, H_3$  – індукція і напруженість магнітного поля на відповідних ділянках.

Таблиця 1.2 – До розрахунку магнітного кола

Номер ділянки	1	2	3
Позначення	$ab$	$ad+bc$	$cd$
Довжина, м	$l_1 = 0,0015$	$l_2 = 0,126$	$l_3 = 0,048$
Площа перерізу, м <sup>2</sup>	$S_1 = 1,8 \cdot 10^{-4}$	$S_2 = 1,8 \cdot 10^{-4}$	$S_3 = 2,4 \cdot 10^{-4}$

Значення  $H_2$  і  $H_3$  для феромагнітних ділянок визначаються за значеннями індукцій  $B_2$  і  $B_3$  по кривій намагнічування сталі Ст. 2 (див. рис. 1.2), в проміжку  $H_1$  визначається з використанням магнітної постійної  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Для розрахунку хоча б порядку значень  $B_{\delta}$ , що задаються, виконаємо попередню грубу оцінку по максимуму, рахуючи, що вся МРС  $F = 3500$  А прикладена до проміжку. Тоді із формули  $F \approx H_1 l_1$  отримуємо  $H_{1\text{оц}} \approx 3500/0,0015 = 2,3 \cdot 10^6$  А/м, а  $B_{\delta\text{оц}} = \mu_0 H_{1\text{оц}} \approx 2,9$  Тл.

Реально шукане значення  $B_{\delta}$  при  $F = 3500$  А може оказатися тільки менш  $B_{\delta\text{оц}}$ , тому будемо іти від значення 0,6 Тл ввєрх, поки отримане по алгоритму (див. рис. 1.17)

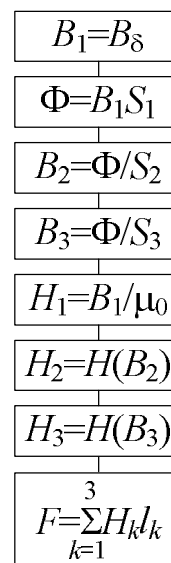


Рисунок 1.17

значення МРС  $F$  не перевищить заданого значення  $F = 3500$  А. Результати виконаних розрахунків зведені у табл. 1.3.

По даним табл. 1.3 на рис. 1.18 побудована магнітна характеристика. Ідучи від значення МРС  $F = 3500$  А по характеристиці, отримаємо розв'язання зворотної задачі  $B_\delta = 1,83$  Тл.

Таблиця 1.3 – Дані для побудови магнітної характеристики

Магнітна величина	$B_k$ , Тл			$H_k$ , А/м			$H_k l_k$ , А			$F$ , А
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Номер ділянки										$\Sigma$
Результати розрахунків	0,6	0,6	0,45	$47,7 \cdot 10^4$	500	365	716	63	18	797
	1,1	1,1	0,83	$87,5 \cdot 10^4$	1100	725	1313	139	35	1487
	1,5	1,5	1,125	$119,4 \cdot 10^4$	2900	1150	1791	365	55	2211
	1,8	1,8	1,35	$143,2 \cdot 10^4$	8150	1875	2148	1027	90	3265
	2,0	2,0	1,5	$159,2 \cdot 10^4$	23500	2900	2388	2961	139	5488

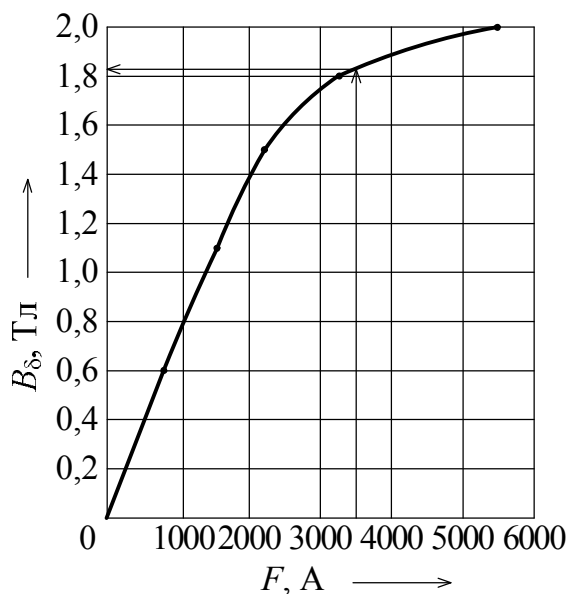


Рисунок 1.18

**Приклад 1.5.** На рис. 1.19 зображена схема дроселя, що живиться від джерела синусоїдної напруги частотою  $f = 50$  Гц. Осердя виконано із листової сталі марки 1212 (E12), його розміри:  $r_1 = 40$  мм;  $r_2 = 60$  мм;  $c = 20$  мм. Коефіцієнт заповнення сталлю поперечного перетину  $k_3 = 0,93$ . Число витків обмотки  $w = 37$ ; активний опір її проводу  $R_k = 0,2$  Ом. Визначити напругу і

струм обмотки, що необхідні для збудження в осерді магнітного поля з амплітудою індукції  $B_m = 0,9$  Тл. Які при цьому втрати потужності в обмотці і осерді?

**Розв'язання.** Магнітне поле рахуємо зосередженим повністю в осерді і дросель будемо розглядати як однорідне магнітне коло змінного магнітного потоку.

Довжина середньої силової лінії

$$l = \pi(r_1 + r_2) = 31,4 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Площа поперечного перетину сталевих листів

$$S_c = k_3 \cdot c(r_2 - r_1) = 3,72 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Значення магнітного потоку:

амплітудне

$$\Phi_m = B_m S_c = 3,35 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Вб};$$

діюче

$$\Phi = \Phi_m / \sqrt{2} = 2,37 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Вб}.$$

Для сталі марки 1212 по заданому значенню  $B_m = 0,9$  Тл із графіків на рис. 1.2 знаходимо питомі магнітні опори:

активний  $\delta_{\mu R} = 2,6 \cdot 10^2$  м/Гн; реактивний

$\delta_{\mu X} = 1,0 \cdot 10^2$  м/Гн.

Магнітні опори осердя:

– активний  $R_\mu = \rho_{\mu R} \frac{l}{S_c} = 2,6 \cdot 10^2 \cdot 31,4 \cdot 10^{-2} / 3,72 \cdot 10^{-4} = 21,9 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$ ;

– реактивний  $X_\mu = \rho_{\mu X} \frac{l}{S_c} = 1,0 \cdot 10^2 \cdot 31,4 \cdot 10^{-2} / 3,72 \cdot 10^{-4} = 8,4 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$ .

Комплексний магнітний опір осердя

$$\underline{Z}_\mu = R_\mu + jX_\mu = 21,9 \cdot 10^4 + j8,4 \cdot 10^4 = 23,5 \cdot 10^4 e^{j21^\circ} \text{ Гн}^{-1}.$$

За законом Ома комплексне значення МРС обмотки магнітного кола

$$\underline{F} = \underline{Z}_\mu \Phi = 23,5 \cdot 10^4 e^{j21^\circ} \cdot 2,37 \cdot 10^{-4} e^{j0^\circ} = 55,7 e^{j21^\circ} \text{ А} = F e^{j\psi_F},$$

де  $\underline{\Phi} = \Phi e^{j\psi_\Phi} = 2,37 \cdot 10^{-4} e^{j0^\circ}$  Вб – комплексне значення магнітного потоку, прийняте з початковою фазою  $\psi_\Phi = 0^\circ$ .

Діючі значення:

МРС  $F = 55,7$  А; струму обмотки  $I = F / w = 1,5$  А; їх початкові фази

$$\psi_I = \psi_F = 21^\circ.$$

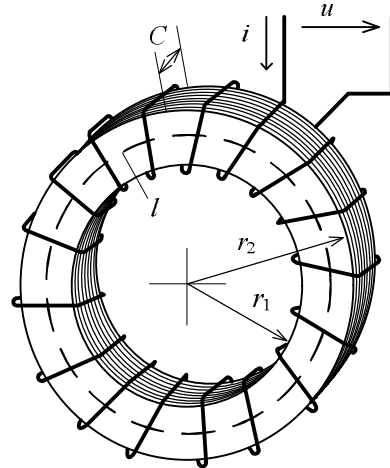


Рисунок 1.19

Рівняння електричної рівноваги в електричному контурі обмотки має вигляд  $\underline{U} = (-\underline{E}) + R_k \underline{I}$ , де  $\underline{E}$  – ЕРС, що наведена основним потоком. Діюче значення ЕРС

$$E = 4,44 f w \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 37 \cdot 3,35 \cdot 10^{-4} = 2,75 \text{ В.}$$

Її початкова фаза  $\psi_E = -90^\circ$ , тому що вектор  $\underline{E}$  завжди відстає по фазі від потоку, який визвав ЕРС, на чверть періоду. Отримуємо  $\underline{E} = 2,75 e^{j90^\circ}$  В.

Підставляючи комплексні значення, отримуємо

$$\underline{U} = -2,75 e^{-j90^\circ} + 0,2 \cdot 1,5 e^{j21^\circ} = 2,75 e^{j90^\circ} + 0,3 e^{j21^\circ} =$$

$$= j2,75 + 0,28 + j0,11 = 0,28 + j2,86 = 2,87 e^{j84,4^\circ} = U e^{j\psi_U} \cdot \underline{E}$$

Діюче значення напруги джерела  $U = 2,87$  В; початкова фаза напруги  $\psi_U = 84,4^\circ$ . Часові співвідношення величин проілюстровані на рис. 1.20 за допомогою векторної діаграми, яка побудована в указаних масштабах.

Фазовий зсув напруги відносно струму  $\varphi = \psi_U - \psi_I = 63,4^\circ$ .

Активна потужність дроселя

$$P = UI \cos \varphi = 2,87 \cdot 1,5 \cos 63,4^\circ = 1,92 \text{ Вт.}$$

Втрати потужності:

– електричні в проводі обмотки  $P_e = R_k I^2 = 0,45$  Вт;

– магнітні в сталевому осерді  $P_m = P - P_e = 1,47$  Вт.

### 1.9. Визначення параметрів схеми заміщення дроселя, який ввімкнутий на змінну напругу

**Приклад 1.6.** Обмотка із проводу з кількістю витків  $w_k = 1000$  намотана на шихтоване сталеве осердя, яке виконано рознімним. Для визначення параметрів електричної схеми заміщення цього дроселя проведені два досліди при живленні його обмотки від мережі змінної напруги з частотою  $f = 50$  Гц через автотрансформатор Т (рис. 1.21).

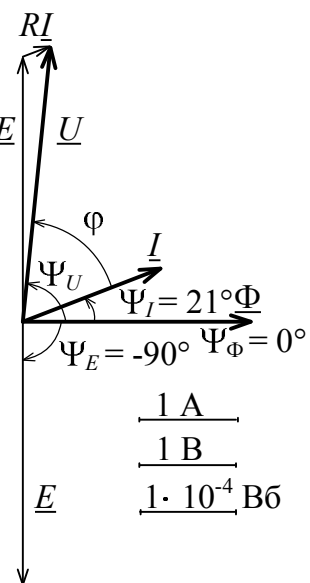


Рисунок 1.20



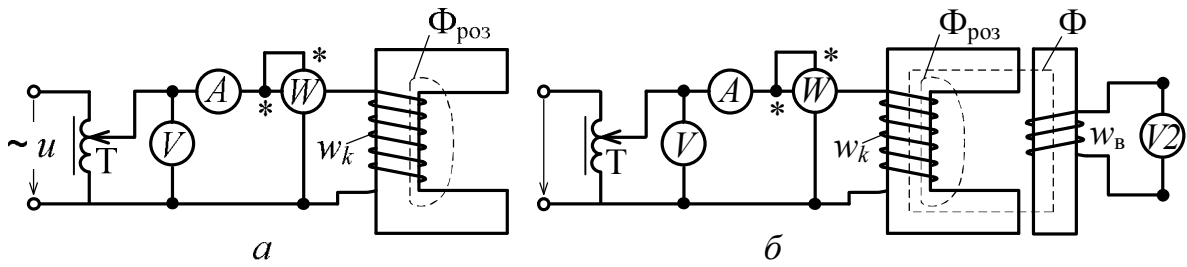


Рисунок 1.21

В першому досліді ярів осердя був вилучений (рис. 1.21, а), в обмотці встановлений струм  $I_0 = 3$  А і виміряні напруга обмотки  $U_0 = 15$  В і активна потужність  $P_0 = 36$  Вт.

В другому досліді ярів осердя був встановлений в основне положення (рис. 1.21, б). Після установки струму  $I = 3$  А були виміряні напруга  $U = 210$  В і активна потужність  $P = 76$  Вт. Крім того, на затискачах вимірювальної котушки, що встановлена на якорі і має кількість витків  $w_B = 200$ , була виміряна напруга  $U_B = 40$  В.

За даними дослідів потрібно визначити параметри типової електричної схеми заміщення дроселя.

**Розв'язання.** Типова електрична схема заміщення дроселя зображена на рис. 1.22. У відповідності з рівнянням електричної рівноваги  $\underline{U} = -\underline{E} - \underline{E}_{роз} + R_K \underline{I}$  ця схема має три послідовних ділянки, кожна із яких відповідає одному із членів в правій частині рівняння, причому

$$\underline{U}' = -\underline{E}; \underline{U}_{L_{роз}} = -\underline{E}_{роз}.$$

При розімкненому осерді (див. рис. 1.21, а) повний магнітний потік зменшується до досить малого потоку розсіювання  $\Phi_{роз}$ . Основний потік  $\Phi$  практично відсутній і тому в схемі (рис. 1.22) можна відкинути ділянку, що заміщає дію цього потоку.

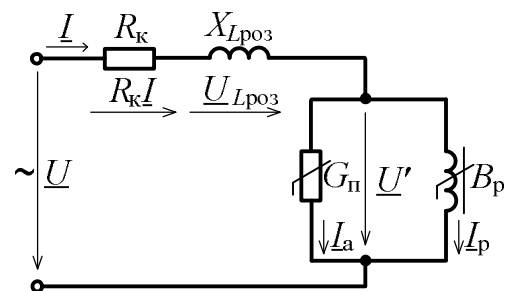


Рисунок 1.22

Таким чином, для умов першого досліді схема заміщення зводиться до виду, зображеному на рис. 1.23. Для цієї схеми за даними першого досліді визначаємо повний опір обмотки з осердям без якоря

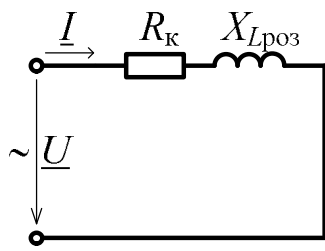


Рисунок 1.23

$Z_0 = U_0 / I_0 = 5 \text{ Ом}$  і параметри схеми заміщення

$$R_k = P_0 / I_0^2 = 4 \text{ Ом}; X_{L_{роз}} = \sqrt{Z_0^2 - R_k^2} = 3 \text{ Ом}.$$

У другому досліді ЕРС вимірювальної котушки  $E_B = U_B = 40 \text{ В}$ . По цьому значенню визначаємо амплітуду основного магнітного потоку в якорі осердя:

$$\Phi_m = E_B / 4,44 f w_B = 9 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

ЕРС  $E$ , що наводиться цим потоком в обмотці дроселю

$$E = 4,44 f w_k \Phi_m = 200 \text{ В}.$$

В другому досліді виміряна потужність  $P$  витрачається на електричні втрати в обмотці  $R_k I^2$  і магнітні втрати в сталі всього осердя  $P_M = P - R_k I^2 = 40 \text{ Вт}$ .

Знайдена ЕРС  $E$  відповідає напрузі  $U'$  в повній схемі на рис. 1.22, тобто  $U' = E = 200 \text{ В}$ . Так як потужність  $P_M$  зосереджується в схемі заміщення у вітці з активною провідністю  $G_{\Pi}$ , можна знайти активну складову струму, яка проходить по ній  $I_a = P_M / U' = 0,2 \text{ А}$ .

Ця складова співпадає по фазі з напругою  $U'$ , а реактивна складова  $I_p$  в індуктивному елементі повинна відставати

від  $U'$  на  $\frac{\pi}{2}$ . Враховуючи взаємну ортогональність

векторів  $I_a$  і  $I_p$ , а також те, що їх сума

$$I_a + I_p = I, \text{ визначаємо } I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} = 2,99 \text{ А}.$$

Тепер за законом Ома для діючих значень  $I_a$ ,  $I_p$  і  $U'$  находимо провідності паралельної ділянки схеми заміщення (див. рис. 1.22):

активну  $G_{\Pi} = I_a / U' = 0,001 \text{ См}$ ;

реактивну  $B_p = I_p / U' = 0,015 \text{ См}$ .

Достовірність схеми заміщення можна перевірити на основі розрахунку електричного кола, використовуючи відому напругу  $U = 210 \text{ В}$ . Співвідношення усіх величин і їх задоволення рівнянню

$$\underline{U} = -\underline{E} - \underline{E}_{роз} + R_k \underline{I} = -\underline{E} + jX_{L_{роз}} \underline{I} + R_k \underline{I}$$

ілюструє векторна діаграма, що побудована в масштабі на рис. 1.24.

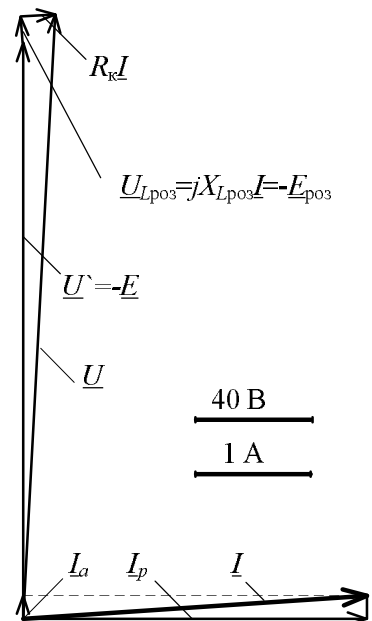


Рисунок 1.24

## 2. Електромагніти та реле

### 2.1. Будова та принцип роботи електромагнітів

Здатність електромагнітів, як і постійних магнітів, притягувати до своїх полюсів близько розташовані феромагнітні тіла заснована на електромеханічній взаємодії магнітного поля електромагніта з мікрострумами у феромагнітному тілі. При цьому феромагнітне тіло, що притягується, само намагнічується, його полярність протилежна до полярності полюсів електромагніта. Електромагніти можуть працювати і на постійному і на змінному струмі.

У промисловості електромагніти знайшли широке застосування, наприклад в підйомних кранах, в якості приводів гальм, муфт зчеплення, вентилів в трубопроводах для рідин, в комутаційній апаратурі електроустаткування, у вимірювальних приладах, в автоматах, реле та ін. На рис. 2.1, *а* показане конструктивне виконання електромагнітів тягнучої та штовхаючої дії, а на рис. 2.1, *б, в* показані промисловий та вантажопідйомний електромагніти.



Рисунок 2.1

Тягові електромагніти з лінійним (зворотно-поступальним) рухом якоря (рис.2.1, *а*; рис.2.2, *а*) застосовують для керування гідравлічними або пневматичними вентилями, кранами, виконавчими органами станків та механізмів. До силових відносять тягові, вантажопідйомні (рис.2.1, *б*; рис.2.2, *б*) і гальмівні електромагніти, що перетворюють електричну енергію в механічну.

## 2. Електромагніти та реле

### 2.1. Будова та принцип роботи електромагнітів

Здатність електромагнітів, як і постійних магнітів, притягувати до своїх полюсів близько розташовані феромагнітні тіла заснована на електромеханічній взаємодії магнітного поля електромагніта з мікрострумами у феромагнітному тілі. При цьому феромагнітне тіло, що притягується, само намагнічується, його полярність протилежна до полярності полюсів електромагніта. Електромагніти можуть працювати і на постійному і на змінному струмі.

У промисловості електромагніти знайшли широке застосування, наприклад в підйомних кранах, в якості приводів гальм, муфт зчеплення, вентилів в трубопроводах для рідин, в комутаційній апаратурі електроустаткування, у вимірювальних приладах, в автоматах, реле та ін. На рис. 2.1, *а* показане конструктивне виконання електромагнітів тягучої та штовхаючої дії, а на рис. 2.1, *б, в* показані промисловий та вантажопідйомний електромагніти.



Рисунок 2.1

Тягові електромагніти з лінійним (зворотно-поступальним) рухом якоря (рис.2.1, *а*; рис.2.2, *а*) застосовують для керування гідравлічними або пневматичними вентилями, кранами, виконавчими органами станків та механізмів. До силових відносять тягові, вантажопідйомні (рис.2.1, *б*; рис.2.2, *б*) і гальмівні електромагніти, що перетворюють електричну енергію в механічну.

На рис.2.2 наведені схеми таких електромагнітів, де цифрами показані: 1 – обмотка; 2 – осердя; 3 – яркі електромагнітів.

Під час притягання електромагнітом ферромагнітного тіла в повітряному проміжку частина енергії магнітного поля перетворюється в механічну.

Об'ємна густина цієї енергії визначається наступним чином

$$w_M = \frac{\mu_a H^2}{2} = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_a}, \quad (2.1)$$

Сила тяги або підйомна сила одного полюса електромагніта дорівнює

$$F = \frac{P}{2} = \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}, \quad (2.2)$$

де  $P$  – зовнішня сила;  $S$  – площа полюси.

## 2.2. Будова та принцип роботи реле

Електричним реле називають апарат, призначений для автоматичного спрацьовування (включення або відключення) при зміні якогось електричного параметра кола (струму, напруги) або неелектричного параметра, на який він має реагувати.

Реле захисту і керування – апарати багаторазової дії і виконуються або із самоповерненням або з ручним поверненням.

Основні характеристики реле: значення величини спрацьовування і відпускання (повернення), коефіцієнт повернення і час спрацьовування.

*Коефіцієнт повернення* – відношення величин відпускання і спрацьовування (завжди менше одиниці).

*Час спрацьовування реле* (або витримка реле)  $t_{сп}$  – час подачі сигналу на вхід реле до моменту його включення.

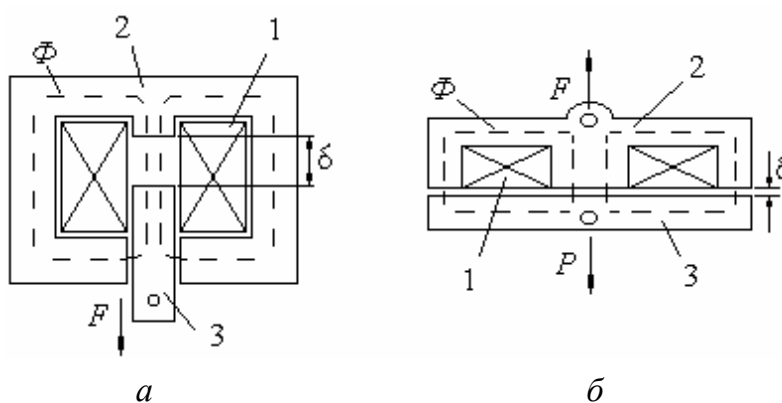


Рисунок.2.2

Відрізняють безінерційні ( $t_{сп} < 1$  мс), швидкодіючі ( $t_{сп} < 50$  мс) і нормальні ( $t_{сп} < 0,05 \div 0,2$  с).

Реле максимального струму широко застосовується в електроустановках для автоматичного захисту від КЗ. На рис. 2.3 показана схема цього реле, де цифрами позначено: 1 – обмотка; 2 – осердя; 3 – якір; 4 – пружина; 5 – контакти замикальні; 6 – контакти розмикальні.

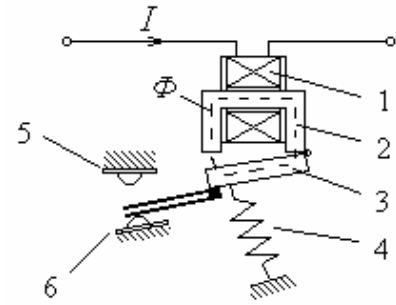


Рисунок 2.3

Якщо робочий струм  $I$  перевищує певне максимальне значення, то сила тяги електромагніту, що включає обмотку 1 та сталеве осердя 2, перевищує механічну силу пружини 4, забезпечуючи переміщення якоря 3. При цьому замикаються контакти замикальні 5, а контакти розмикальні 6 – розмикаються.

Теплове реле призначено для захисту електроапаратури від тривалих перевантажень (рис. 2.4). При нагріві біметалічна пластина 1 в спеціальному нагрівачі 2 (ніхромовий дріт) деформується, її зігнутий кінець піднімається і вивільняє важіль 4 при спрацьовуванні. Важіль 4 обертається пружиною 5 вліво відносно осі А і своїм кінцем розмикає нормально замкнені контакти 6 кола керування двигуна. Після охолодження пластини протягом 3-5 мін вихідний стан реле може бути відновлений натисканням на кнопку повернення 3.

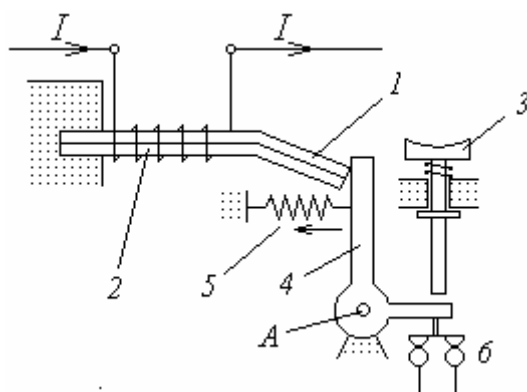


Рисунок 2.4

Реле відрізняються різноманітним конструктивним виконанням із залежності від функціонального призначення. На рис. 2.5 показане реле максимального струму серії РЕВ570, теплове реле РТТ-141 та реле максимального струму з самоповерненням РЕМ65. Реле максимального струму серії РЕВ570 (рис. 2.5, а) застосовується в якості реле максимального струму в основному для захисту електродвигунів постійного струму від струмів КЗ. Його котушки виконуються на номінальні струми від 1,6 до 1250 А.

Реле теплове РТТ-141 (рис. 2.5, б) призначено для захисту трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором від перевантажень

неприпустимої тривалості та від струмів, які виникають при обриві однієї з фаз.

Реле максимального струму з самоповерненням РЕМ65 (рис. 2.5, в) призначено для комутації кіл в схемах автоматичного керування електроприводами постійного струму напругою до 320 В суднового електрообладнання. Це реле виконується з самоповерненням з котушкою, що втягує, на номінальні струми від 2,5 до 100 А.

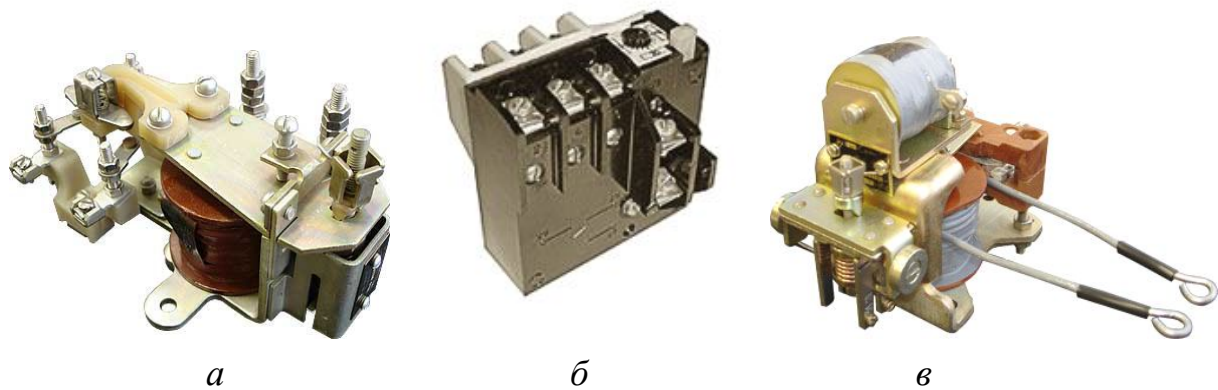


Рисунок 2.5

### 2.3. Приклади розрахунку параметрів електромагнітів та реле

**Приклад 2.1.** Визначити струм в котушці електромагнітного реле (рис. 2.6), якщо задані геометричні розміри:  $a = 100$  мм;  $b = 50$  мм;  $d = 7$  мм;  $c = 10$  мм;  $\delta = 5$  мм. Число витків в обмотці  $w = 1000$ ; матеріал осердя – сталь 1512. Жорсткість пружини  $k = 10^4$  Н/м.

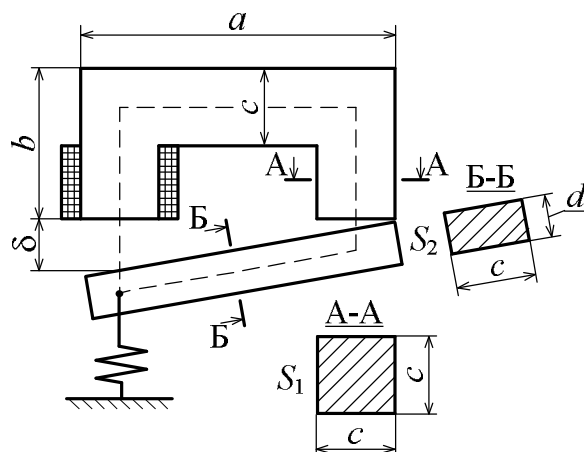


Рисунок 2.6

**Розв'язання.** Робота реле заснована на виникненні сили тяги, яка створюється магнітним полем при підключенні котушки до джерела жив-

лення, і наводить в рух рухливий якір. Відповідно до відомого закону механіки

$$P = k x,$$

де  $k$  – жорсткість пружини;  $x$  – зсув (стискування) пружини. Оскільки  $x = \delta$ , то при заданій величині жорсткості пружини можна знайти зусилля, не-

обхідне для тяжіння якоря. Тепер з формули  $P = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$  знаходимо магнітну

індукцію в зазорі  $B_\delta = \sqrt{\frac{2\mu_0 P}{S_\delta}}$ .

Подальші обчислення пов'язані з визначенням геометричних параметрів окремих ділянок неоднорідного магнітного кола, а саме ярма, якоря і повітряного зазору. Визначаємо довжину середньої силової лінії кожної з цих ділянок.

$$\text{Ярмо } l_{\text{яр}} = \left(b - \frac{c}{2}\right) \cdot 2 + a - c = (50 - 5) \cdot 2 + 100 - 10 = 180 \text{ мм} = 0,18 \text{ м};$$

$$\text{якір } l_{\text{як}} = a - c = 100 - 10 = 90 \text{ мм} = 0,09 \text{ м}; \text{ зазор } l_3 = \delta.$$

Перерізи відповідних ділянок:

$$S_\delta = c^2 = 10^{-4} \text{ м}^2 = S_{\text{яр}}; S_{\text{як}} = d \cdot c = 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \text{ тобто } S_{\text{як}} = 0,7 S_{\text{яр}}.$$

Находимо  $P = k x = 10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 50 \text{ Н}$ , тоді

$$B_\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{10^{-4}}} = 1,12 \text{ Тл}.$$

Магнітна індукція в ярмі  $B_{\text{яр}} = B_\delta$ , оскільки магнітний потік в магнітопроводі та в повітряному зазорі один і той же, і перерізи цих ділянок однакові

$$B_{\text{як}} = \frac{B_{\text{яр}}}{0,7} = 1,6 \text{ Тл}.$$

Визначаємо напруженості магнітного поля в ділянках. У зазорі

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{1,12}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot B_\delta = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 1,12 = 0,89657 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Визначимо по кривій намагнічування для сталі 1512 (див. рис. 1.2) напруженість магнітного поля ярма після екстраполяції  $H_{\text{яр}} = 280 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ , а



$$H_{\text{як}} = 5600 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Запишемо рівняння закону повного струму

$$F = wI = \delta \cdot H_{\delta} + l_{\text{як}} \cdot H_{\text{як}} + l_{\text{яр}} \cdot H_{\text{яр}} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,89657 \cdot 10^6 + 0,09 \cdot 5600 + 0,18 \cdot 280 = 4482,856 + 504 + 50,4 = 5037,256 \text{ А.}$$

Тоді при  $w = 1000$  струм в котушці електромагнітного реле

$$I = \frac{F}{w} = \frac{5037,256}{1000} = 5,037 \text{ А або приблизно струм } I = 5 \text{ А.}$$

**Приклад 2.2.** Визначити струм в обмотці електромагніту (рис. 2.7) для піднімання вантажу масою  $m = 4,7$  кг, якщо задані геометричні розміри неоднорідного магнітного кола:  $a = 140$  мм;  $b = 75$  мм;  $c = 10$  мм;  $d = 10$  мм;  $\delta = 5$  мм; число витків обмотки  $w = 1000$ ; марка сталі осердя 1211.

**Розв'язання.** Знайдемо силу тяги, що діє на яркі електромагніту

$$P = mg = 4,7 \cdot 9,8 = 46 \text{ Н,}$$

де  $g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$  – прискорення вільного

падіння. Знаходимо магнітну індукцію під полюсом  $B_{\delta} = \sqrt{\frac{2\mu_0 P}{S_{\delta}}}$ ,

де  $S_{\delta}$  – загальна площа всіх полюсів.

$$S_{\delta} = S_{\text{I}} + S_{\text{II}} + S_{\text{III}} = 3 S_{\text{к}},$$

де площа одного полюса  $S_{\text{к}} = c^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $S_{\delta} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

$$\text{Тоді } B_{\delta} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 46}{3 \cdot 10^{-4}}} = 0,62 \text{ Тл. Магнітна індукція кожного по-}$$

люса однакова  $B_{\text{I}} = B_{\text{II}} = B_{\text{III}} = B_{\delta}$ . По кривій намагнічування для сталі 1211 (див. рис. 1.2) визначаємо напруженість магнітного поля. Магнітне коло даного електромагніту є розгалуженим, тобто магнітний потік стержня II розгалужується по стержнях I і III.

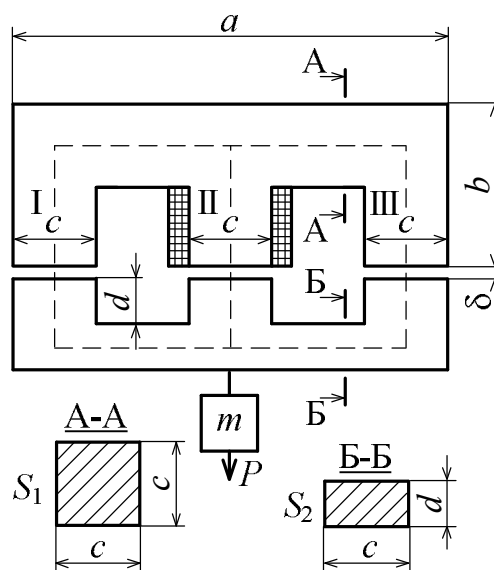


Рисунок 2.7

Розділив магнітне коло по осі симетрії на дві частини, розрахунок здійснимо для половини повного магнітного потоку, що проходить через поперечний переріз стержня II. Штрихова лінія показує силову лінію цього потоку.

Загальний магнітний потік стержня II  $\Phi_{II} = B_{II} \cdot S_k = 0,62 \cdot 10^{-4}$  Вб.

Магнітні потоки стержнів I і III  $\Phi_I = \Phi_{III} = \frac{\Phi_{II}}{2} = 0,31 \cdot 10^{-4}$  Вб.

Розбиваємо магнітне коло на однорідні ділянки з однаковим значенням магнітної індукції і одного матеріалу. Загальна довжина

поздовжніх ділянок  $l_1 = (b - \frac{c}{2} + 2d - \frac{d}{2}) \cdot 2 = 170 \text{ мм} = 0,17 \text{ м};$

поперечних ділянок  $l_2 = (\frac{a}{2} - \frac{c}{2} - \frac{c}{4}) \cdot 2 = 125 \text{ мм} = 0,125 \text{ м};$

загальна довжина зазорів  $2\delta = 10 \text{ мм} = 10^{-2} \text{ м} .$

Визначаємо напруженості магнітних полів цих ділянок.

Напруженість магнітного поля в зазорі

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{0,62}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,62 = 0,496 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Напруженість магнітного поля на поздовжній ділянці визначаємо по кривій намагнічування для сталі 1211  $H_1 = 160 \frac{\text{А}}{\text{м}}$  (див. рис. 1.2).

Магнітна індукція на поперечній ділянці

$$B_2 = \frac{\Phi_{II}}{2S_2} = \frac{0,62}{2 \cdot 10^{-4}} = 0,31 \text{ Тл.}$$

По кривій намагнічування для сталі 1211 визначаємо напруженість магнітного поля на цій ділянці  $H_2 = 110 \frac{\text{А}}{\text{м}}$  (див. рис. 1.2).

Згідно закону повного струму

$$F = wI = 2\delta H_{\delta} + H_1 l_1 + H_2 l_2 = 0,496 \cdot 10^6 \cdot 10^{-2} + 160 \cdot 0,17 + 110 \cdot 0,125 = \\ = 4960 + 27,2 + 13,75 = 5000 \text{ А.}$$

Струм в обмотці електромагніту з числом витків  $w = 1000$

$$I = \frac{F}{w} = 5 \text{ А.}$$

## 3. ТРАНСФОРМАТОРИ

### 3.1. Будова і основні параметри трансформатора

Трансформатор – статичний (без рухомих частин) електромагнітний пристрій, який перетворює одну змінну напругу в іншу змінну напругу із збереженням їх частоти  $f$ . Силкові трансформатори є найважливішим елементом у системі електропостачання, відіграють роль проміжної ланки між генераторами електростанцій і споживачами електроенергії. Силкові трансформатори виготовляються для загальних потреб (зварювальні, перетворювачів частоти, електропечі та ін.). По числу фаз вони поділяються на одно- та трифазні, по способу охолодження – на сухі та масляні. На електростанціях електроенергія виробляється за допомогою трифазних генераторів напругою 6...30 кВ. Крім цього, трансформатори широко використовуються в блоках живлення різноманітних електроприладів. На рис. 3.1 показані трансформатори різного призначення і потужності: однофазний сухий (а), трифазний масляний класу напруги 110 кВ (б), потужний станційний (в).



Рисунок 3.1

Однофазний двообмотковий трансформатор схематично зображений на рис. 3.2. Замкнене осердя виконується із листової електротехнічної сталі і служить для посилення магнітного поля, що збуджується обмотка-

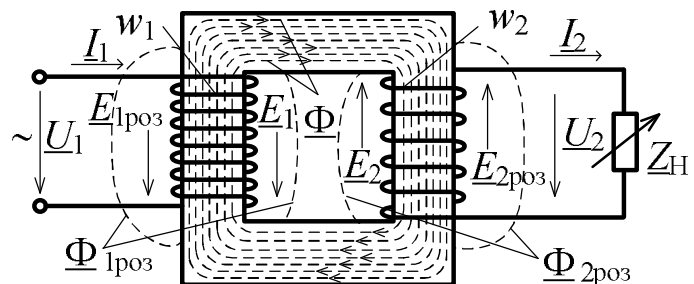


Рисунок 3.2

ми. Обмотки виконуються із ізольованих проводів, частіше усього мідних, рідше алюмінієвих.

Принцип дії побудований на законі електромагнітної індукції. На первинну обмотку, яка має  $w_1$  витків, подається змінна напруга  $\underline{U}_1$ , зі вторинної обмотки, що має  $w_2$  витків, напруга  $\underline{U}_2$  прикладена до навантаження  $z_H$ . При  $w_1 < w_2$  напруга підвищується, тобто  $U_1 < U_2$ , при  $w_1 > w_2$  – знижується; при цьому струми обмоток  $I_1$  і  $I_2$  перетворюються в зворотній пропорції.

Співвідношення кількості витків відноситься до основних параметрів трансформатора і називається коефіцієнтом трансформації:

$$n = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}} \text{ або, зокрема, } k_{12} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (3.1)$$

де  $w_{\text{ВН}}, w_{\text{НН}}$  – кількість витків обмотки відповідно вищої (ВН) і нижчої (НН) напруги, причому  $w_{\text{ВН}} > w_{\text{НН}}$ .

На відміну від схематичного зображення однофазного двообмоткового трансформатора (див. рис. 3.2) реальні його конструкції мають компоновку стержневої або броньової конструкції, що зображені на рис. 3.3; цифрами позначені: 1 – осердя; 2 – обмотка ВН; 3 – обмотка НН; 4 – каркас обмоток

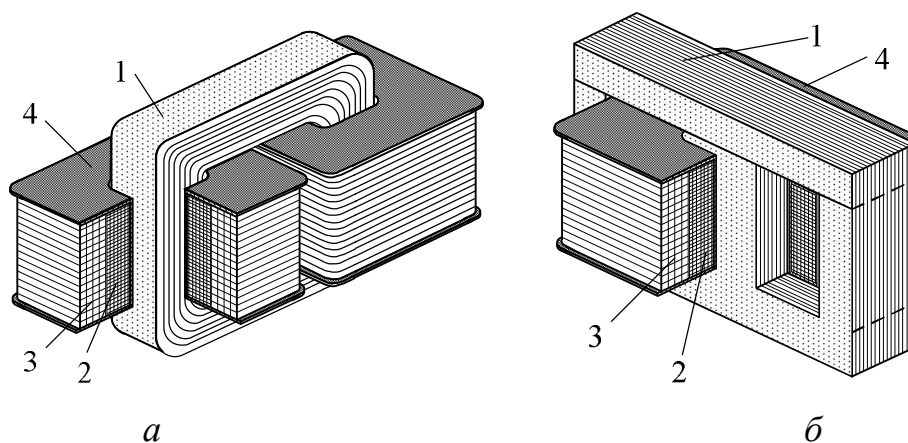


Рисунок 3.3

Звичайно осердя робляться складовими для можливості установки обмоток. Вони можуть виконуватися шихтованими із сталевих пластин або намотуватися із сталеві стрічки (товщина листової сталі може складати 0,35 або 0,5 мм).

Електричний стан трансформатора описується рівняннями напруг для контурів обмоток і рівнянням струмів, що зв'язують комплексні значення або вектори синусоїдних величин:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E} - \underline{E}_{1\text{роз}} + R_1 \underline{I}_1; \quad (3.2)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 - \underline{E}_{2\text{роз}} + R_2 \underline{I}_2; \quad (3.3)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \left( -\underline{I}_2 \frac{w_2}{w_1} \right), \quad (3.4)$$

де  $\underline{E}_1, \underline{E}_2$  – ЕРС обмоток, які спричинені основним магнітним потоком  $\underline{\Phi}$ , що пронизує обидві обмотки;  $\underline{E}_{1\text{роз}}, \underline{E}_{2\text{роз}}$  – ЕРС, що спричинені магнітними потоками розсіювання  $\underline{\Phi}_{1\text{роз}}, \underline{\Phi}_{2\text{роз}}$ , кожний із яких створений струмом своєї обмотки і зчеплений тільки з нею;  $R_1, R_2$  – активні опори проводів обмоток;  $\underline{I}_{10}$  – струм первинної обмотки в режимі неробочого ходу.

В режимі неробочого ходу основний потік  $\underline{\Phi}$  створюється тільки струмом  $\underline{I}_{10}$ , при замкненому контурі вторинної обмотки – протидіючими струмами  $\underline{I}_1$  і  $\underline{I}_2$  двох обмоток, але при цьому значення потоку  $\underline{\Phi}$  (в частковості, його амплітудне значення  $\Phi_m$ ) практично зберігається.

Всі ЕРС обмоток індукуються в відповідності з законом електромагнітної індукції  $e = -w d\Phi/dt$ .

Діючі значення основних ЕРС пропорційні  $\Phi_m$ :

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m; \quad (3.5)$$

$$E_1 / E_2 = w_1 / w_2 = k_{12}. \quad (3.6)$$

ЕРС від потоків  $\underline{\Phi}_{1\text{роз}}$  і  $\underline{\Phi}_{2\text{роз}}$ , як і самі потоки, пропорційні струмам:

$$\underline{E}_{1\text{роз}} = -jX_{L1\text{роз}} \underline{I}_1; \quad \underline{E}_{2\text{роз}} = -jX_{L2\text{роз}} \underline{I}_2 \quad \text{або} \quad E_{1\text{роз}} = X_{L1\text{роз}} I_1;$$

$E_{2\text{роз}} = X_{L2\text{роз}} I_2$ , де  $X_{L1\text{роз}}, X_{L2\text{роз}}$  – індуктивні опори обмоток, які спричинені відповідними потоками розсіювання.

Відомо, що  $E_{1\text{роз}} \ll E_1$ ,  $R_1 I_1 \ll E_1$ ,  $E_{2\text{роз}} \ll E_2$ ,  $R_2 I_2 \ll E_2$ , тому приблизно можна вважати  $U_1 \approx E_1$  і  $U_2 \approx E_2$ . Отже, діючі значення напруг обмоток, як і основних ЕРС, підпорядковані коефіцієнту трансформації

$$U_1 / U_2 \approx E_1 / E_2 = w_1 / w_2 = k_{12}. \quad (3.7)$$

Відомо також, що  $I_{10} \ll I_{1\text{ном}}$ . Тому, нехтуючи в режимі наванта-

ження порівняно малим значенням струму  $I_{10}$ , отримуємо співвідношення для діючих значень струмів

$$I_1 / I_2 \approx w_2 / w_1 = 1 / k_{12}. \quad (3.8)$$

Вказане співвідношення напруг найбільш точно в режимі неробочого ходу; співвідношення струмів уточнюється по мірі віддалення від цього режиму.

В наочній формі співвідношення всіх величин, що входять в рівняння напруг і струмів, прийнято ілюструвати векторною діаграмою. Якісний і розрахунковий аналізи режимів роботи трансформаторів виконують, використовуючи електричні схеми заміщення. Реальні електричні і енергетичні процеси, що відбуваються в трансформаторі, в схемі заміщення відображаються за допомогою ідеальних резистивних і індуктивних елементів. Зі схем заміщення найбільш широко розповсюджена Т-образна схема.

### 3.2. Енергетичні явища в трансформаторі

Із живильної мережі на первинну обмотку трансформатора поступає електрична енергія з активною потужністю

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (3.9)$$

де  $\cos \varphi_1$  – коефіцієнт потужності трансформатора;  $\varphi_1$  – зсув фаз  $\underline{U}_1$  і  $\underline{I}_1$ .

З вторинної обмотки навантаженню  $z_H$  віддається активна потужність

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_H, \quad (3.10)$$

де  $\cos \varphi_H$  – коефіцієнт потужності навантаження;  $\varphi_H$  – кут зсуву фаз  $\underline{U}_2$  і  $\underline{I}_2$ , який визначається характером опору навантаження  $\underline{z}_H = z_H e^{j\varphi_H}$ .

Процес передачі енергії супроводжується її втратами в обмотках і осерді

$$\Delta P = P_e + P_m. \quad (3.11)$$

Потужність електричних втрат в двох обмотках

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2. \quad (3.12)$$

Потужність магнітних втрат в сталі осердя складається із втрат на гістерезис  $P_r$  і вихрові струми  $P_v$

$$P_M = P_\Gamma + P_B. \quad (3.13)$$

Відомо, що ці магнітні втрати спричинені магнітним потоком, що змінюється, причому  $P_M \sim \Phi_m^2$ . Тому величину  $P_M$  можна вважати постійною, тобто не залежною від струму навантаження трансформатора, тому що в робочому діапазоні навантажень амплітуда потоку  $\Phi_m \approx \text{const}$ . В той же час величина  $P_M$  залежить від прикладеної напруги  $U_1$ . Якщо урахувати, що  $U_1 \approx E_1$  і  $\Phi_m = E_1 / 4,44 f w_1$ , то  $P_M \sim U_1^2$ .

Загальний енергетичний рівень трансформатора оцінюється його повною номінальною потужністю, орієнтовно

$$S_{\text{НОМ}} \approx U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}} \text{ або } S_{\text{НОМ}} \approx U_{2\text{НОМ}} I_{2\text{НОМ}}, \quad (3.14)$$

де  $U_{1\text{НОМ}}$ ,  $I_{1\text{НОМ}}$ ,  $U_{2\text{НОМ}}$ ,  $I_{2\text{НОМ}}$  – номінальні значення відповідно напруг і струмів обмоток.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора  $\eta = P_2 / P_1$ , його номінальне значення  $\eta_{\text{НОМ}}$  може знаходитися в межах  $0,9 \dots 0,995$ , зростаючи з одночасним підвищенням  $S_{\text{НОМ}}$  і габаритів різних трансформаторів.

### 3.3. Режими роботи і характеристики трансформатора

При дослідженні трансформаторів особливу роль відводять режимам неробочого ходу (НХ) і дослідного короткого замикання (КЗ).

В режимі НХ вторинна обмотка розімкнута і на первинну обмотку подається напруга  $U_{10}$ , що дорівнює номінальній  $U_{1\text{НОМ}}$ . Вимірюючи вторинну напругу  $U_{20}$ , її вважають номінальною  $U_{2\text{НОМ}}$  і визначають коефіцієнт трансформації

$$n = U_{\text{ВН}} / U_{\text{НН}}, \quad (3.15)$$

де  $U_{\text{ВН}}$ ,  $U_{\text{НН}}$  – відповідно вище і нижче із значень  $U_{10}$  і  $U_{20}$ .

Струм НХ  $I_1$  позначається  $I_{10}$  і виражається у відсотках:

$$i_{\text{НХ}} = (I_{10} / I_{1\text{НОМ}}) \cdot 100\%. \quad (3.16)$$

Звичайно значення  $i_{\text{НХ}}$  складає приблизно 10 % і менш. Якщо також врахувати, що  $I_2 = 0$ , а  $P_e \sim I^2$ , то потужністю електричних втрат в режимі НХ можна знехтувати і вважати, що потужність НХ  $P_0$  витрачається тільки на магнітні втрати, тобто

$$P_m = P_0. \quad (3.17)$$

Дослідне КЗ виконується з тією умовою, щоб струми обмоток були рівні номінальним значенням:  $I_{1к} = I_{1ном}$ ;  $I_{2к} = I_{2ном}$ . Установлювана при цьому напруга КЗ  $U_{1к}$  виражається у відсотках

$$u_k = (U_{1к} / U_{1ном}) \cdot 100 \% \quad (3.18)$$

і може складати 5...10 % і менш, тобто  $U_{1к} \ll U_{1ном}$ .

Із дослідного КЗ треба відрізнити аварійне КЗ, яке відбувається при номінальній напрузі, і відповідні надмірно великі струми КЗ можуть призвести до руйнування трансформатора.

Якщо урахувати, що  $P_m \sim U_1^2$ , то при дослідному КЗ магнітні втрати потужності стають зневажливо малими. Тому потужність КЗ  $P_k$  практично відповідає електричним втратам номінального режиму, тобто  $P_{еном} = I_k$ , так як струми обмоток дорівнюють номінальним значенням.

В режимі навантаження трансформатор живиться номінальною напругою  $U_{1ном}$ . Опір навантаження  $z_H$  може змінюватися, але так, щоб струм навантаження  $I_2$  знаходився у діапазоні від нуля до  $I_{2ном}$ .

Величина навантаження може характеризуватися коефіцієнтом навантаження

$$\beta = I_2 / I_{2ном}. \quad (3.19)$$

Робочі властивості трансформаторів ілюструються робочими характеристиками:

$$\eta(\beta), \cos \varphi_1(\beta), U_2(\beta), I_1(\beta),$$

типовий вигляд яких поданий на рис. 3.4, де всі величини приведені у відносних одиницях.

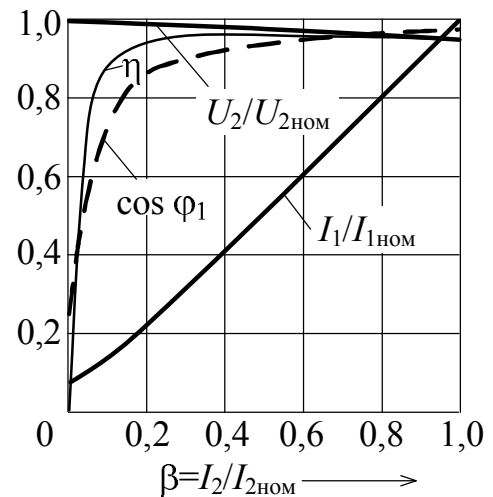


Рисунок 3.4

### 3.4. Приклади розрахунку параметрів і характеристик однофазних трансформаторів

**Приклад 3.1.** Однофазний трансформатор має наступні параметри:  $w_{нн} = 590$ ;  $w_{вн} = 3000$ ;  $S_{ном} = 5$  кВА; номінальна напруга обмотки НН



$U_{\text{НННОМ}} = 130 \text{ В}$ . Визначити номінальні струми обмоток і напругу обмотки ВН.

**Розв'язання.** Коефіцієнт трансформації

$$n = \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}} = \frac{3000}{590} = 5,08.$$

Номінальні струми обмоток НН і ВН та напруга обмотки ВН:

$$I_{\text{НННОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_{\text{НННОМ}} = 5 \cdot 10^3 / 130 = 38,5 \text{ А};$$

$$I_{\text{ВННОМ}} = I_{\text{НННОМ}} \frac{w_{\text{НН}}}{w_{\text{ВН}}} = I_{\text{НННОМ}} / n = 38,5 / 5,08 = 7,58 \text{ А};$$

$$U_{\text{ВННОМ}} = U_{\text{НННОМ}} \frac{w_{\text{ВН}}}{w_{\text{НН}}} = U_{\text{НННОМ}} n = 130 \cdot 5,08 = 660 \text{ В}.$$

**Приклад 3.2.** Задані наступні параметри трансформатора:  $S_{\text{НОМ}} = 0,63 \text{ кВА}$ ;  $U_{1\text{НОМ}} = 220 \text{ В}$ ;  $i_{\text{НХ}} = 9 \%$ ;  $u_{\text{к}} = 5 \%$ . Визначити абсолютні значення струму НХ і струму аварійного КЗ.

**Розв'язання.** Номінальний струм первинної обмотки

$$I_{1\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_{1\text{НОМ}} = 0,63 \cdot 10^3 / 220 = 2,86 \text{ А}.$$

Струм в режимі НХ

$$I_{10} = \frac{i_{\text{НХ}} I_{1\text{НОМ}}}{100\%} = \frac{9 \cdot 2,86}{100} = 0,26 \text{ А}.$$

Напруга в режимі дослідного КЗ

$$U_{1\text{к}} = \frac{u_{\text{к}} U_{1\text{НОМ}}}{100} = \frac{5 \cdot 220}{100} = 11 \text{ В}.$$

Струм аварійного КЗ, що відбувається при номінальній напрузі,

$$I_{1\text{кз}} = I_{1\text{НОМ}} \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{к}}} = 2,86 \cdot \frac{220}{11} = 57,2 \text{ А}.$$

**Приклад 3.3.** При експериментальному дослідженні однофазного трансформатора було встановлене і виміряне :

1) в досліді НХ  $U_{10} = U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$ ;  $I_{10} = 0,3 \text{ А}$ ;  $P_0 = 23 \text{ Вт}$ ;  
 $U_{20} = 110 \text{ В}$ ;

2) в досліді КЗ  $I_{1\text{к}} = I_{1\text{НОМ}} = 5 \text{ А}$ ;  $U_{1\text{к}} = 13 \text{ В}$ ;  $P_{\text{к}} = 55 \text{ Вт}$ .

Потрібно зобразити Т-образну схему заміщення трансформатора і визначити параметри її елементів.

**Розв'язання.** Типова Т-образна схема заміщення зображена на рис. 3.5, а. Вітка з повним опором  $Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$  являється такою, що намагнічує і заміщує дію основного магнітного потоку. Вітка з повним опором  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1\text{роз}}^2}$  відноситься до первинної обмотки, а вітка з приведеним  $Z_2' = \sqrt{(R_2')^2 + (X_{L2\text{роз}}')^2}$  – до вторинної.

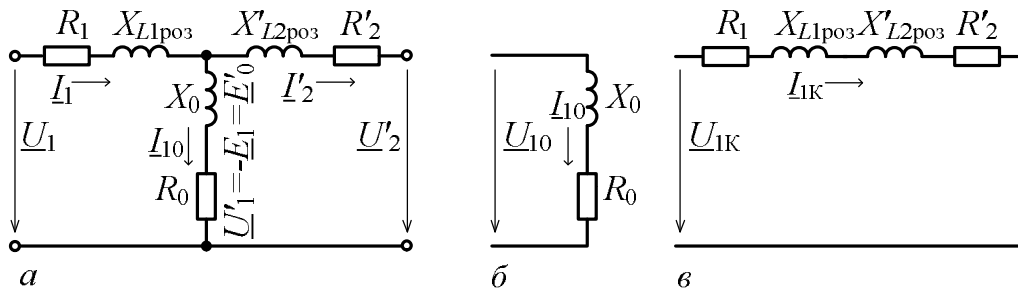


Рисунок 3.5

Параметри елементів схеми визначають, враховуючи відомі співвідношення опорів  $Z_1 \approx Z_2'$ ;  $Z_1 \ll Z_0$ ;  $Z_2' \ll Z_0$ , завдяки чому для дослідів НХ схема спрощується до вигляду, поданому на рис. 3.5, б, для дослідів КЗ – на рис. 3.5, в.

За даними дослідів НХ (по схемі на рис. 3.5, б) визначаємо:  $Z_0 = U_{10} / I_{10} = 1115 \text{ Ом}$ ;  $R_0 = P_0 / I_{10}^2 = 256 \text{ Ом}$ ;  $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = 1085 \text{ Ом}$ . Активний опір  $R_0$  заміщує магнітні втрати в осерді, індуктивний опір  $X_0$  – індукуючу дію основного магнітного потоку  $\Phi$ , що приводить до збудження ЕРС  $E_1$  і  $E_2$ .

За даними дослідів КЗ (по схемі на рис. 3.5, в) знаходимо повний, активний і реактивний опори КЗ трансформатора:

$$Z_k = U_{1к} / I_{1к} = 2,6 \text{ Ом}; R_k = P_k / I_{1к}^2 = 2,2 \text{ Ом}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 1,4 \text{ Ом}.$$

Використовуючи припущення о рівності параметрів первинної обмотки і приведених параметрів вторинної обмотки, отримуємо:

$$R_1 \approx R_2' \approx R_k / 2 = 1,1 \text{ Ом}; X_{L1\text{роз}} \approx X_{L2\text{роз}}' \approx X_k / 2 \approx 0,7 \text{ Ом}.$$

Реальні – неприведені параметри вторинної обмотки:

$$R_2 = R'_2 / n^2 = 0,09 \text{ Ом}; X_{L2\text{роз}} \approx X'_{L2\text{роз}} / n^2 = 0,06 \text{ Ом},$$

де  $n = U_{10} / U_{20} = 3,45$  – коефіцієнт трансформації.

За допомогою активних опорів  $R_1$  і  $R_2$  заміщуються електричні втрати потужності обмоток, за допомогою індуктивних опорів  $X_{L1\text{роз}}$  і  $X_{L2\text{роз}}$  – дія потоків розсіювання  $\Phi_{1\text{роз}}$  і  $\Phi_{2\text{роз}}$ , що приводить до збудження відповідних ЕРС  $E_{1\text{роз}}$  і  $E_{2\text{роз}}$ .

**Приклад 3.4.** Однофазний трансформатор має наступні параметри:  $U_{1\text{ном}} = 127 \text{ В}$ ;  $U_{2\text{ном}} = 400 \text{ В}$ ;  $I_{1\text{ном}} = 2,5 \text{ А}$ ;  $P_k = 17 \text{ Вт}$ ;  $U_{1к} = 8 \text{ В}$ . Навантаження трансформатора має активно-індуктивний характер при  $\cos \varphi_H = 0,7$ . Розрахувати і побудувати зовнішню характеристику трансформатора.

**Розв'язання.** Зовнішня характеристика – залежність  $U_2(I_2)$  або  $U_2(\beta)$ , де  $\beta$  – коефіцієнт навантаження ( $\beta = I_2 / I_{2\text{ном}}$ ).

Із теорії трансформатора відома приближена формула зовнішньої характеристики

$$U_2 = U_{20} \left[ 1 - \beta \frac{u_k}{100\%} \cos(\varphi_H - \varphi_k) \right].$$

Відсотковий вираз напруги КЗ

$$u_k = \frac{U_{1к}}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100\% = 6,3\%.$$

Кут зсуву фаз навантаження визначається по її коефіцієнту потужності

$$\varphi_H = \arccos(\cos \varphi_H) = \arccos(0,7) = 45,6^\circ.$$

Коефіцієнт потужності і кут зсуву фаз трансформатора при КЗ з урахуванням того, що струм первинної обмотки при КЗ  $I_{1к} = I_{1\text{ном}}$  відповідно  $\cos \varphi_k = P_k / (U_{1к} I_{1к}) = 0,85$ ;  $\varphi_k = \arccos(0,85) = 31,8^\circ$ .

Напруга на затискачах вторинної обмотки в режимі НХ

$$U_{20} = U_{2\text{ном}}.$$

Підставляючи знайдені значення, отримуємо явну формулу зовнішньої характеристики конкретного трансформатора:

$$U_2 = 400 \left[ 1 - \beta \frac{6,3}{100} \cos(45,6^\circ - 31,8^\circ) \right] = 400(1 - \beta \cdot 0,061).$$

Очевидно, приблизно визначена зовнішня характеристика являється прямою лінією, що проводиться через точки:

$$\beta = 0; \quad U_2 = 400 \text{ В};$$

$$\beta = 1; \quad U_2 = 375,6 \text{ В}.$$

Побудована таким чином зовнішня характеристика зображена на рис. 3.6 у відносних одиницях:  $U_2^*(\beta)$ , де  $U_2^* = U_2 / U_{2\text{ном}}$ .

Зміна напруги на виході трансформатора пояснюється його падінням на внутрішньому опорі, який найбільш повно проявляється в режимі КЗ, дані якого використані для отримання формули зовнішньої характеристики.

**Приклад 3.5.** Дані наступні параметри трансформатора:  $S_{\text{ном}} = 1,0 \text{ кВА}$ ;  $P_0 = 25 \text{ Вт}$ ;  $P_K = 70 \text{ Вт}$ . Навантаження трансформатора являється активно-індуктивним при  $\cos \varphi_H = 0,6$ .

Належить побудувати графік  $\eta(\beta)$ , де  $\eta$  – ККД;  $\beta$  – коефіцієнт навантаження.

**Розв'язання.** Із теорії трансформаторів відома приближена формула розрахунку залежності  $\eta(\beta)$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_M + P_e} = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_H}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_H + P_0 + \beta^2 P_K}.$$

Підставляючи задані значення для даного трансформатора отримаємо

$$\eta = \frac{\beta \cdot 1000 \cdot 0,6}{\beta \cdot 1000 \cdot 0,6 + 25 + \beta^2 70} = \frac{600 \cdot \beta}{600 \cdot \beta + 25 + 70 \cdot \beta^2}.$$

Приймаючи ряд конкретних значень  $\beta$  від НХ до номінального навантаження, отримуємо чисельну залежність  $\eta(\beta)$  (табл. 3.1), яка побудована на рис. 3.6.

Таблиця 3.1 – Дані для побудови залежності  $\eta(\beta)$

$\beta$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\eta$	0	0,54	0,7	0,81	0,852	0,869	0,876	0,878	0,876	0,873	0,869	0,863

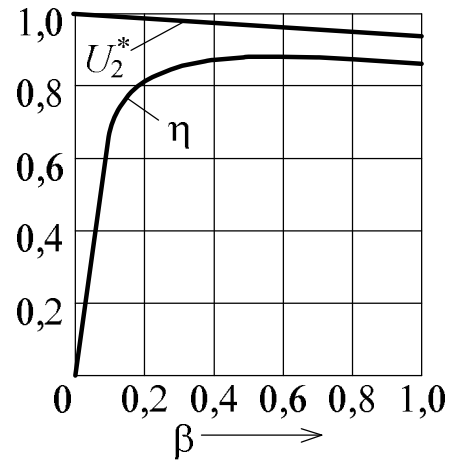


Рисунок 3.6

## 4. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Машини постійного струму, як і всі електричні машини, є зворотними, тобто, вони можуть працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Генератор є джерелом електроенергії, в якому механічна енергія перетворюється в електричну, а у двигуні, навпаки, електрична енергія перетворюється у механічну. В теперішній час вони застосовуються в основному в якості двигунів для приводів машин та механізмів, які потребують плавного та економічного регулювання частоти обертання в широких межах, наприклад в електротязі, а також великих перевантажувальних і пускових моментів.

### 4.1. Будова та принцип дії двигуна постійного струму

Двигун постійного струму складається з трьох основних частин: нерухомого статора, обертального ротора (якоря) і колекторного вузла (рис. 4.1). На рис. 4.1 показаний двигун у поперечному (а) і повздовжньому перерізах (б), в розрізі та в загальному вигляді (в).

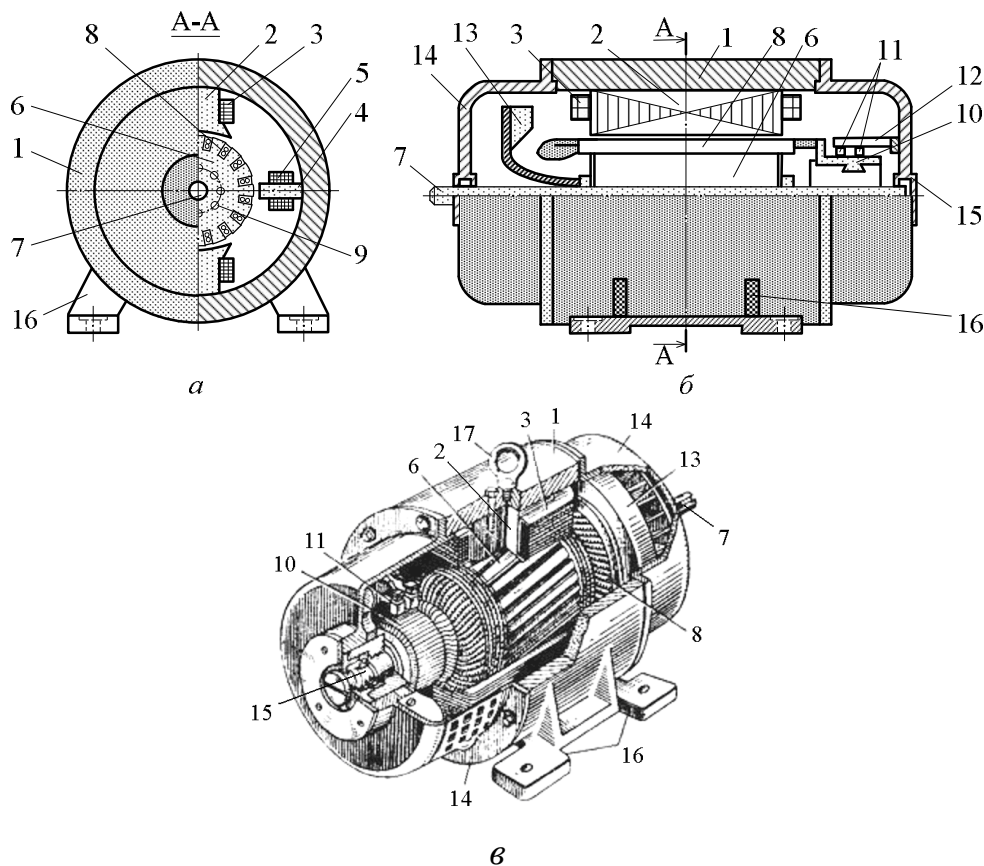


Рисунок 4.1

Статор містить станину 1, яка являє собою полий сталевий циліндр, головні полюси 2, що кріпляться до станини (завжди шихтовані) з полюсними наконечниками. Обмотка збудження 3 встановлена на головних полюсах. Додаткові полюси 4 з обмоткою 5 розташовуються між головними полюсами.

Якір містить шихтоване осердя 6, яке посаджене на вал 7. Обмотка якоря 8 укладена в пази осердя, в якому виконані канали для охолодження 9. Колекторний вузол містить колектор 10, виконаний з окремих колекторних мідних пластин. На колекторі встановлюються щітки 11 (вугільнографітні), які за допомогою щіткотримача з'єднані з траверсою 12. Щітки ковзають по колектору, здійснюючи електричний зв'язок обмотки якоря з зовнішнім колом. Крім того, двигун містить вентилятор 13, який посаджений на вал, підшипникові щити 14, що встановлені на підшипниках 15. Двигун кріпиться до основи за допомогою лап 16.

На рис. 4.2 більш детально показані елементи статора: загальний вид (а); поперечний переріз (б) та осердя (в) головного полюса; додатковий полюс (г); цифрами подані: 1 – осердя головного полюса; 2 – обмотка збудження; 3 – полюсний наконечник; 4 – якір; 5 – станина; 6 – болт-“шпилька”; 7 – клемні виводи обмоток полюсів; 8 – додатковий полюс; 9, 10 – осердя та обмотка додаткового полюса.

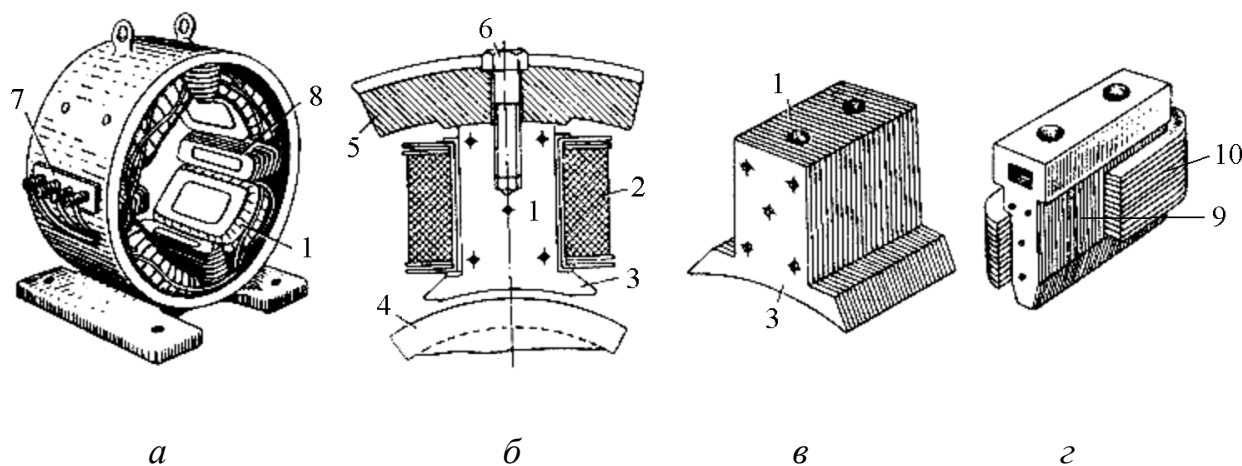


Рисунок 4.2

На рис. 4.3 подані елементи якоря і колектора, а також їх конструктивні особливості: 1 – наживні шайби; 2 – канавки під бандажі; 3 – стяжний болт; 4 – затискне кільце; 5 – міканітова ізоляція; 6 – корпус-втулка; 7 – виступ з прорізом колекторної пластини.

Обмотка якоря виконана у вигляді секцій, кінці яких припаяні до пластин колектора. Усі секції з'єднані послідовно. Секції мають по дві активні (пазові) частини. Кінець наступної секції обмотки з'єднаний з початком попередньої. Таким чином утворюється замкнена обмотка якоря. Секції обмотки вкладаються в пази якоря в певному порядку так, щоб при обертанні якоря їх частини завжди знаходились під різними полюсами статора.

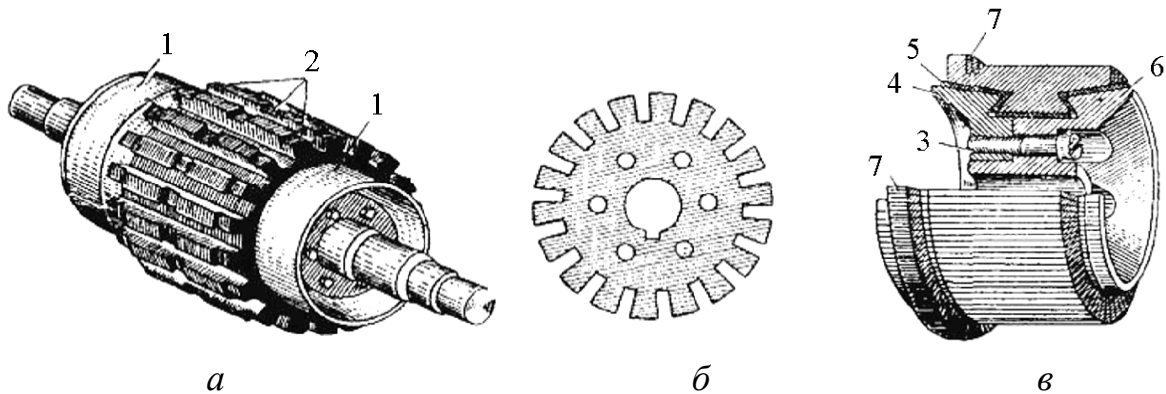


Рисунок 4.3

Кількість щіток дорівнює числу головних полюсів машини. Щітки встановлюються на колекторі по осі полюсів (при наявності додаткових полюсів) так, щоб вони з'єднувались з ділянками секцій, які в даний момент майже не перетинають силові лінії. Кожна щітка звичайно перекриває на колекторі декілька пластин. Через те що секції в кожній паралельній вітці обмотки з'єднані послідовно, то їх ЕРС додаються. Обмотка щітками ділиться на паралельні вітки. Число паралельних віток позначається  $2a$ . Струм паралельної вітки  $i_a = \frac{I_a}{2a}$ , де  $I_a$  – струм обмотки якоря.

Принцип дії машини постійного струму базується на законах електромагнітної індукції та законі Ампера (рис. 4.4). Магнітне поле машини утворює обмотка збудження, яка знаходиться на головних полюсах.

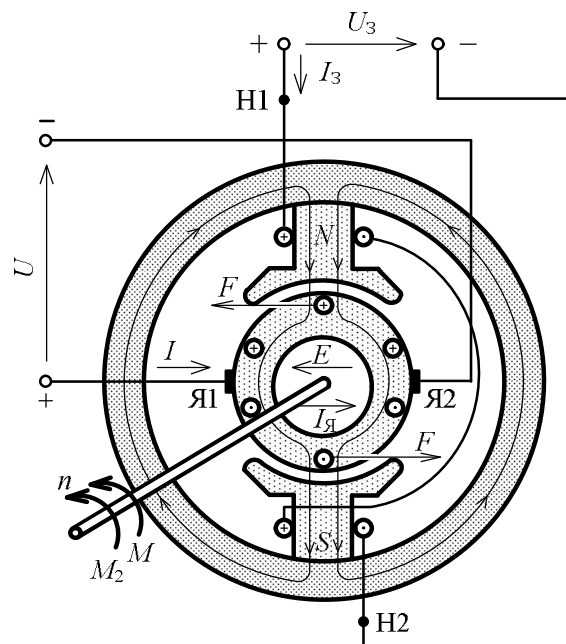


Рисунок 4.4

Основний магнітний потік  $\Phi$  проходить станину, осердя полюсів, осердя якоря і дворазово долає повітряний проміжок між якорем та головними полюсами. Напруга  $U$ , що подається на обмотку якоря від мережі, створює струм у провідниках обмотки якоря  $I_a$  (напрямок вказаний знаками  $\oplus$  і  $\odot$ ). За законом Ампера на провідники обмотки якоря діють сили  $F$ , напрям яких визначається правилом лівої руки. Ці сили створюють обертальний момент  $M$ , який приводить якорь двигуна до обертання з частотою  $n$ . При цьому у провідниках обмотки якоря по закону електромагнітної індукції наводяться ЕРС (протиЕРС), напрям яких визначається за правилом правої руки і протилежний напрямку струму у провідниках.

#### 4.2. Основні рівняння двигунів постійного струму

Обертальний момент

$$M = C_M \Phi I_a. \quad (4.1)$$

Корисний момент на валу двигуна

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n}, \quad (4.2)$$

де  $P_2$  – корисна потужність на валу двигуна, Вт;  $n$  – частота обертання, об/хв.

Напруга на якорі

$$U = E + I_a R_a. \quad (4.3)$$

ЕРС якоря

$$E = C_E \Phi n. \quad (4.4)$$

Рівняння моментів двигуна при сталому режимі роботи:

$$M = M_2 + M_0 = M_c + M_0, \quad (4.5)$$

де  $M_0$  – момент неробочого ходу двигуна;  $M_c$  – статичний (гальмовий) момент робочого механізму.

#### 4.3. Способи пуску в хід і регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

На рис. 4.5 зображені електричні схеми пуску і регулювання частоти обертання двигунів постійного струму з паралельним (а) і послідовним збудженням (б).



Застосовуються наступні способи пуску:

- а) пряме вмикання двигунів в мережу на номінальну напругу;
- б) реостатний спосіб пуску шляхом вмикання в коло якоря пускового реостата  $R_{\Pi}$ ;

в) безреостатна зміна напруги  $U$  при пуску, що підводиться до двигуна за допомогою спеціальних генераторів.

Перший спосіб пуску застосовується для машин малої потужності. Пускові струми  $I_{\text{пуск}} = U/R_a$  звичайно перевищують номінальні значення струмів в 6...8 разів.

Третій спосіб застосовується рідко з використанням системи „генератор-двигун”.

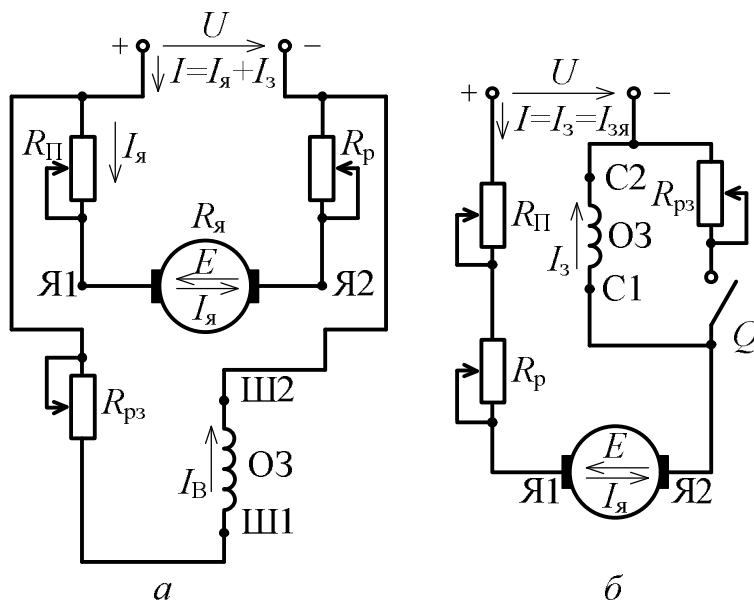


Рисунок 4.5

Найбільш широко розповсюджений другий спосіб. При цьому пусковий струм  $I_{\text{пуск}} = U/(R_a + R_{\Pi})$  обмежується в межах  $I_{\text{пуск}} = (1,5...2,5)I_{\text{ном}}$  за допомогою пускового реостата з опором  $R_{\Pi}$ .

Після запуску двигуна пусковий реостат вимикається.

Регулювання частоти обертання можна проаналізувати, використовуючи формулу

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_p)}{C_E \Phi} \quad (4.6)$$

Із цієї формули впливають такі способи регулювання частоти обертання двигунів:

- а) зміною напруги мережі  $U$ . Регулювання  $n$  відбувається вниз від номінального значення  $n_{\text{ном}}$ ;

б) зміною падіння напруги в якірному колі  $I_a(R_a + R_p)$  шляхом введення регульовального реостата в коло якоря. В цьому випадку частота  $n_{\text{ном}}$  регулюється вниз від номінальної частоти обертання  $n_{\text{ном}}$ ;

в) зміною потоку збудження  $\Phi$  за допомогою регулювального реостата  $R_{pz}$ , включеного в коло збудження. В цьому випадку частота  $n$  регулюється ввєрх від номінального значення  $n_{ном}$ .

#### 4.4. Механічні характеристики двигуна постійного струму

Механічними характеристиками являються залежності  $n(M)$  при  $U = \text{const}$ .

Для двигуна з паралельним збудженням (див. рис. 4.5, а) при  $\Phi = \text{const}$  (реакцією якоря знехтуємо) отримаємо

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - M \frac{R_a + R_p}{C_E C_M \Phi^2} = n_0 - C M. \quad (4.7)$$

На рис. 4.6, а зображені механічні характеристики двигуна паралельного збудження (крива 1 – природна характеристика при  $R_p = 0$ ; крива 2 – штучна при  $R_p > 0$ ). Для двигуна з послідовним збудженням (див. рис. 4.5, б) при  $\Phi = K I_a$  отримаємо

$$n = \frac{U}{C_E \sqrt{\frac{M K}{C_M}}} - \frac{R_a + R_p}{C_E K}. \quad (4.8)$$

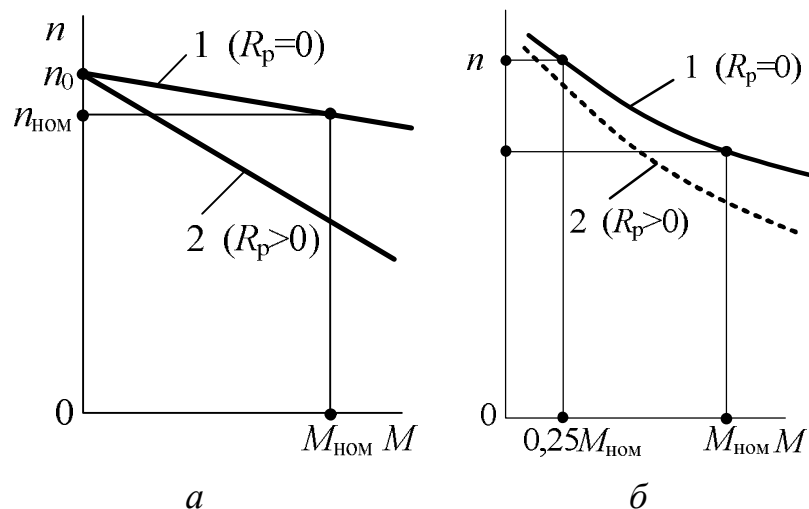


Рисунок 4.6

Останнє рівняння має вигляд, близький до гіперболи (рис. 4.6, б): крива 1 – природна характеристика, крива 2 – штучна.

Відмітимо, що двигуни з послідовним збудженням мають великий обертальний момент, пропорційний квадрату струму. Однак при відсутно-

сті моменту на валу двигуна частота обертання швидко зростає (двигун йде в рознос) і для її обмеження необхідно мати момент опору на валу не менш  $M = 0,25M_{\text{ном}}$ .

#### 4.5. Втрати і ККД двигуна постійного струму

Процес перетворення енергії в двигуні постійного струму з паралельним збудженням пояснюється за допомогою енергетичної діаграми (рис. 4.7), де  $P_1$ ,  $P_{\text{ем}}$ ,  $P_2$  – потужність, відповідно підведена, електромагнітна і корисна;  $P_3$ ,  $P_0$  – втрати відповідно в колі збудження і неробочого ходу;  $P_{\text{мх}}$  – механічні втрати;  $P_{\text{м}}$  – магнітні втрати в магнітопроводі;  $P_{\text{ел}}$  – електричні втрати в обмотках якоря і додаткових полюсів;  $P_{\text{щ}}$  – втрати в контактній „щітка-колектор”;  $P_{\text{дод}}$  – додаткові втрати.

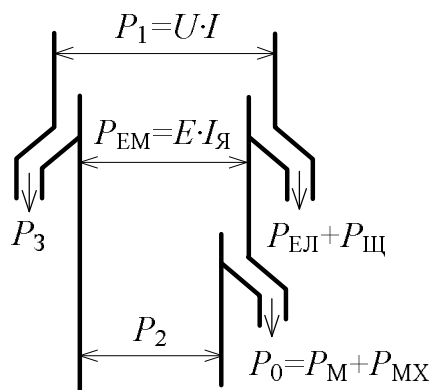


Рисунок 4.7

В двигуні присутні втрати, що трудно враховуються, які називаються додатковими  $P_{\text{дод}}$ , що складають 0,5...1,0 % підведеної потужності в двигуні.

ККД двигуна

$$\eta_{\text{д}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (4.9)$$

де  $\Delta P$  – сума втрат в двигуні,

$$\Delta P = P_0 + P_{\text{ел}} + P_{\text{щ}} + P_3 + P_{\text{дод}}. \quad (4.10)$$

#### 4.6. Приклади розрахунку параметрів і характеристик двигунів постійного струму

**Приклад 4.1.** Двигун з паралельним збудженням (див. рис. 4.5, а) має такі дані: номінальну потужність  $P_{2\text{ном}} = 20$  кВт; номінальну напругу  $U_{\text{ном}} = 220$  В; номінальну частоту обертання  $n_{\text{ном}} = 500$  об/хв; номінальний ККД  $\eta_{\text{ном}} = 0,8$ ; опір якоря  $R_a = 0,08$  Ом; опір обмотки збудження  $R_{3\phi} = 32$  Ом.

1. Для номінального режиму визначити потужність  $P_{1\text{ном}}$  і струм  $I_{\text{ном}}$ , що споживаються двигуном із мережі; струм обмотки збудження

$I_{зб\text{НОМ}}$ ; струм якоря  $I_{a\text{НОМ}}$ ; номінальну електромагнітну потужність  $P_{ем\text{НОМ}}$ ; ЕРС  $E_{\text{НОМ}}$ ; номінальні обертальний  $M_{\text{НОМ}}$  і корисний  $M_{2\text{НОМ}}$  механічні моменти; сумарні втрати в двигуні  $\Delta P_{\text{НОМ}}$ .

**Вказівка.** При розрахунку реакцією якоря знехтувати.

2. Побудувати механічні характеристики  $n(M)$  при  $U_{\text{НОМ}}$ : природну; штучну, якщо в коло якоря введений регулювальний реостат з опором  $R_p = 0,18 \text{ Ом}$ .

**Розв'язання.**

1. Для номінального режиму:

$$P_{1\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{20}{0,8} = 0,25 \text{ кВт}; \quad I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{1\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{25 \cdot 10^3}{220} = 113,6 \text{ А};$$

$$I_{зб\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_{зб}} = \frac{220}{32} = 6,9 \text{ А}; \quad I_{a\text{НОМ}} = I_{\text{НОМ}} - I_{зб\text{НОМ}} = 113,6 - 6,9 = 106,7 \text{ А}.$$

$$E_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} - I_{a\text{НОМ}} R_a = 220 - 106,7 \cdot 0,08 = 211,5 \text{ В};$$

$$P_{ем\text{НОМ}} = E_{\text{НОМ}} I_{a\text{НОМ}} = 211,5 \cdot 10,6 = 22570 \text{ Вт} = 22,57 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{ем\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{22570}{500} = 431 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{2\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{2\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{20 \cdot 10^3}{500} = 382 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = P_{1\text{НОМ}} - P_{2\text{НОМ}} = 25 - 20 = 5 \text{ кВт}.$$

2. Механічна характеристика  $n(M)$  при  $U_{\text{НОМ}}$  представляє собою пряму (рис. 4.8) з координатами:  $M = 0$ ;  $n = n_0 = U_{\text{НОМ}} / C_E \Phi_{\text{НОМ}}$  (точка А) і

$$n = n_{\text{НОМ}} = 500 \text{ об/хв.}; \quad M_{\text{НОМ}} = 431 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

(точка В).

Так як частота обертання якоря при номінальному навантаженні

$$n_{\text{НОМ}} = E_{\text{НОМ}} / C_E \Phi_{\text{НОМ}}, \quad \text{а частота}$$

$$n_0 = U_{\text{НОМ}} / C_E \Phi_{\text{НОМ}}, \quad \text{то}$$

$$n_0 = n_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}}}{E_{\text{НОМ}}} = 500 \frac{220}{211,5} = 520 \text{ об/хв.}$$

Штучна характеристика  $n(M)$  при  $U_{\text{НОМ}}$  і  $R_p = 0,18 \text{ Ом}$  (рис. 4.8) проходить

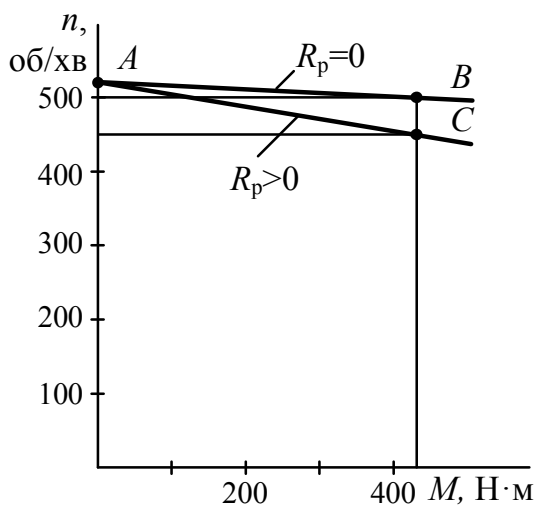


Рисунок 4.8

через точки  $A$  (координати:  $n_0 = 520$  об/хв;  $M = 0$ ) і  $C$  (координати:  $n'$  і  $M_{\text{НОМ}}$ ).

Ордината точки  $C$

$$n' = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{аНОМ}}(R_a + R_p)}{E_{\text{НОМ}}} n_{\text{НОМ}} = \frac{220 - 113,6 \cdot (0,08 + 0,18)}{211,5} \cdot 500 = 450 \text{ об/хв.}$$

**Приклад 4.2.** Двигун постійного струму з послідовним збудженням (див. рис. 4.5, б) має наступні номінальні дані: потужність на валу  $P_{2\text{НОМ}} = 7,5$  кВт; напругу  $U_{\text{НОМ}} = 110$  В; частоту обертання  $n_{\text{НОМ}} = 500$  об/хв; ККД  $\eta_{\text{НОМ}} = 0,798$ ; опір якорного кола з урахуванням обмотки збудження  $R_a = 0,16$  Ом. Характеристика намагнічування  $\Phi(I)$  у відносних одиницях показана на рис. 4.9, де  $k_I = I/I_{\text{НОМ}}$  – кратність струму;  $k_\Phi = \Phi/\Phi_{\text{НОМ}}$  – кратність магнітного потоку.

1. Для номінального режиму роботи визначити потужність  $P_{1\text{НОМ}}$ , що споживається двигуном із мережі; втрати потужності  $\Delta P_{\text{НОМ}}$ ; струм  $I_{\text{НОМ}}$ ; ЕРС  $E_{\text{НОМ}}$ ; електромагнітну потужність  $P_{\text{емНОМ}}$ ; обертальний момент  $M_{\text{НОМ}}$ ; корисний момент на валу двигуна  $M_{2\text{НОМ}}$ .

**Вказівка.** При розрахунку реакцією якоря знехтувати.

2. Побудувати механічні характеристики двигуна  $n(M)$  при  $U_{\text{НОМ}}$  природну та штучну, якщо в колі якоря  $R_p = 0,224$  Ом.

**Розв'язання.** Для номінального режиму:

$$P_{1\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{7,5}{0,798} = 9,4 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = P_{1\text{НОМ}} - P_{2\text{НОМ}} = 9,4 - 7,5 = 1,9 \text{ кВт;}$$

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{1\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{9,4 \cdot 10^3}{110} = 85,5 \text{ А;}$$

$$E_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} R_a = 110 - 85,5 \cdot 0,16 = 96,5 \text{ В;}$$

$$P_{\text{емНОМ}} = E_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}} = 96,5 \cdot 85,5 = 8250 \text{ Вт;}$$

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{емНОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{8250}{500} = 157,6 \text{ Н·м;}$$

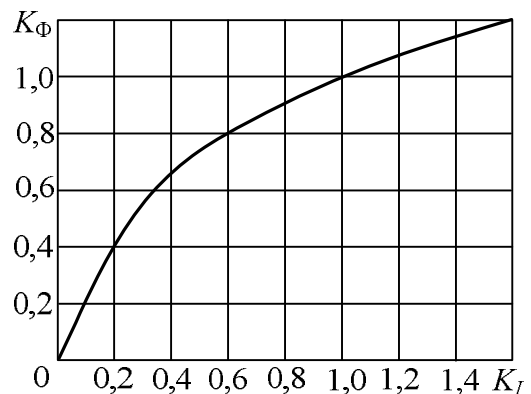


Рисунок 4.9

$$M_{2_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{P_{2_{\text{НОМ}}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{7,5 \cdot 10^3}{500} = 143 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

2. Для побудови природної характеристики  $n(M)$  при  $U = U_{\text{НОМ}}$  скористуємося кривою намагнічування  $\Phi(I)$ , що показана на рис. 4.9, і формулами

$$n = n_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}} - k_I I_{\text{НОМ}} R_a}{k_{\Phi} E_{\text{НОМ}}}, \quad M = k_I k_{\Phi} M_{\text{НОМ}}.$$

Задаючись значеннями  $k_I$  по рис. 4.9, визначаємо  $k_{\Phi}$ ,  $n$  і  $M$ . Усі розрахунки зводимо у табл. 4.1. За результатами розрахунку побудована природна механічна характеристика  $n(M)$ , яка подана на рис. 4.10 (крива 1).

Таблиця 4.1 – Природна та штучна механічні характеристики

$k_I = I / I_{\text{НОМ}}$	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$k_{\Phi} = \Phi / \Phi_{\text{НОМ}}$	0,65	0,8	0,91	1,0	1,08
$M$ , Н·м	41	75,7	114,7	157,6	204,3
$n$ , об/хв, при $R_p = 0$	834	660	565	500	450
$n$ , об/хв, при $R_p = 0,224 \text{ Ом}$	772	585	477	400	339

Для побудови штучної характеристики  $n(M)$  при  $U = U_{\text{НОМ}}$  і  $R_p = 0,224 \text{ Ом}$  скористаємося кривою намагнічування  $\Phi(I)$  і формулами

$$n = n_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}} - k_I I_{\text{НОМ}} (R_a + R_p)}{k_{\Phi} E_{\text{НОМ}}},$$

$$M = k_I k_{\Phi} M_{\text{НОМ}}.$$

Задаючись значеннями  $k_I$  по рис. 4.9, визначаємо  $k_{\Phi}$ ,  $n$  і  $M$ . Усі розрахунки зведені у табл. 4.1.

За результатами розрахунку побудована штучна механічна характеристика  $n(M)$ , яка показана на рис. 4.10 (крива 2).

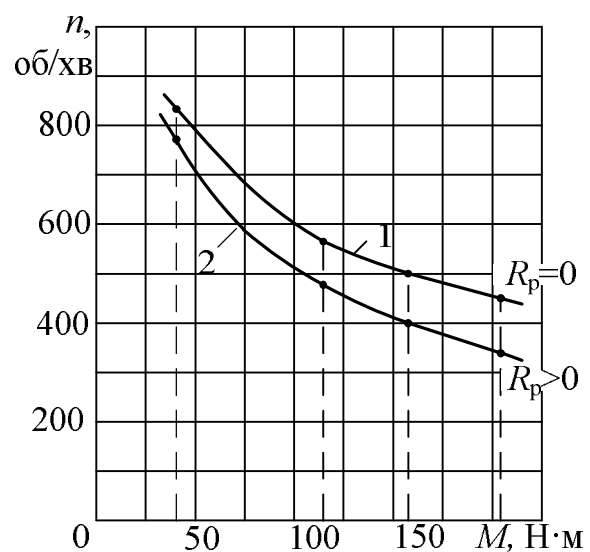


Рисунок 4.10

## 5. АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

### 5.1. Будова трифазного асинхронного двигуна

До асинхронних відносять машини змінного струму, частота обертання ротора  $n_2$  яких при постійній частоті змінного струму джерела  $f$  змінюється зі змінюванням навантаження і відрізняється від синхронної частоти, тобто від частоти обертання магнітного поля статора  $n_1$ . «Асинхронний» – *неодночасний*.

Асинхронний двигун призначений для перетворення електричної енергії в механічну енергію в вигляді обертального моменту на валу машини, який передається виконавчому механізму, з'єднаному з ним, наприклад, за допомогою муфти або через редуктор.

В силових установках широко застосовуються трифазні двигуни, які приводять в рух різні станки, насосно-компресорні, ковальсько-пресові, підйомно-транспортні і інші машини та механізми.

Трифазні асинхронні двигуни виконуються двох типів: з короткозамкненим і фазним роторами. Конструкції асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором зображені на рис. 5.1 *а, б* (поперечний та поздовжній перерізи), а загальний вигляд – на рис. 5.2.

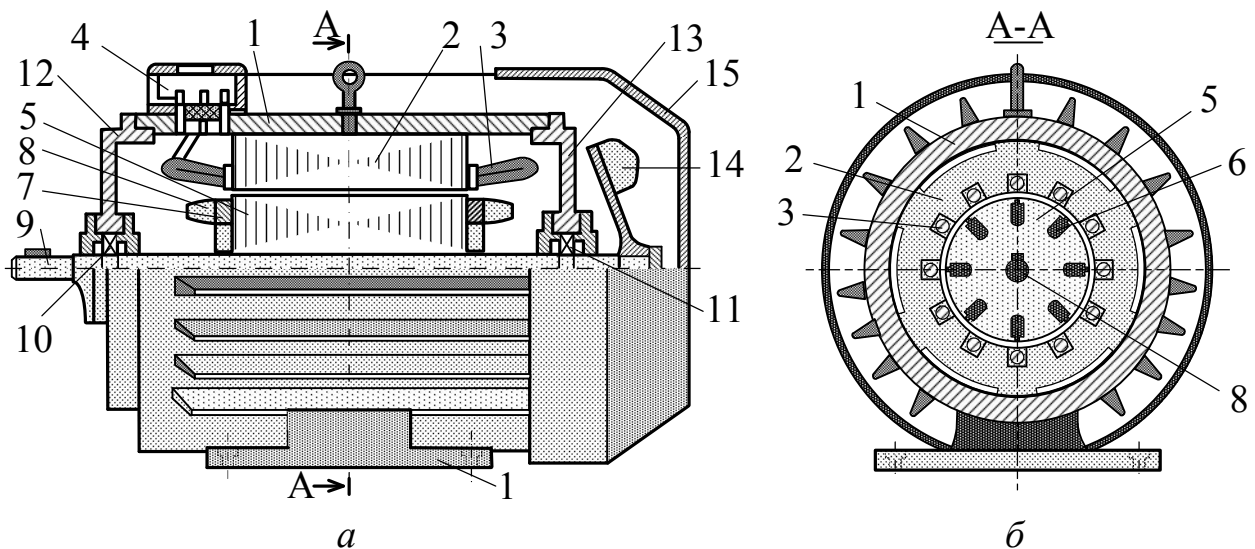


Рисунок 5.1



Рисунок 5.2

Основні частини двигуна – нерухомий статор і обертовий ротор, розділені повітряним зазором. В станині 1, виконаній в вигляді сталевий вальцьованої труби або алюмінієвої виливки, встановлюється осердя 2 статора. Осердя виконується із листів електротехнічної сталі товщиною 0,35...0,5 мм, ізольованих один від одного шаром лаку. В пазах осердя статора, виконаних в процесі штамповки листів, укладається обмотка 3 статора, яка складається з трьох фаз:  $C_1$ - $C_4$  (фаза А),  $C_2$ - $C_5$  (фаза В),  $C_3$ - $C_6$  (фаза С). Початки  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  і кінці  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$  фаз обмоток виведені на клемну коробку 4, що укріплена на станині. Фази обмотки статора з'єднуються „зіркою” або „трикутником”.

Умовні позначення фаз обмоток на схемах і схеми включення їх у трифазну мережу „зіркою” та „трикутником” показані на рис. 5.3, а, б.

На рис. 5.4 поданий конструктивний (а) і схематичний (б) вигляд короткозамкненого ротора, який складається із осердя 5, набраного із листів електротехнічної сталі товщиною 0,35...0,5 мм з виштампуваними в них пазами, в яких розташовуються стержні 6 короткозамкненої обмотки ротора. Стержні на торцях жорстко з'єднані між собою торцевими кільцями 7. Як правило, обмотка ротора виконується із алюмінію заливанням його в

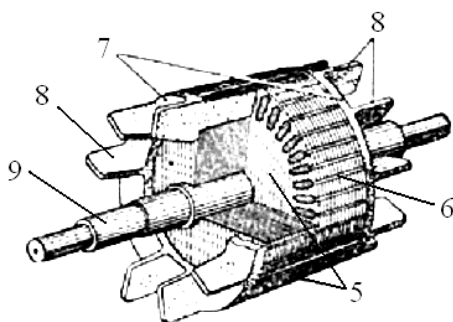
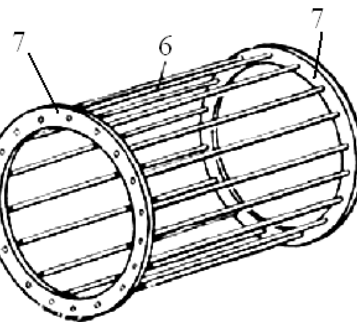


Рисунок 5.4



розплавленому стані в пази осердя з одночасним виливком торцевих кілець 7 і вентиляційних лопаток 8. Осердя ро-

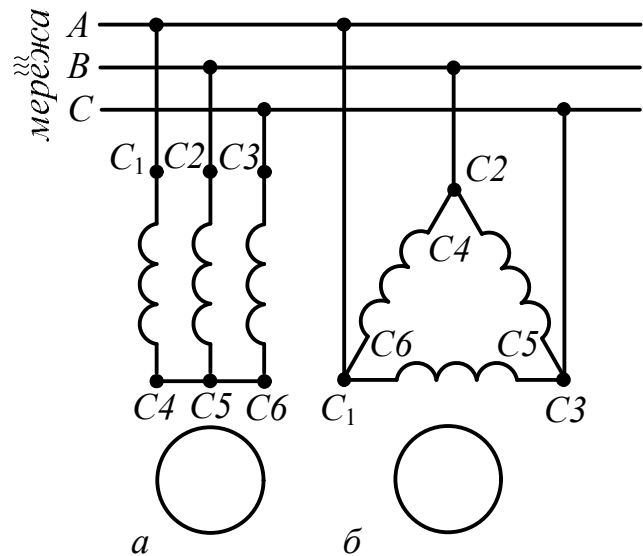


Рисунок 5.3



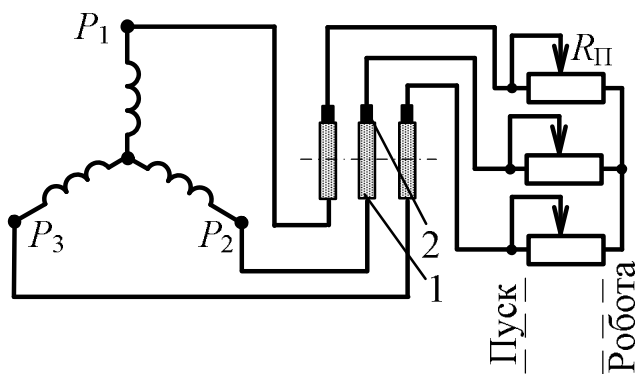


Рисунок 5.5

тор або ротор з контактними кільцями (рис. 5.5) має трифазну обмотку, виконану аналогічно обмотці статора. Вона з'єднується „зіркою”, початки  $P_1$ ,  $P_2$  і  $P_3$  її фаз виводяться на латунні або мідні контактні кільця 1, встановлені на валу ротора і надійно ізолювані один від одного та від корпусу і обертового валу. На кільцях устанавлюються щітки 2, які електрично з'єднуюються з трифазним пусковим реле  $R_{\text{П}}$ .

Трифазні двигуни малої і середньої потужності виготовляються на дві номінальні напруги: 220/127, 380/220, 600/380 В, відношення між якими дорівнює  $\sqrt{3}$ . При лінійних напругах трифазної мережі, вказаних в чисельнику, фази обмотки статора з'єднуються „зіркою”, а в знаменнику – „трикутником”. В обох випадках фазні напруги і струми в кожній фазі обмотки статора однакові.

## 5.2. Обертове магнітне поле і його властивості

Обертове магнітне поле – це багатополіусне магнітне поле, що створюється в повітряному зазорі уздовж розточення статора струмами  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$ ,  $\underline{I}_C$ , що протікають по фазам обмотки статора при її підключенні до трифазної мережі з симетричною системою напруг. Це поле обертається з синхронною частотою, об/хв,

$$n_1 = 60 f_1 / p, \quad (5.1)$$

де  $f_1$  – частота струму обмотки статора;  $p$  – кількість пар полюсів магнітного поля, утворених обмоткою статора.

Для створення цього поля необхідно виконати наступні умови: створити просторовий зсув між осями фазних обмоток статора, рівний 120 електричним градусам (1 електричний градус відповідає  $1/p$  геометричним градусам), а також заживити обмотку статора від трифазної мережі.

тора з обмоткою закріплюється на валу 9 і встановлюється на підшипникових щитах 12 і 13. Для охолодження машини служить вентилятор 14, закритий кожухом 15.

Конструкції статора двигуна з фазним і короткозамкненим роторами ідентичні. Фазний ротор

На рис. 5.6 показана схема розташування трьох котушок (фаз) в пазах осердя статора, що дозволяє отримати двополюсне ( $2p = 2$ ) обертове магнітне поле. Цифрами позначені: 1 – осердя; 2 – пази з обмоткою; 3 – магнітне поле.

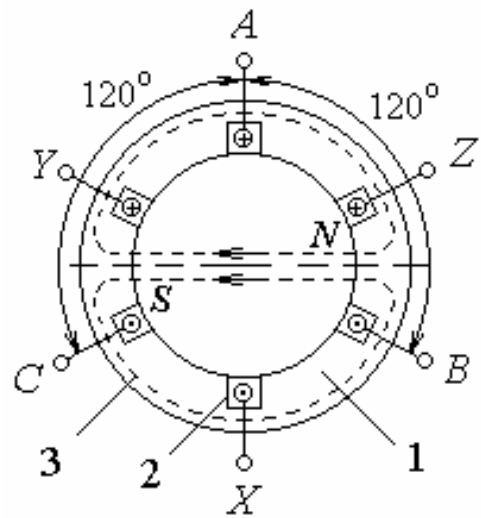


Рисунок 5.6

Щоб упевнитись, що поле трифазної обмотки є обертовим, розглянемо спрощені картини магнітних полів в статорі двополюсного двигуна для трьох моментів часу I – III при максимумах струмів у фазах

(рис. 5.7). В момент часу I (рис. 5.7, а) струм в обмотці  $A-X$   $i_A = i_m$ , а струми в обмотках  $B-Y$  та  $C-Z$   $i_B = i_C = -0,5I_m$  (рис. 5.7, з). Суперпозиція полів, утворених обмотками, дає поле машини, силові лінії якого направлені горизонтально. Магнітні полюси поля  $N$  і  $S$  утворюють вісь поля всередині статора.

В момент часу II (рис. 5.7, б) струм в обмотці  $B-Y$   $i_B = i_m$ , а струми в обмотках  $A-X$  та  $C-Z$   $i_A = i_C = -0,5I_m$  (рис. 5.7, з). Картина поля така ж, як і для моменту часу I, тільки вісь поля повернулась по ходу годинникової стрілки на  $120^\circ$ , співпадаючи з віссю поля обмотки  $B-Y$ . В момент часу III (рис. 5.7, в) струм в обмотці  $C-Z$   $i_C = i_m$ , а струми в обмотках  $A-X$  і  $B-Y$   $i_A = i_B = -0,5I_m$  (рис. 5.7, з). Картина поля така ж, як і для моменту часу I, тільки вісь поля повернулась по ходу годинникової стрілки на  $240^\circ$ , співпадаючи з віссю поля обмотки  $C-Z$ .

Результуючий вектор магнітного поля дорівнює  $1,5 \cdot B_m$  (де  $B_m$  – амплітуда поля однієї фази) і обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  у бік фази, що відстає. Таке поле, що обертається, називають круговим магнітним полем. Рух магнітної хвилі супроводжується переміщенням магнітних полюсів  $N$  і  $S$  у внутрішній поверхні статора, причому залежність магнітного поля у повітряному зазорі близька до синусоїдальної.

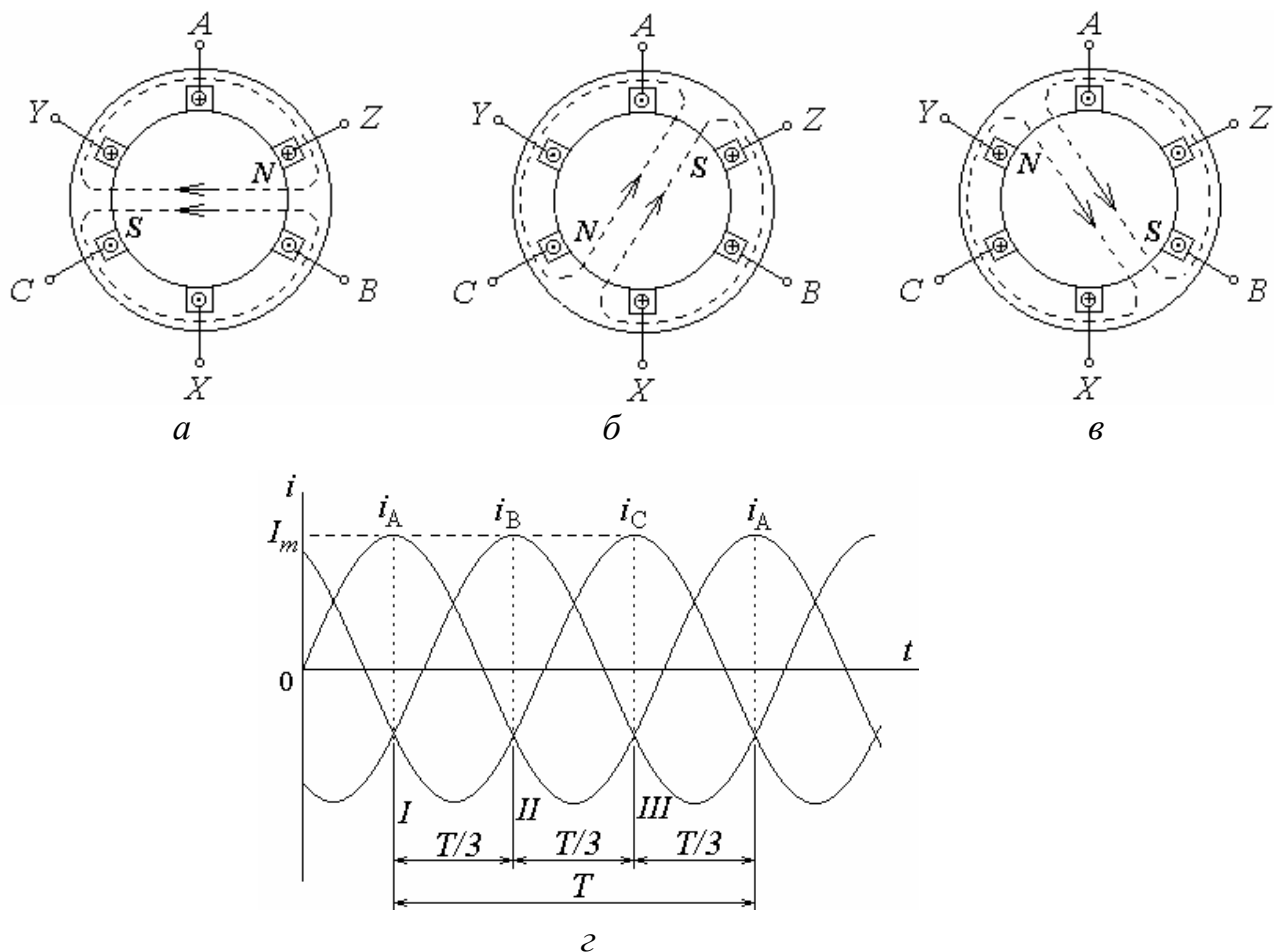


Рисунок 5.7

Таким чином, при прямому чергування фаз обмотки статора ( $A-B-C$ ) поле двополюсної машини рівномірно обертається по ходу годинникової стрілки, здійснюючи повний оберт в просторі за один період синусоїдального струму. Якщо змінити порядок чергування фаз в обмотці статора на зворотній, наприклад  $B-A-C$ , для чого необхідно змінити підключення до мережі любых двох фазних обмоток, то магнітне поле машини буде обертатись у зворотному напрямку, тобто проти ходу годинникової стрілки.

### 5.3. Принцип роботи трифазного асинхронного двигуна

Обертове магнітне поле, перетинаючи стержні обмотки ротора, наводить в них ЕРС  $e_2$ , під дією якої в стержнях обмотки ротора наводяться струми  $I_2$ , напрям активних складових яких співпадає з напрямом ЕРС. Вплив обертового поля на струми ротора створює сили  $F$ , що утворюють обертальний момент  $M$ , який приводить ротор до обертання в той же бік, що й магнітне поле з частотою  $n_2 < n_1$ .

Отже, в сталому режимі обертання ротора відбувається з ковзанням

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (5.2)$$

В номінальному режимі  $S_{\text{ном}} = 0,02 \dots 0,09$ . В режимі двигуна ковзання знаходиться в межах  $1 \dots 0$ :  $S_1 = 1$  ( $n_2 = 0$ , ротор нерухомий, режим пуску) і  $S = 0$  ( $n_2 = n_1$  – ідеальний неробочий хід двигуна).

#### 5.4. Основні рівняння асинхронного трифазного двигуна

Рівняння електричного стану фази обмотки статора:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1, \quad (5.3)$$

де  $\underline{U}_1$  – фазна напруга джерела живлення;  $\underline{E}_1$  – фазна ЕРС;  $R_1$ ,  $X_1$  – опори фази обмотки статора відповідно активний і реактивний;  $\underline{I}_1$  – фазний струм обмотки статора.

Рівняння електричного стану фази обмотки ротора:

$$\underline{E}_{2S} = S \underline{E}_{20} = R_2 \underline{I}_2 + jX_{20} S \underline{I}_2, \quad (5.4)$$

де  $\underline{E}_{2S}$  – фазна ЕРС обертового ротора;  $\underline{E}_{20}$  – фазна ЕРС обмотки нерухомого ротора;  $R_2$  – активний опір фази обмотки ротора;  $\underline{I}_2$  – діюче значення фазного струму ротора;  $X_{20}$  – індуктивний опір фази обмотки при нерухомому роторі.

ЕРС, що індукуються в обмотках двигуна:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{\text{об1}} \Phi_m; \quad E_{20} = 4,44 f_1 w_2 k_{\text{об2}} \Phi_m, \quad (5.5)$$

де  $w_1$ ,  $w_2$  – кількість витків відповідно фази статора і ротора;  $k_{\text{об1}}$ ,  $k_{\text{об2}}$  – обмоткові коефіцієнти обмотки відповідно статора і ротора;  $k_{\text{об1}} = 0,92 \dots 0,96$ ; для короткозамкненого ротора  $k_{\text{об2}} = 1$ ; для фазного –  $k_{\text{об2}} = 0,92 \dots 0,96$ ;  $\Phi_m$  – амплітуда магнітного потоку.

#### 5.5. Втрати і ККД асинхронного двигуна

Процес перетворення електричної потужності  $P_1$ , споживаної асинхронним двигуном із мережі, в корисну механічну потужність  $P_2$  пояснюється за допомогою енергетичної діаграми, зображеної на рис. 5.8, де  $P_{e1}$ ,  $P_{e2}$  – електричні втрати в обмотці відповідно статора і ротора;  $P_{m1}$  – магнітні втрати в осерді статора;  $P_{\text{мх}}$  – механічні втрати (на тертя в підшипниках обертового ротора о повітря і вентиляцію);  $m_1$ ,  $m_2$  – кількість фаз обмотки відповідно статора і ротора.

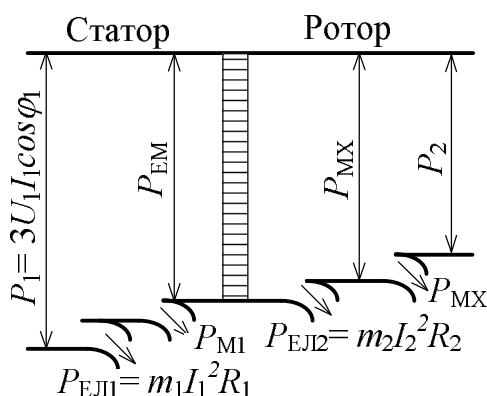


Рисунок 5.8

ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (5.6)$$

де  $\Delta P$  – сума всіх втрат у двигуні.

## 5.6. Обертальний момент і механічні характеристики асинхронного двигуна

Обертальний момент двигуна

$$M = C'_M \Phi I_2 \cos \psi_2, \quad (5.7)$$

де  $C'_M$  – коефіцієнт, що залежить від конструктивних параметрів двигуна;  $\psi_2$  – кут зсуву фаз між ЕРС  $E_2$  і струмом  $I_2$ .

Обертальний момент може бути записаний також в вигляді функції напруги, що прикладена до обмотки статора, і параметрів обмотки ротора:

$$M = C_M \frac{U_1^2 R_2 S}{R_2^2 + (X_{20} S)^2}, \quad (5.8)$$

де  $C_M$  – коефіцієнт, аналогічний коефіцієнту  $C'_M$ .

Аналізуючи останню формулу, можна зробити висновки про те, що момент  $M$  пропорційний  $U_1^2$ , максимальний момент

$$M_{\max} = C_M \frac{U_1^2}{X_{20}} \quad (5.9)$$

не залежить від активного опору  $R_2$ , відповідає критичному ковзанню

$$S_{\text{кр}} = \frac{R_2}{X_{20}} \quad (5.10)$$

і при збільшенні  $R_2$   $M_{\max}$  зміщується в бік більших ковзань.

Для двигунів з короткозамкненим і фазним роторами при відсутності пускового реостата  $R_{\text{п}}$  залежності  $M(S)$  ( $U_1 = \text{const}$ ) ідентичні (рис. 5.9, а крива 1).

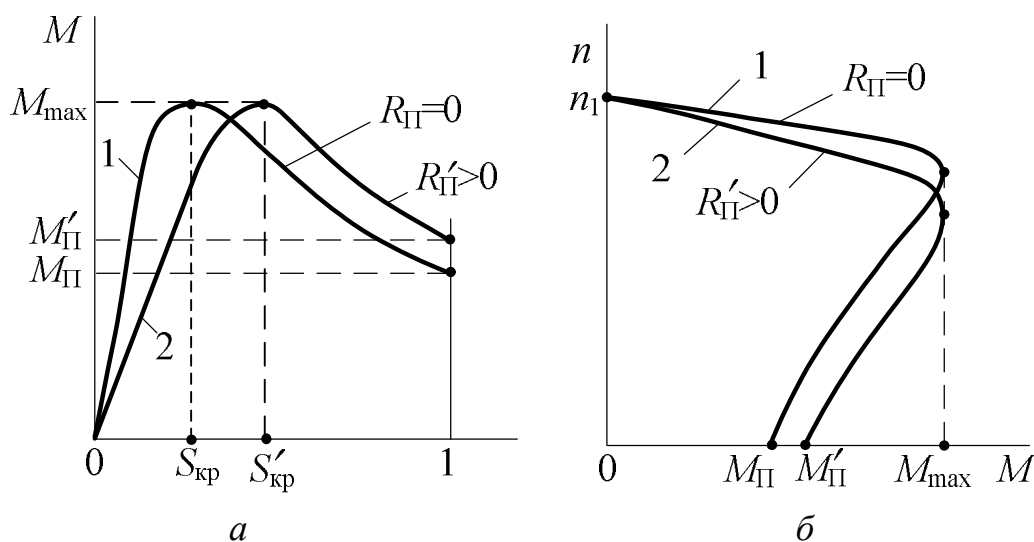


Рисунок 5.9

Двигун з фазним ротором крім природної характеристики  $M(S)$  при  $R_{II} = 0$  має штучні характеристики, кожна із яких відповідає певному значенню  $R_{II}$  (одна із них подана на рис. 5.9, а – крива 2).

Стійка робота двигуна визначається ділянками характеристик від  $S = 0$  до  $S = S_{кр}$ .

Для практичних розрахунків  $M(S)$  при ( $U_1 = \text{const}$ ) застосовується формула Клосса

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}}}, \quad (5.11)$$

де  $2M_{\max} = \lambda_M M_{\text{ном}}$ ;  $\lambda_M$  – перевантажувальна здатність двигуна;  $M_{\text{ном}}$  – номінальний обертальний момент;  $M_{\text{ном}} = M_0 + M_{2\text{ном}}$ ;  $M_0$  – момент неробочого ходу;  $M_{2\text{ном}}$  – номінальний корисний момент на валу двигуна;  $S_{кр} = S_{\text{ном}} (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1})$ .

Нехтуючи  $M_0$ , в загальному випадку можна вважати  $M_{\text{ном}} = M_{2\text{ном}}$ .

Корисний момент на валу двигуна, Н·м:

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n_2}, \quad (5.12)$$

де  $P_2$  – в Вт,  $n_2$  – в об/хв.

Механічні характеристики асинхронного двигуна  $n_2(M)$  при  $U_1 = \text{const}$  являються іншим виразом залежності  $M(S)$ , де  $n_2 = n_1(1 - S)$ .

Природна механічна характеристика  $n_2(M)$  асинхронного двигуна з фазним ротором (рис. 5.9, а, крива 1) і механічна характеристика двигуна з короткозамкненим ротором ідентичні. Штучна механічна характеристика двигуна з фазним ротором при вмиканні пускового реостата  $R_{\text{п}}$  в коло ротора зображена на рис. 5.9, б (крива 2). Стійка робота двигуна знаходиться в діапазоні частот від  $n_0 = n_1$  до  $n_{2\text{кр}} = n_1(1 - S_{\text{кр}})$ .

### 5.7. Робочі характеристики асинхронного двигуна

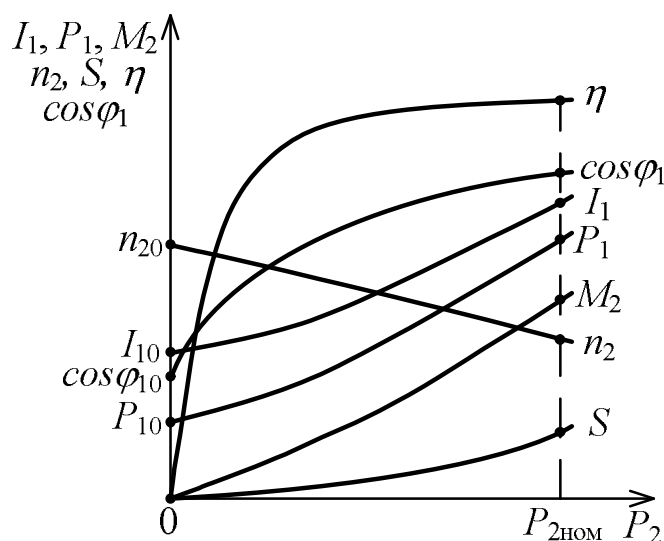


Рисунок 5.10

Основними робочими характеристиками двигуна являються залежності  $M_2$ ,  $n_2$ ,  $\eta$ ,  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $S$ ,  $\cos \varphi_1$  від корисної потужності  $P_2$  за умови:  $U_1 = \text{const}$ ;  $f_1 = \text{const}$ . На рис. 5.10 показані робочі характеристики асинхронного двигуна, де  $I_{10}$  – струм статора при неробочому ході;  $P_{10}$  – потужність, що споживається двигуном при неробочому

ході;  $\cos \varphi_{10}$  – коефіцієнт потужності при неробочому ході.

### 5.8. Пуск в хід і регулювання частоти обертання асинхронного двигуна

При експлуатації двигуна важливими питаннями являються способи пуску, реверсу (зміна напрямку обертання ротора на протилежний), регулювання частоти обертання ротора і можливість роботи двигуна від однофазної мережі змінної напруги.

При пуску асинхронних двигунів виникають великі пускові струми, які в 10...15 разів перевищують номінальні, що призводить до зниження напруги мережі і виявляється на роботі інших споживачів, які включені в ту же мережу. Тому в залежності від співвідношення потужностей мережі і

двигуна пуск здійснюється різними способами. Однак загальним являється то, що при кожному способі пуску пусковий струм двигуна і спричинені їм падіння напруги в лінії не повинні порушувати роботу інших споживачів, що включені в ту же мережу.

На рис. 5.11 подані схеми пуску асинхронних двигунів.

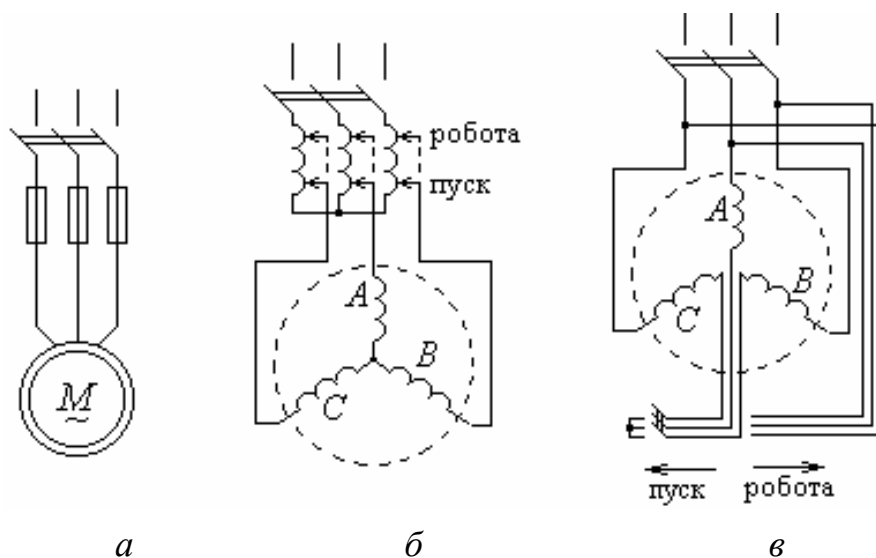


Рисунок 5.11

При малій потужності асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором порівняно з потужністю живильної мережі здійснюється прямий пуск двигуна (рис. 5.11, *a*), при якому обмотка статора відразу підключається на номінальну напругу мережі. Це приводить до появи великих пускових струмів, які взагалі небезпечні для самого двигуна.

Для зниження пускових струмів при їх великій кратності або великій потужності двигуна і обмеженій потужності мережі пуск двигуна з короткозамкненим ротором здійснюється зниженням напруги на затискачах обмотки статора. При цьому зменшуються не тільки пусковий струм, але і пусковий момент на валу двигуна ( $M \sim U_1^2$ ). Напругу на затискачах обмотки статора можна знизити за допомогою автотрансформатора (рис. 5.11, *б*), дроселя (індуктивної котушки з регульованим повітряним зазором в колі магнітопроводу), переключення фаз обмотки статора на час пуску з „трикутника” на „зірку” (рис. 5.11, *в*).

Пуск двигунів з фазним ротором здійснюється за допомогою пускового реостата  $R_{\text{п}}$ , що вмикається в коло ротора (див. рис. 5.5). Збільшення



опору в колі ротора приводить до зменшення пускового струму і одночасно до збільшення пускового моменту.

Реверсування асинхронного двигуна здійснюється зміною порядку чергування фаз обмотки статора. Частоту обертання ротора двигуна загальнопромислового призначення можна регулювати наступними способами:

– зміною частоти живильної напруги за допомогою частотного перетворювача;

– зміною живильної напруги мережі (в дуже малих межах із-за квадратичного зменшення обертового моменту по відношенню к зменшенню напруги).

В спеціальних асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором частоту обертання можна регулювати зміною кількості пар полюсів обмотки статора, а в двигунах з фазним ротором – введенням (підключенням) в коло ротора регулювального реостату.

## 5.9. Приклади розрахунку параметрів і характеристик асинхронних двигунів

**Приклад 5.1.** Трифазний асинхронний двигун включений у трифазну мережу з частотою  $f_1 = 50$  Гц. Технічні дані двигуна: кількість полюсів  $2p = 6$ ; номінальне ковзання  $S_{\text{ном}} = 0,03$ ; перевантажувальна здатність  $\lambda_M = 2,2$ . Визначити синхронну частоту обертання поля статора; номінальну і критичну частоти обертання ротора; діапазон частот, при яких можлива стійка робота двигуна.

**Розв'язання.** Синхронна частота обертання поля статора

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.}$$

Номінальна частота обертання ротора

$$n_2 = n_1 (1 - S_{\text{ном}}) = 1000(1 - 0,03) = 970 \text{ об/хв.}$$

Критичне ковзання

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{ном}} \left( \lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right) = 0,03 \left( 2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,125.$$

Критична частота обертання ротора

$$n_{кр} = n_1(1 - S_{кр}) = 1000(1 - 0,125) = 875 \text{ об/хв.}$$

Стійка робота двигуна можлива в діапазоні частот обертання від  $n_1 = 1000$  об/хв. до  $n_{кр} = 875$  об/хв.

**Приклад 5.2.** Трифазний асинхронний двигун має наступні технічні дані: номінальна потужність на валу двигуна  $P_{2ном} = 0,55$  кВт; номінальна лінійна напруга  $U_1 = 380/220$  В при частоті  $f_1 = 50$  Гц; номінальний коефіцієнт потужності  $\cos \varphi_{1ном} = 0,65$ ; номінальний ККД  $\eta_{ном} = 0,64$ ; кратність пускового струму  $m_I = I_{пуск} / I_{ном} = 3,5$ ; лінійна напруга мережі  $U_1 = 220$  В. Визначити номінальну потужність  $P_{1ном}$ , що споживається двигуном із мережі; номінальний  $I_{ном}$  і пусковий  $I_{пуск}$  струми двигуна.

**Розв'язання.** Номінальна потужність, що споживається двигуном із мережі

$$P_{1ном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном}} = \frac{0,55}{0,64} = 0,859 \text{ кВт.}$$

При заданій напрузі мережі  $U_1 = 220$  В фази обмотки статора з'єднуються „трикутником” (рис. 5.12, а).

Номінальний лінійний струм двигуна

$$I_{л ном} = \frac{P_{2ном}}{\sqrt{3} U_M \cos \varphi_{1ном} \eta_{ном}} = \frac{0,55 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,65 \cdot 0,64} = 3,47 \text{ А.}$$

При з'єднанні обмотки статора „трикутником” номінальний фазний струм

$$I_{ф ном} = \frac{I_{л ном}}{\sqrt{3}} = \frac{3,47}{1,73} = 2 \text{ А.}$$

Пускові струми двигуна:

$$- \text{лінійний } I_{л пуск} = m_I I_{л ном} = 3,5 \cdot 3,47 = 12,2 \text{ А;}$$

$$- \text{фазний } I_{ф пуск} = m_I I_{ф ном} = 3,5 \cdot 2 = 7 \text{ А.}$$

**Приклад 5.3.** Трифазний асинхронний двигун вмикається в мережу з лінійною напругою  $U_1 = 380$  В і має наступні дані: номінальна потужність на валу двигуна  $P_{2ном} = 11$  кВт; номінальна напруга  $U_1 = 380/220$  В при частоті  $f_1 = 50$  Гц; номінальний ККД  $\eta_{ном} = 0,88$ ; номінальне ковзання

$S_{\text{НОМ}} = 0,04$ ; кількість полюсів  $2p = 4$ . Визначити номінальні: лінійний  $I_{\text{ЛНОМ}}$  і фазний  $I_{\text{ФНОМ}}$  струми двигуна; частоту обертання поля статора  $n_1$ ; частоту обертання ротора  $n_{2\text{НОМ}}$ ; обертальний момент  $M_{\text{НОМ}}$ .

**Розв'язання.** Для заданої лінійної напруги мережі  $U_1 = 380$  В обмотку статора необхідно з'єднати „зіркою” (рис. 5.12, б).

При цьому номінальні лінійний і фазний струми двигуна однакові:

$$I_{\text{ЛНОМ}} = I_{\text{ФНОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\sqrt{3} U_{\text{М}} \cos \varphi_{1\text{НОМ}} \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{11 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 21,8 \text{ А.}$$

Синхронна частота обертання поля статора

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв.}$$

Номінальна частота обертання ротора

$$\begin{aligned} n_{2\text{НОМ}} &= n_1 (1 - S_{\text{НОМ}}) = \\ &= 1500(1 - 0,04) = 1440 \text{ об/хв.} \end{aligned}$$

Номінальний обертальний момент

$$\begin{aligned} M_{\text{НОМ}} &= 9,55 \frac{P_{2\text{НОМ}}}{n_{2\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{11 \cdot 10^3}{1440} = \\ &= 72,95 \text{ Н} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

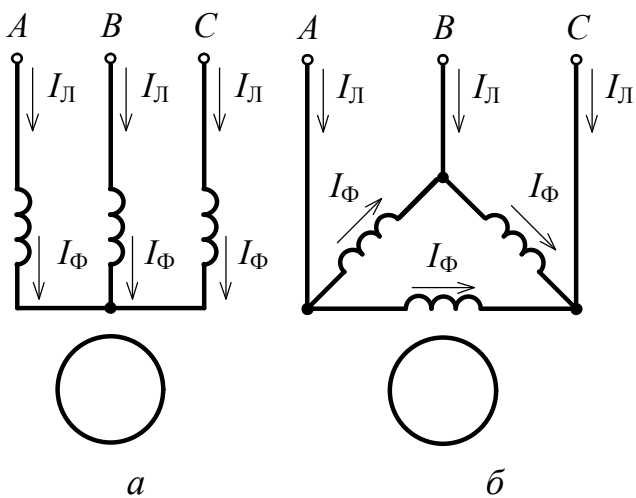


Рисунок 5.12

**Приклад 5.4.** Трифазний асинхронний двигун з номінальними потужністю  $P_{2\text{НОМ}} = 0,55$  кВт і частотою обертання поля статора  $n_{1\text{НОМ}} = 750$  об/хв має кратність максимального моменту  $\lambda_M = M_{\text{max}} / M_{\text{НОМ}} = 1,7$ ; номінальне ковзання  $S_{\text{НОМ}} = 0,091$ .

Розрахувати і побудувати механічні характеристики двигуна  $n_2(M)$  і  $M(S)$  при  $U_1 = 380$  В = const; визначити пусковий момент  $M_{\text{пуск}}$  і його кратність  $k_{\text{п}}$  по відношенню до номінального моменту.

**Розв'язання.** Механічні характеристики розраховуються при умові, що  $U_1 = \text{const}$ , на основі виразів:

$$M = \frac{2M_{\max}}{S/S_{\text{кр}} + S_{\text{кр}}/S}; \quad n_2 = n_1(1 - S); \quad S = S \left( \lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right);$$

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{2\text{НОМ}}}{n_{2\text{НОМ}}}; \quad M_{\max} = \lambda_M M_{\text{НОМ}}.$$

За даними задачі і зазначених формул визначаємо

$$n_{2\text{НОМ}} = 682 \text{ об/хв}; \quad S_{\text{кр}} = 0,28; \quad M_{\text{НОМ}} = 7,7 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{\max} = 13,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Задаючись значеннями  $S$  від 0 до 1, визначаємо  $M$  і  $n_2$ . Результати розрахунків зведені у табл. 5.1.

Пусковий момент двигуна визначається при  $S=1$  і складає  $M_{\text{пуск}} = 6,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , а його кратність

$$k_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{НОМ}}} = \frac{6,8}{7,7} = 0,884.$$

Таблиця 5.1 – Механічні характеристики асинхронного двигуна

$S$	0	0,05	0,091	0,2	0,28	0,4	0,6	0,8	1,0
$n_2, \text{об/хв}$	750	712,5	682	600	540	450	300	150	0
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	0	4,53	7,7	12,39	13,1	12,31	10,04	8,17	6,8

За даними табл. 5.1 побудуємо механічні характеристики  $M(S)$  (рис. 5.13, а) і  $n_2(M)$  (рис. 5.13, б) при  $U_1 = \text{const}$ .

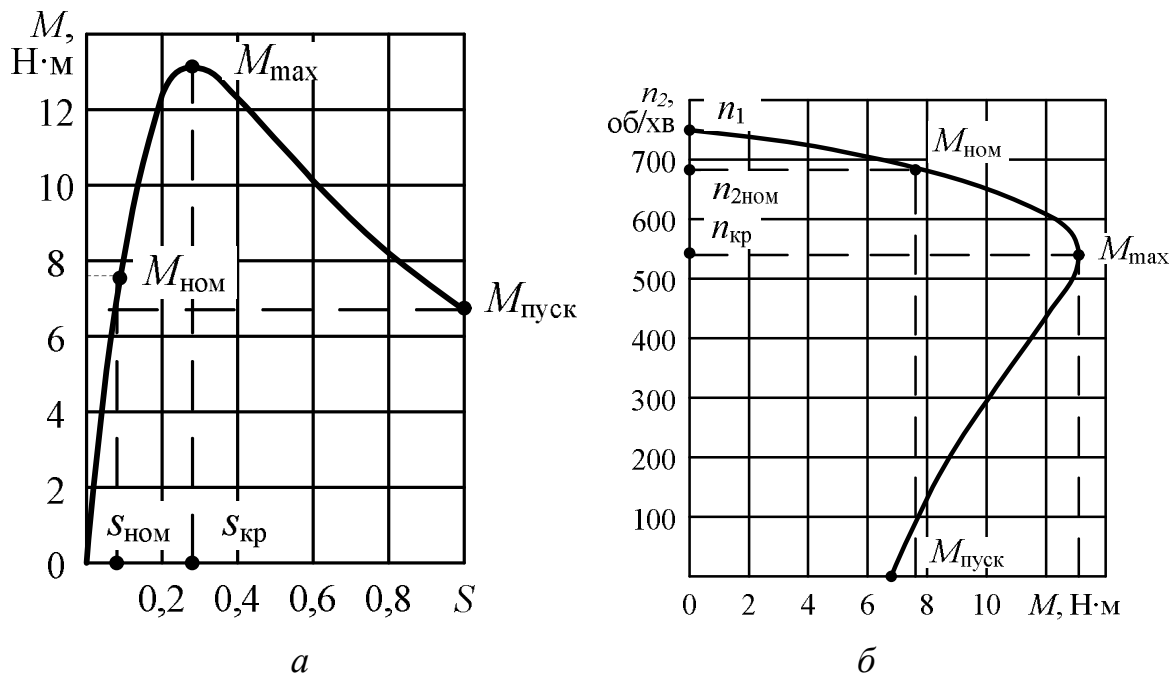


Рисунок 5.13

## 6. ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ КУРСОВОЇ РОБОТИ

### Задача 1. Котушка зі сталевим осердям (однорідне магнітне коло)

На рис. 6.1 показано варіанти магнітних систем у вигляді котушки зі сталевим осердям, що утворюють магнітне коло. В табл. 6.1 для різних варіантів задані: розміри осердя  $a, b, c, D, d, d_s$ ; число витків обмотки котушки  $w$ ; коефіцієнт заповнення шихтованого осердя сталлю  $k_3$ ; марка сталі (криві намагнічування показані на рис. 2.2).

Для заданого варіанта магнітної системи треба визначити величину магнітного потоку  $\Phi$  в осерді при заданому постійному струмі в обмотці  $I$ .

Розсіянням магнітного потоку котушки знехтувати, тобто коефіцієнт розсіяння магнітного потоку  $k_{\text{роз}} = 1$ .

### Задача 2. Котушка зі сталевим осердям (неоднорідне магнітне коло)

На рис. 6.2 показані варіанти магнітних систем у вигляді котушки зі сталевим осердям, що утворюють неоднорідне магнітне коло. В табл. 6.2 подані їхні геометричні розміри і кількість витків котушки –  $w$ , а також  $k_3$  – коефіцієнт заповнення осердя сталлю;  $k_{\text{роз}}$  – коефіцієнт розсіяння магнітного потоку, що

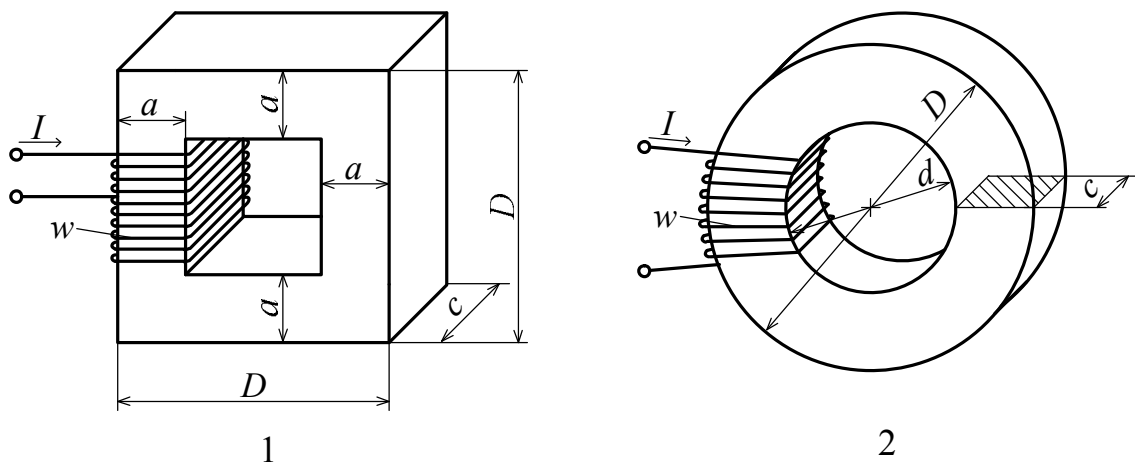
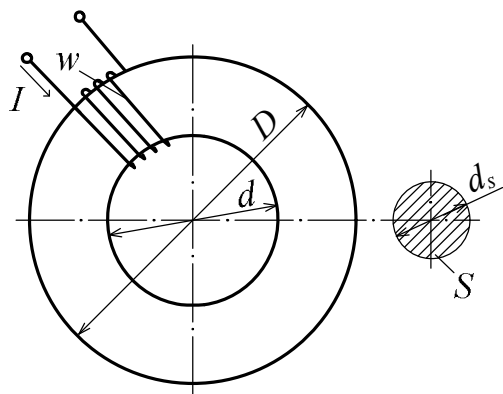
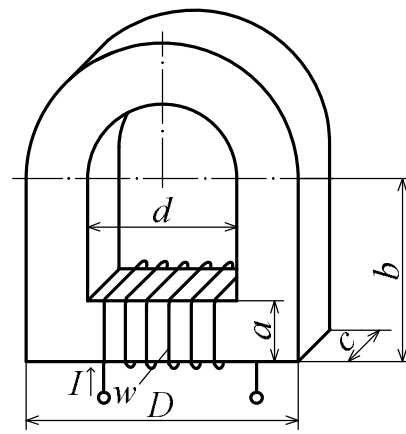


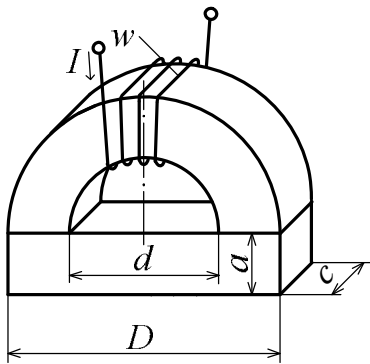
Рисунок 6.1



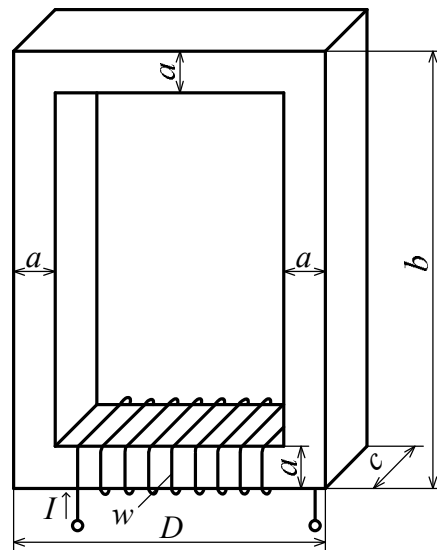
3



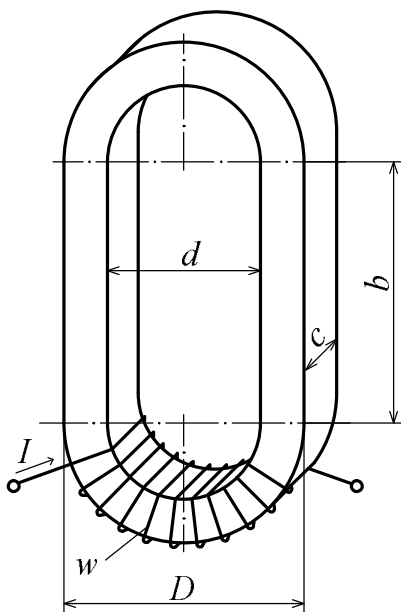
4



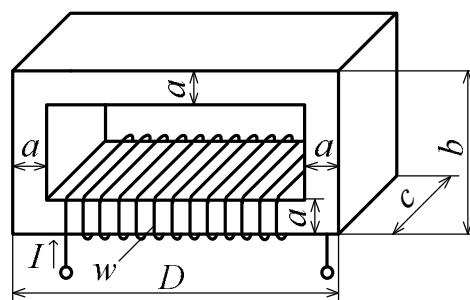
5



6



7



8

Рисунок 6.1 (продовження)

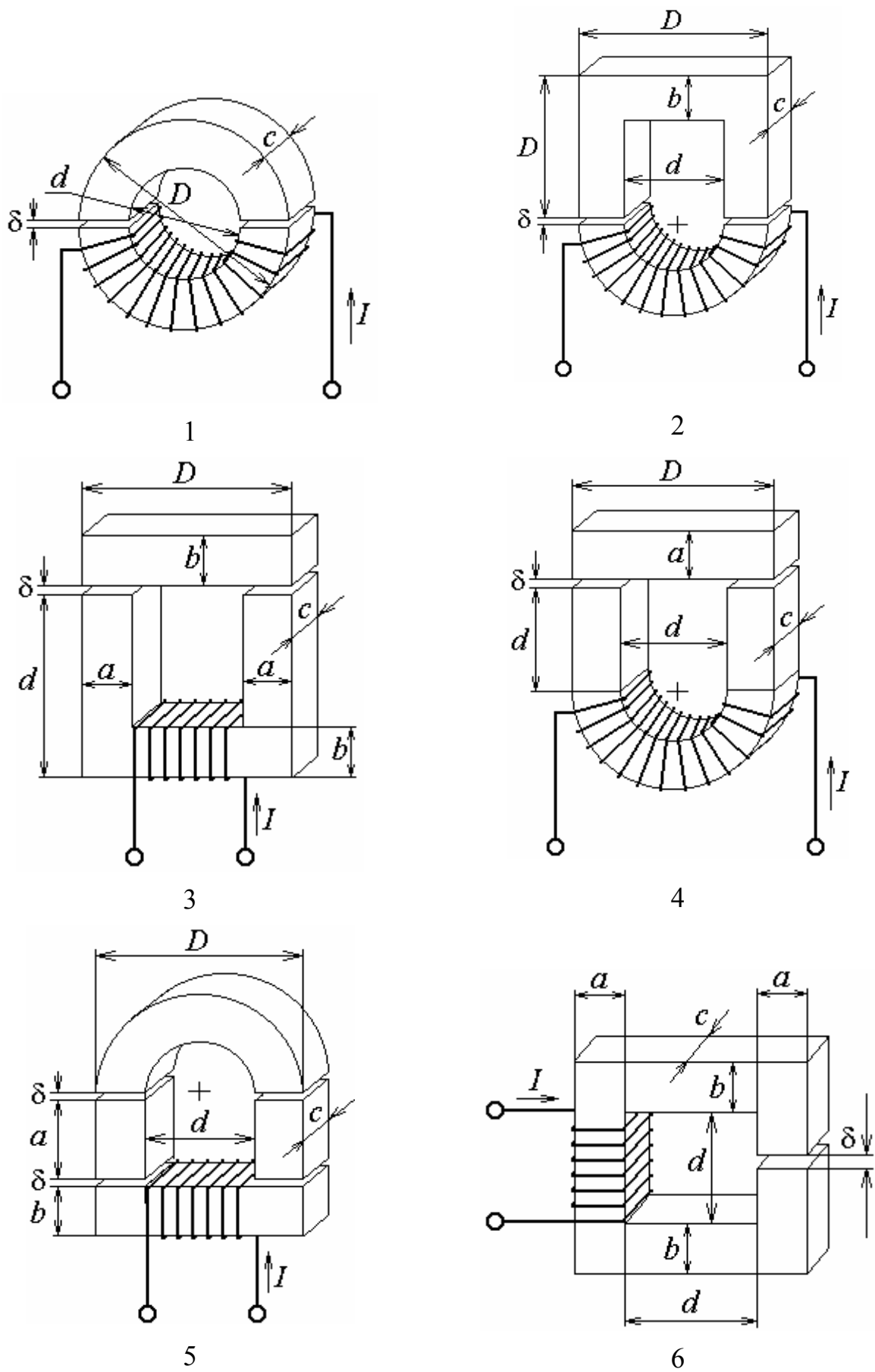
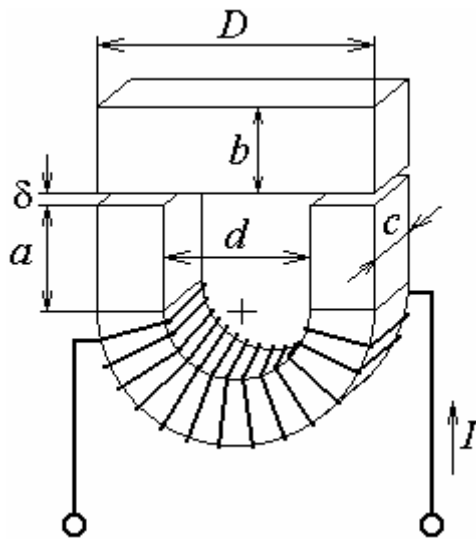
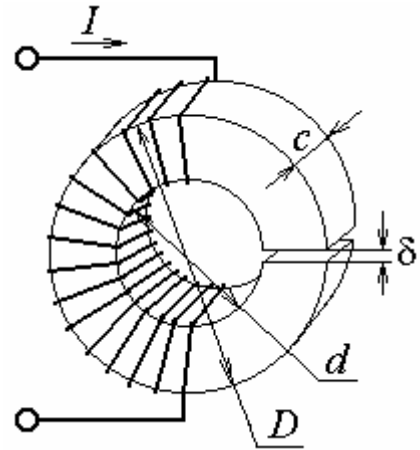


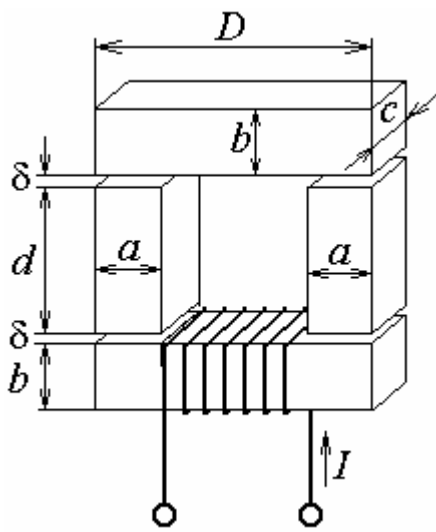
Рисунок 6.2



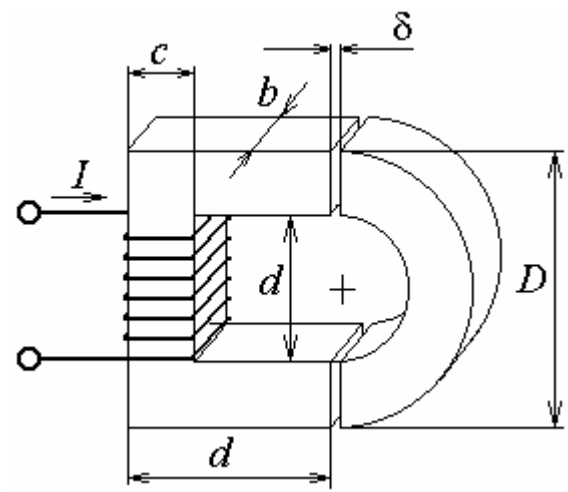
7



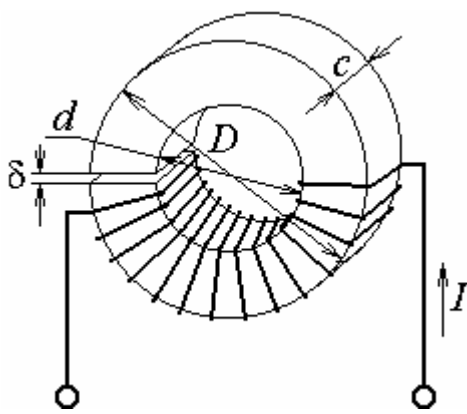
8



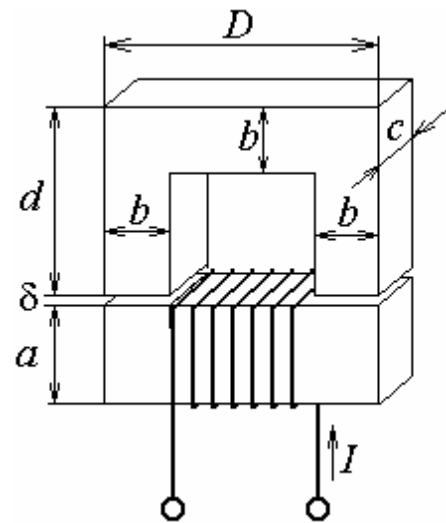
9



10



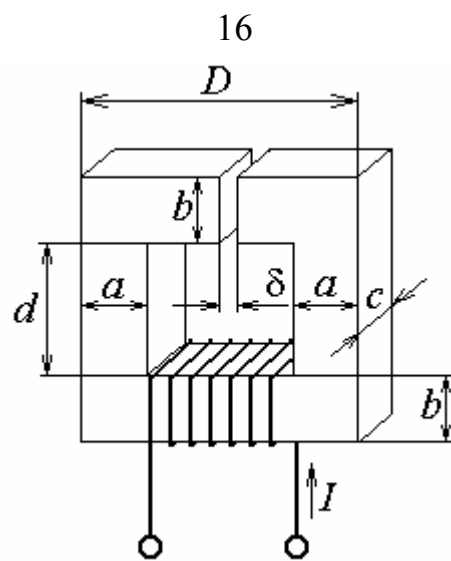
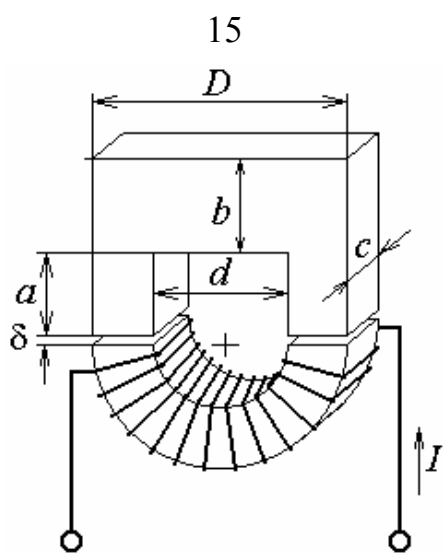
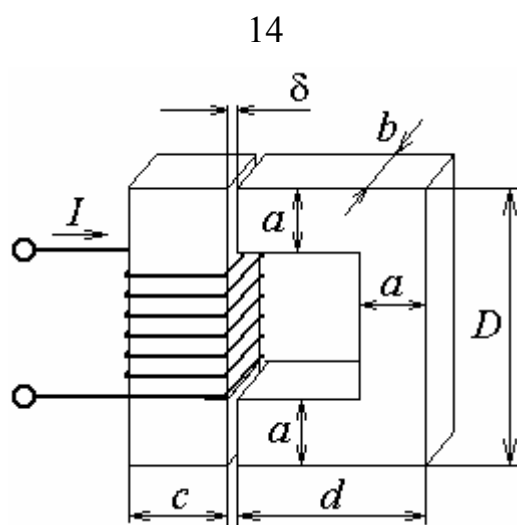
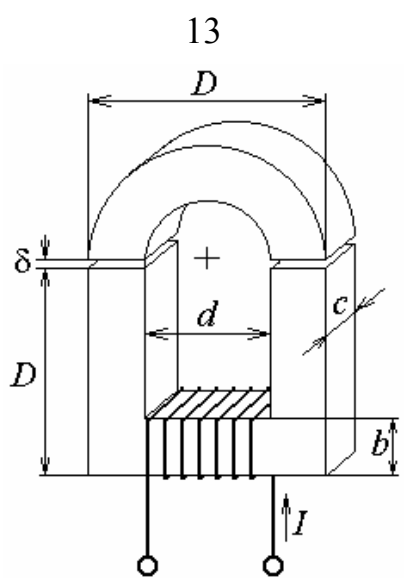
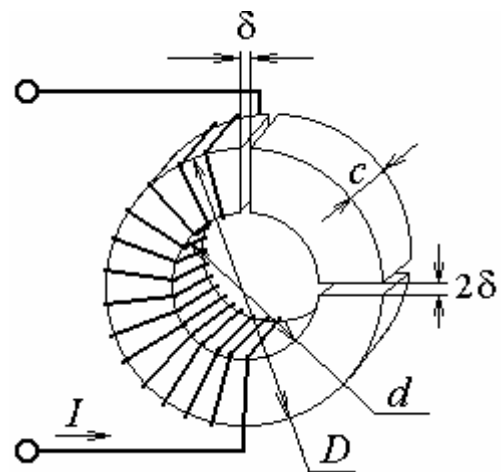
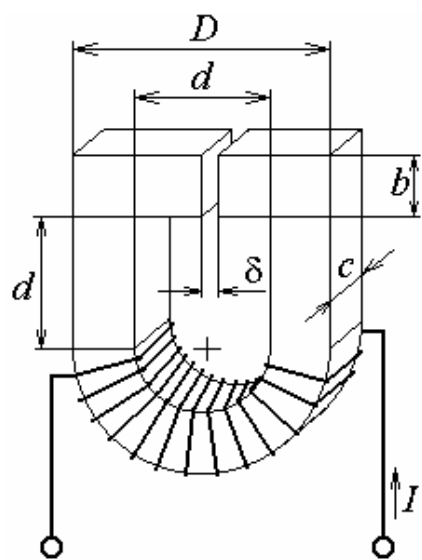
11



12

Рисунок 6.2 (продовження)





17

18

Рисунок 6.2 (продовження)

показує, у скільки разів магнітний потік на ділянці осердя з обмоткою більше, ніж в решті частини магнітопроводу.

Криві намагнічування сталей заданих марок зображені на рис. 2.2.

Для заданого варіанта магнітної системи треба визначити постійний струм  $I$  в обмотці, при якому в проміжку (або проміжках) магнітопроводу магнітна індукція  $B_k$  дорівнює заданій в табл. 6.2.

### Задача 3. Вантажопідйомні електромагніти та електромагніти реле

На рис. 6.3 показані варіанти вантажопідйомних електромагнітів та електромагнітів реле. Електромагніт – це пристрій, що складається з нерухомого сталевго осердя з котушкою і рухомого сталевго якоря, переміщення якого спричиняє або підйом вантажу, або перемикання замикаючих електричних контактів в реле. За відсутності струму в котушці електромагніта якір під дією сили тяжіння вантажу або пружини відділений від осердя повітряним зазором  $\delta$ . Якщо ж котушку підключити до джерела постійного струму під дією електромагнітної сили якір притягується до нерухомого осердя.

У табл. 6.3 дані геометричні розміри; кількість витків котушки; коефіцієнт жорсткості пружини –  $k$ ; маса вантажу –  $m$ ; марка сталі. Для заданого варіанта електромагніту визначити струм  $I$  в обмотці котушки, при якому починається переміщення якоря.

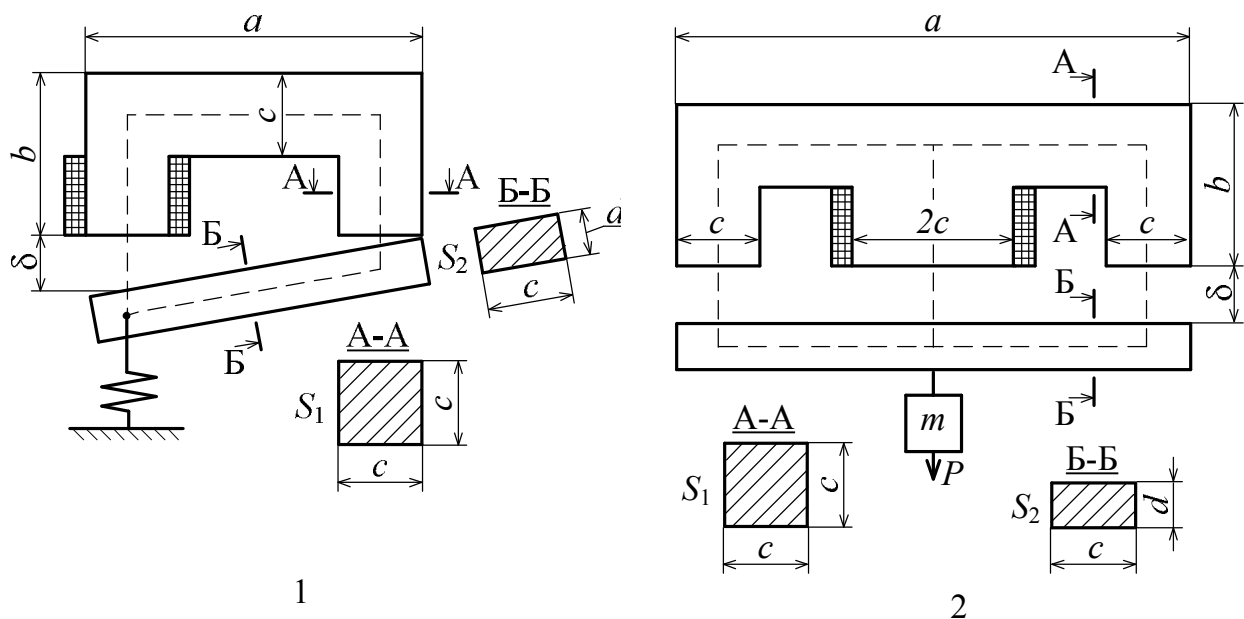
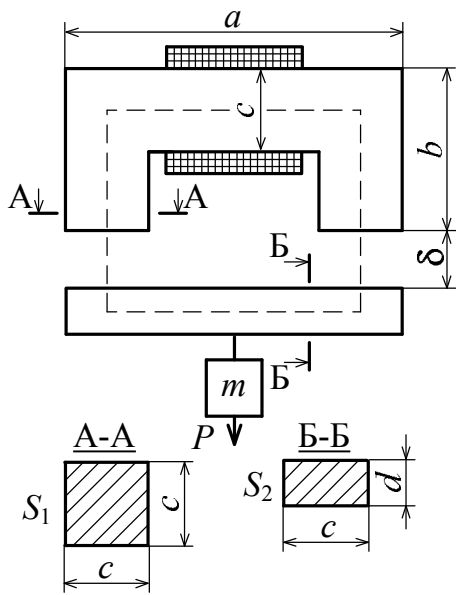
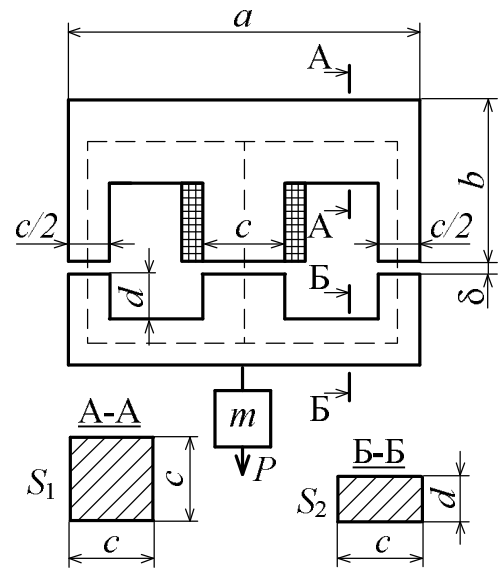


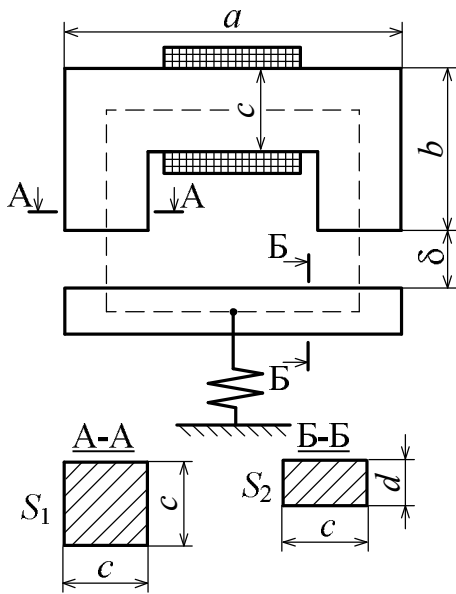
Рисунок 6.3



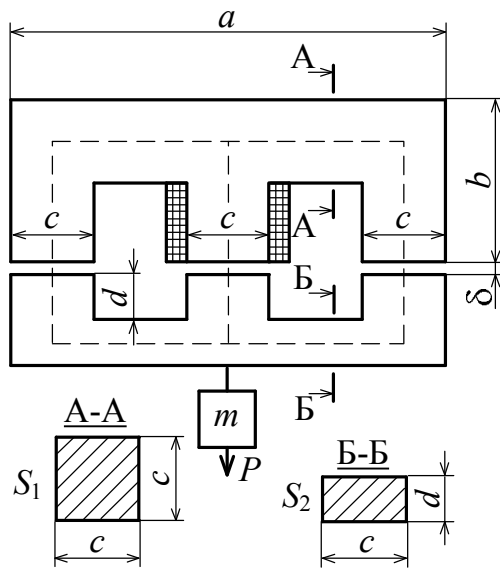
3



4

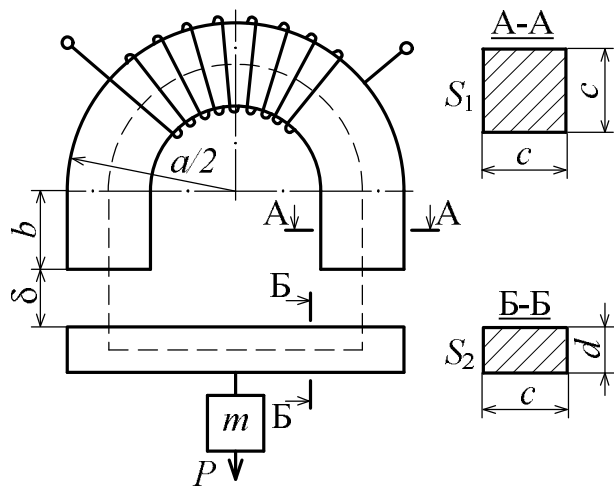


5

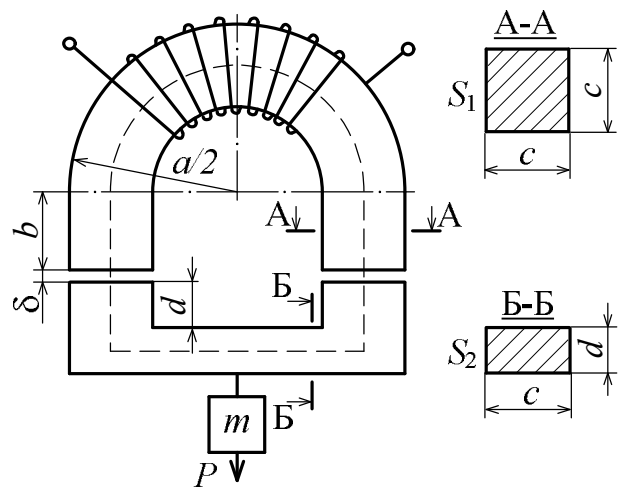


6

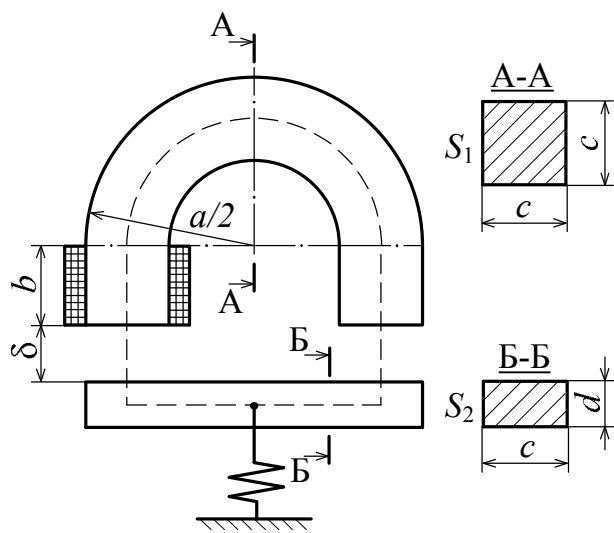
Рисунок 6.3 (продовження)



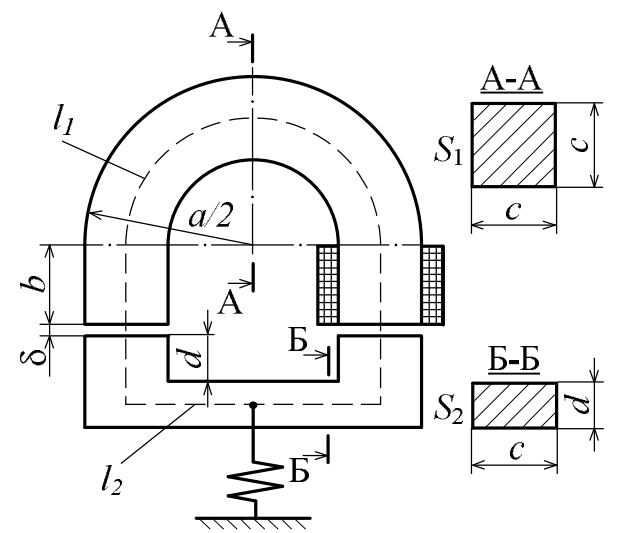
7



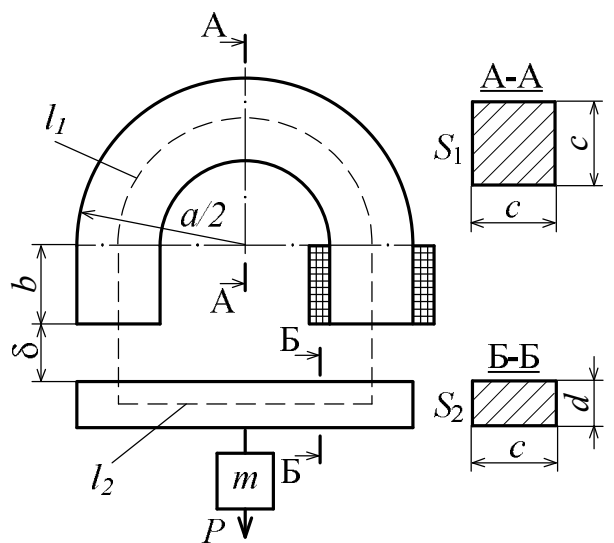
8



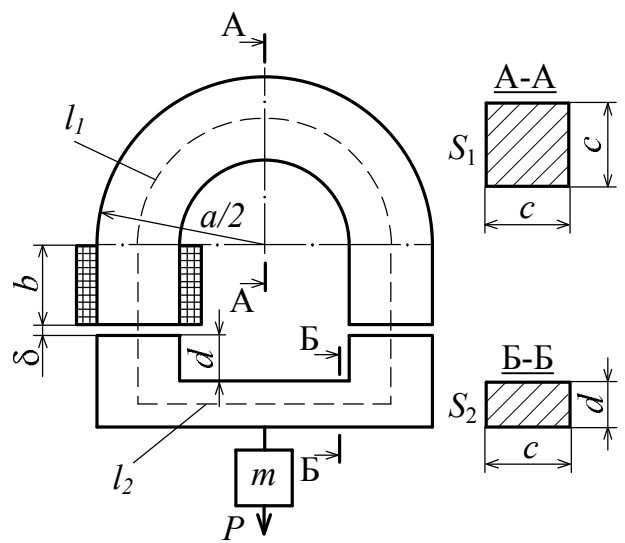
9



10



11



12

Рисунок 6.3 (продовження)

#### Задача 4. Дросель зі знімним ярком

Дросель з ярком, що знімається, являє собою котушку зі сталевим осердям, яка включена на синусоїдну напругу. Обмотка котушки з кількістю витків  $w_k$  мідного проводу намотана на шихтоване сталеве осердя, що виконане роз'ємним. Для визначення параметрів електричної схеми заміщення цього дроселя проведені два досліди при живленні його обмотки від мережі змінної напруги з частотою  $f = 50$  Гц через автотрансформатор  $T$  (рис. 6.4).

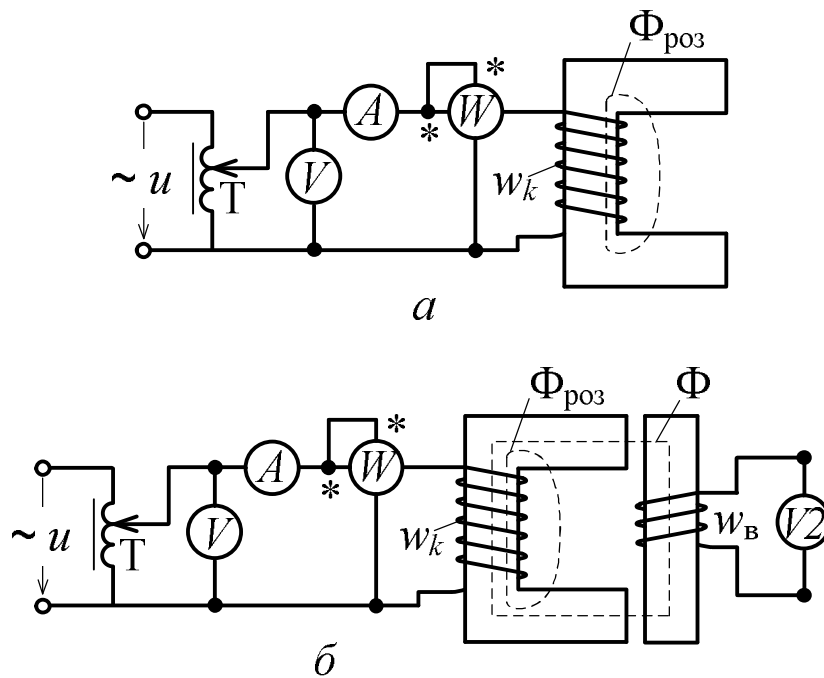


Рисунок 6.4

У першому досліді ярк був віддалений від основної частини осердя (рис. 6.4, *a*), так що можна вважати, що створювався тільки магнітний потік розсіювання  $\Phi_{\text{роз}}$ . Показаними на схемі приладами були виміряні діючі значення струму  $I_0$  і напруги  $U_0$ , а також активна потужність  $P_0$ .

У другому досліді ярк осердя був встановлений в основне положення (рис. 6.4, *б*) і тепер по осердю через ярк замикався ще й основний магнітний потік  $\Phi$ . На ярк була намотана вимірювальна котушка з кількістю витків  $w_B$ . Після подачі в основну обмотку струму  $I$  були виміряні активна потужність  $P$ , яка споживається дроселем, а також напруга  $U_B$  на затиска-

чах вимірювальної котушки.

Варіанти даних наведені в табл. 6.4.

Треба зобразити типову електричну схему заміщення дроселя і визначити параметри елементів цієї схеми. За цією схемою і заданим струмом  $I$  розрахувати діюче значення напруги  $U$  у другому досліді і побудувати векторну діаграму.

### Задача 5. Однофазний трансформатор

Фізична модель однофазного трансформатора, до вторинної обмотки якого підключене навантаження  $Z_H$ , показано на рис. 6.5, а. На рис. 6.5, б подане умовне позначення трансформатора Т.

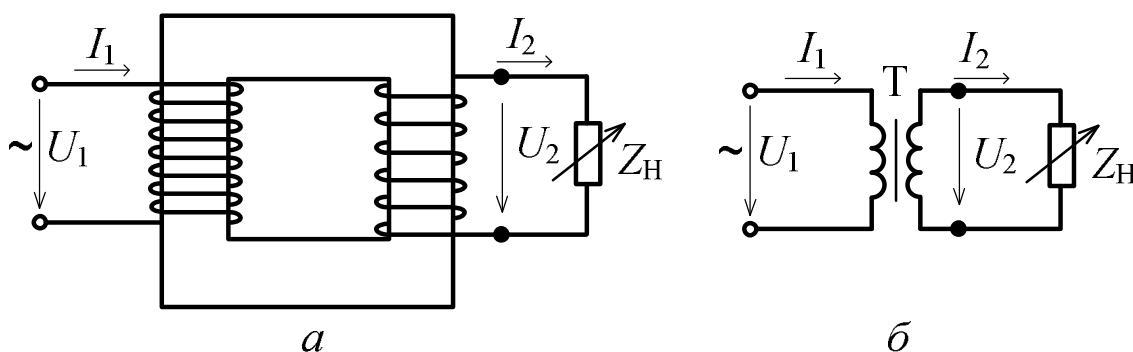


Рисунок 6.5

Варіанти паспортних даних однофазного трансформатора наведені в табл. 6.5. Вважаючи, що первинною обмоткою трансформатора буде обмотка вищої напруги (ВН), а вторинною – обмотка нижчої напруги (НН), для заданого варіанта треба визначити:

1) коефіцієнт трансформації;  
2) номінальні струми обмоток; струм неробочого ходу (НХ) і струм аварійного короткого замикання (КЗ) первинної обмотки;

3) залежність ККД від струму навантаження трансформатора (побудувати графік цієї залежності  $\eta(I_2)$  або  $\eta(\beta)$ , якщо  $\beta = I_2 / I_{2\text{ном}}$  – коефіцієнт навантаження, тобто відношення струму вторинної обмотки до його номінального значення;

4) залежність напруги на вихідних затискачах від струму наванта-

ження (побудувати цю залежність, яка зветься також зовнішньою характеристикою, у вигляді  $U_2(I_2)$  або  $U_2(\beta)$ ).

В табл. 6.5 позначені:  $S_{\text{ном}}$  – повна номінальна потужність;  $U_{\text{ВНном}}$ ,  $U_{\text{ННном}}$  – номінальні напруги обмоток ВН і НН;  $i_{\text{НХ}}$ ,  $P_0$  – струм і втрати потужності в режимі НХ;  $P_{\text{к}}$ ,  $u_{\text{к}}$  – втрати потужності і напруга в режимі дослідного КЗ ( $i_{\text{НХ}}$  і  $u_{\text{к}}$  подані в % від номінальних струму  $I_{\text{ном}}$  і напруги  $U_{\text{ном}}$  первинної обмотки, відповідно);  $\cos \varphi_{\text{н}}$  – коефіцієнт потужності навантаження, яке підключається до трансформатора.

### Задача 6. Двигун постійного струму з паралельним збудженням

Схема включення двигуна постійного струму з паралельним збудженням надана на рис. 6.6, а дані наведені в табл. 6.6, де позначені:  $P_{2\text{ном}}$ ,  $U_{\text{ном}}$ ,  $\eta_{\text{ном}}$ ,  $n_{\text{ном}}$  – номінальні потужність, напруга, ККД і частота обертання;  $R_{\text{я}}$  – опір кола обмотки якоря,  $R_{\text{з}}$  – опір обмотки збудження.

Для заданого варіанта даних треба виконати наступне.

1. Для номінального режиму роботи визначити струм  $I_{\text{ном}}$ , який споживається двигуном із мережі; струм збудження  $I_{\text{зном}}$ ; електромагнітну потужність  $P_{\text{ЕМном}}$ , ЕРС обмотки якоря  $E_{\text{ном}}$ .

2. Визначити опір  $R_{\text{р}}$  пускорегулювального реостата, який треба включити в коло якоря (рис. 6.6) для обмеження пускового струму якоря до  $I_{\text{япуск}} = 2,5I_{\text{яном}}$ , якщо двигун включається на номінальну напругу.

3. Знайти напругу живлення  $U'$ , яка забезпечить пусковий струм якоря на рівні  $I_{\text{япуск}} = 2,5I_{\text{яном}}$  без включення пускового реостата.

4. Визначити частоту обертання якоря  $n_0$  в режимі ідеального неробочого ходу.

5. Побудувати природну механічну характе-

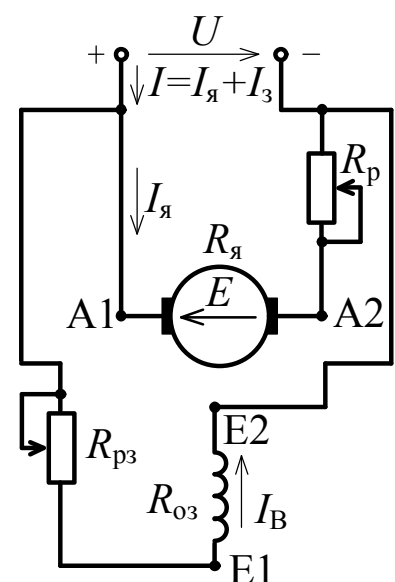


Рисунок 6.6

тику  $n(M)$ , де  $n$  – частота обертання якоря;  $M$  – його обертальний момент, при живленні двигуна номінальною напругою  $U_{\text{НОМ}}$ .

6. Визначити частоту обертання якоря при обертальному моменті  $M = 0,5 M_{\text{НОМ}}$ , де  $M_{\text{НОМ}}$  – номінальний обертальний момент, перевірити це, використовуючи побудовану за пунктом 5 механічну характеристику  $n(M)$ .

7. Побудувати штучну механічну характеристику  $n(M)$ , якщо в коло якоря включений пускорегулювальний реостат з опором  $R_p = 3R_a$  (рис. 6.6), а живильна напруга залишена номінальною.

### Задача 7. Двигун постійного струму з послідовним збудженням

Для двигуна постійного струму (ДПС) з послідовним збудженням схема ввімкнення подана на рис. 6.7, а дані – в табл. 6.7, де позначені:  $P_{2\text{НОМ}}$ ,  $U_{\text{НОМ}}$ ,  $n_{\text{НОМ}}$ ,  $\eta_{\text{НОМ}}$  – номінальні потужність, напруга, частота обертання і ККД;  $R_a$  – опір кола обмотки якоря з урахуванням обмотки збудження. Крива намагнічування ДПС  $\Phi(I)$  у відносних одиницях у вигляді  $k_\Phi(k_I)$  подана на рис. 6.8, де  $k_I = I/I_{\text{НОМ}}$  – кратність струму збудження (який одночасно є і струмом якоря);  $k_\Phi = \Phi/\Phi_{\text{НОМ}}$  – кратність магнітного потоку збудження ( $I_{\text{НОМ}}$ ,  $\Phi_{\text{НОМ}}$ ) – номінальні значення відповідних величин).

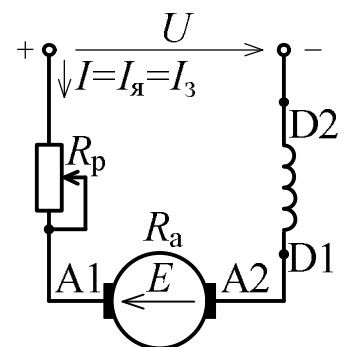


Рисунок 6.7

1. Для номінального режиму роботи визначити: потужність  $P_{1\text{НОМ}}$  і струм  $I_{\text{НОМ}}$ , що споживаються двигуном із мережі; втрати потужності  $\Delta P_{\text{НОМ}}$ ; ЕРС обмотки якоря  $E_{\text{НОМ}}$ ; обертальний електромагнітний момент  $M_{\text{НОМ}}$ ; корисний момент на валу двигуна  $M_{2\text{НОМ}}$ .

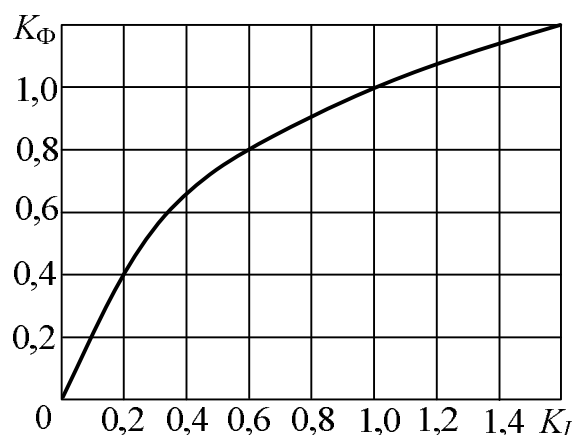


Рисунок 6.8

2. Побудувати природну механічну характеристику двигуна  $n(M)$ ,



де  $n$  – частота обертання якоря,  $M$  – обертальний момент якоря при живленні номінальною напругою  $U_{\text{ном}}$ .

3. Побудувати штучну механічну характеристику  $n(M)$ , якщо в коло якоря ввімкнений регулювальний реостат з опором  $R_p = 3R_a$  (рис. 6.7), а напруга збережена номінальною.

4. Використовуючи побудовані за пунктами 2 і 3 характеристики  $n(M)$ , визначити частоту обертання двигуна при зниженні обертального моменту на 40 %, а також при підвищенні його на 15 % порівняно з номінальним значенням за відсутності наявності регулювального реостата  $R_p$ .

5. Знайти частоту обертання якоря при забезпеченні номінального обертального моменту  $M_{\text{ном}}$ , але у разі зниження напруги живлення на 25 % порівняно з її номінальним значенням  $U_{\text{ном}}$ .

### Задача 8. Трифазний асинхронний двигун

Для трифазного асинхронного двигуна, що розрахований на номінальну напругу 220/380 В (фазна/лінійна) при частоті  $f = 50$  Гц, за його даними із табл. 6.8, де  $P_{2\text{ном}}$  – номінальна потужність;  $p$  – кількість пар полюсів;  $S_{\text{ном}}$  – номінальне ковзання;  $\lambda_M = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$  – перевантажувальна здатність щодо обертального моменту ( $M_{\text{max}}$ ,  $M_{\text{ном}}$  – максимальний і номінальний моменти);  $m_I = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$  – кратність пускового струму ( $I_{\text{пуск}}$ ,  $I_{\text{ном}}$  – пускове і номінальне значення струму, яке споживається із мережі);  $\cos\varphi_{1\text{ном}}$  – номінальний коефіцієнт потужності, а також за заданою схемою з'єднання обмотки статора (З – „зірка”, рис. 6.9, а; Т – „трикутник”, рис. 6.9, б):

1) обрати лінійну напругу трифазної мережі живлення  $U_1$  і визначити частоту обертання поля статора  $n_1$ ; номінальну  $n_{2\text{ном}}$  і критичну  $n_{\text{кр}}$  частоти обертання ротора;

2) визначити потужність, яка споживається двигуном із мережі  $P_{\text{ном}}$ ; номінальний  $I_{\text{ном}}$  і пусковий  $I_{\text{пуск}}$  струми двигуна; номінальний  $M_{\text{ном}}$  і максимальний  $M_{\text{мах}}$  обертальні моменти двигуна;

3) за заданою напругою мережі  $U_1$  розрахувати і побудувати залежність  $M(S)$ , де  $M, S$  – обертальний момент і ковзання ротора, і звідти визначити пусковий обертальний момент двигуна  $M_{\text{пуск}}$  і кратність цього моменту  $k_{\text{пуск}} = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$ ;

4) розрахувати і побудувати в одній координатній системі три механічні характеристики – залежності  $n_2(M)$ , де  $n_2$  – частота обертання ротора, при таких умовах:

а) природну характеристику за заданою напругою мережі  $U_M$  (як в пункті 3), і по ній визначити діапазон частоти обертання ротора, у якому відбувається стабільна робота двигуна;

б) штучну характеристику за зниженою напругою мережі живлення на 10%, тобто при  $U'_M = 0,9U_M$  (підказка – тут треба змінити відповідно максимальний обертальний момент  $M_{\text{мах}}$ , а у решті діяти як в пункті а);

в) штучну характеристику – за вихідним значенням напруги мережі живлення  $U_M$ , але нібито у фази обмотки ротора включений трифазний регульовальний реостат з фазним опором  $R_p$  (рис.6.10), так що сумарний активний опір в кожній фазі обмотки ротора став удвічі більше, ніж в машині з вихідними даними, тобто  $R'_2 = 2R_2$ , а індуктивний опір фаз обмотки ротора  $X_{20}$  не змінився (підказка – тут треба відповідно змінити критичне ковзання  $s_{\text{кр}}$ , а у решті діяти як в пункті а).

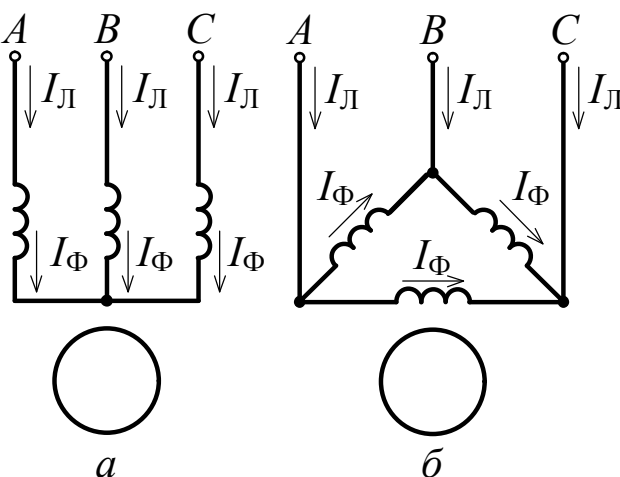


Рисунок 6.9

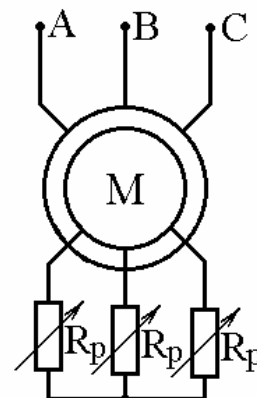


Рис.6.10

Таблиця 6.1 – Варіанти параметрів котушки зі сталевим осердям

№ варіанта	Варіант за рис.6.1	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Струм, А
		$D$	$d$	$d_s$	$a$	$b$	$c$				
1	1	100	–	–	10	–	10	500	1512	0,95	1,5
2	1	150	–	–	20	–	20	800	Ст.2	0,96	1,6
3	1	200	–	–	20	–	25	1000	Ст.2	0,99	1,7
4	1	80	–	–	5	–	15	2000	1211	1	1,8
5	2	100	80	–	–	–	10	1000	1211	0,93	1,9
6	2	150	100	–	–	–	20	2000	Ст.2	0,94	1,8
7	2	200	150	–	–	–	30	3000	Ст.2	0,96	1,9
8	2	180	150	–	–	–	25	5000	1512	0,97	1,5
9	3	100	80	20	–	–	–	1000	Ст.2	1	1,8
10	3	80	60	20	–	–	–	2000	1512	0,94	1,8
11	3	120	100	20	–	–	–	800	1512	0,99	1,9
12	3	150	130	20	–	–	–	600	1211	0,98	1,5
13	4	150	110	–	20	100	20	500	Ст.2	0,94	1,6
14	4	200	180	–	10	150	15	800	Ст.2	0,95	1,7
15	4	250	200	–	25	80	10	1100	Ст.2	0,98	1,8
16	4	180	150	–	15	120	24	1500	1512	1	1,9
17	5	120	100	–	10	–	15	800	1211	0,96	2
18	5	160	120	–	20	–	18	1100	Ст.2	0,93	1,9
19	5	100	80	–	10	–	16	700	Ст.2	0,97	1,8
20	5	150	100	–	25	–	26	600	1512	0,99	1,7
21	6	80	–	–	5	150	25	600	1512	0,98	1,8
22	6	120	–	–	20	180	13	800	Ст.2	0,95	1,9
23	6	100	–	–	15	200	24	1200	1512	0,99	1,8
24	6	90	–	–	10	140	21	2000	Ст.2	1	1,9
25	7	90	70	–	10	50	30	900	Ст.2	0,93	1,8
26	7	100	60	–	20	60	21	1200	1211	0,94	2,2
27	7	120	80	–	20	80	26	2000	1211	0,99	2,1
28	7	140	90	–	25	75	20	1500	1512	0,98	2,5
29	8	200	–	–	20	80	10	1000	Ст.2	0,94	1,9
30	8	180	–	–	10	60	15	1500	Ст.2	0,98	1,8
31	8	150	–	–	5	50	20	2000	1211	0,97	1,8
32	8	210	–	–	15	70	25	3000	1512	0,93	1,9
33	1	125	–	–	12	–	15	600	Ст.2	0,91	2,5
34	1	160	–	–	10	–	20	1000	1512	0,93	2,4

Таблиця 6.1 – Варіанти параметрів котушки зі сталевим осердям

№ варіанта	Варіант за рис.6.1	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Струм, А
		$D$	$d$	$d_s$	$a$	$b$	$c$				
1	1	100	–	–	10	–	10	500	1512	0,95	1,5
2	1	150	–	–	20	–	20	800	Ст.2	0,96	1,6
3	1	200	–	–	20	–	25	1000	Ст.2	0,99	1,7
4	1	80	–	–	5	–	15	2000	1211	1	1,8
5	2	100	80	–	–	–	10	1000	1211	0,93	1,9
6	2	150	100	–	–	–	20	2000	Ст.2	0,94	1,8
7	2	200	150	–	–	–	30	3000	Ст.2	0,96	1,9
8	2	180	150	–	–	–	25	5000	1512	0,97	1,5
9	3	100	80	20	–	–	–	1000	Ст.2	1	1,8
10	3	80	60	20	–	–	–	2000	1512	0,94	1,8
11	3	120	100	20	–	–	–	800	1512	0,99	1,9
12	3	150	130	20	–	–	–	600	1211	0,98	1,5
13	4	150	110	–	20	100	20	500	Ст.2	0,94	1,6
14	4	200	180	–	10	150	15	800	Ст.2	0,95	1,7
15	4	250	200	–	25	80	10	1100	Ст.2	0,98	1,8
16	4	180	150	–	15	120	24	1500	1512	1	1,9
17	5	120	100	–	10	–	15	800	1211	0,96	2
18	5	160	120	–	20	–	18	1100	Ст.2	0,93	1,9
19	5	100	80	–	10	–	16	700	Ст.2	0,97	1,8
20	5	150	100	–	25	–	26	600	1512	0,99	1,7
21	6	80	–	–	5	150	25	600	1512	0,98	1,8
22	6	120	–	–	20	180	13	800	Ст.2	0,95	1,9
23	6	100	–	–	15	200	24	1200	1512	0,99	1,8
24	6	90	–	–	10	140	21	2000	Ст.2	1	1,9
25	7	90	70	–	10	50	30	900	Ст.2	0,93	1,8
26	7	100	60	–	20	60	21	1200	1211	0,94	2,2
27	7	120	80	–	20	80	26	2000	1211	0,99	2,1
28	7	140	90	–	25	75	20	1500	1512	0,98	2,5
29	8	200	–	–	20	80	10	1000	Ст.2	0,94	1,9
30	8	180	–	–	10	60	15	1500	Ст.2	0,98	1,8
31	8	150	–	–	5	50	20	2000	1211	0,97	1,8
32	8	210	–	–	15	70	25	3000	1512	0,93	1,9
33	1	125	–	–	12	–	15	600	Ст.2	0,91	2,5
34	1	160	–	–	10	–	20	1000	1512	0,93	2,4

Продовження таблиці 6.1

№ варіанта	Варіант за рис.6.1	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Струм, А
		$D$	$d$	$d_s$	$a$	$b$	$c$				
35	1	180	–	–	15	–	12	2000	1211	0,96	1,5
36	1	210	–	–	10	–	10	1500	Ст.2	0,97	2
37	2	110	90	–	–	–	5	1500	1512	0,93	1,7
36	2	115	92	–	–	–	10	1200	1211	0,96	1,8
39	2	130	95	–	–	–	25	1800	Ст.2	0,94	1,9
40	2	120	100	–	–	–	15	2000	1211	0,97	2
41	3	110	90	20	–	–	–	1200	1512	0,94	2,1
42	3	125	95	30	–	–	–	1500	1211	0,95	2,2
43	3	130	110	20	–	–	–	600	1211	0,96	2,3
44	3	140	110	20	–	–	–	700	Ст.2	0,98	2,5
45	4	110	90	–	10	80	10	1000	1512	0,95	1,8
46	4	160	120	–	20	100	20	1200	1512	0,93	2
47	4	120	100	–	20	100	10	1500	Ст.2	0,96	1,7
48	4	140	110	–	15	150	15	800	Ст.2	0,99	2,5
49	5	110	90	–	10	–	10	1100	Ст.2	0,94	1,9
50	5	130	100	–	15	–	20	1500	Ст.2	0,95	2
51	5	140	110	–	15	–	20	2000	1211	0,96	1,9
52	5	125	105	–	10	–	10	2500	1211	0,98	1,8
53	6	110	–	–	10	200	10	2000	1211	0,99	1,7
54	6	130	–	–	15	160	15	2500	1512	0,06	1,6
55	6	160	–	–	20	220	20	3000	1512	0,93	1,5
56	6	140	–	–	20	200	20	1000	1512	0,94	2
57	7	110	80	–	15	50	10	1500	1512	0,96	2,3
58	7	130	100	–	15	70	20	2000	1211	0,93	2,2
59	7	130	100	–	15	70	10	3000	Ст.2	0,99	1,5
60	7	150	110	–	20	90	30	1800	Ст.2	0,94	1,8
61	8	220	–	–	10	80	20	1800	Ст.2	0,93	1,7
62	8	160	–	–	5	40	10	1500	Ст.2	0,95	1,6
63	8	180	–	–	5	50	10	2000	1211	0,97	1,7
64	8	200	–	–	10	60	20	2500	1211	0,94	1,6
65	1	110	–	–	11	–	10	600	Ст.2	0,99	1,5
66	1	120	–	–	12	–	20	800	1512	0,98	2,4
67	1	130	–	–	13	–	30	1000	1211	0,97	2
68	1	140	–	–	14	–	40	1200	Ст.2	0,96	1,7
69	2	150	120	–	–	–	20	1500	1512	0,95	1,8
70	2	160	130	–	–	–	25	1600	1211	0,94	1,9

Продовження таблиці 6.1

№ варіанта	Варіант за рис.6.1	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Струм, А
		$D$	$d$	$d_s$	$a$	$b$	$c$				
71	2	170	140	–	–	–	30	1700	1211	0,93	2
72	2	180	150	–	–	–	35	1800	1512	0,96	2,1
73	3	120	90	30	–	–	–	2000	Ст.2	0,95	2
74	3	160	100	60	–	–	–	2500	Ст.2	0,96	1,8
75	3	180	150	30	–	–	–	3000	1512	0,97	1,4
76	3	200	160	40	–	–	–	1500	1211	0,98	2
77	4	125	95	–	15	100	15	2000	1512	0,95	2
78	4	135	105	–	15	110	15	2500	1512	0,94	2
79	4	145	105	–	20	120	20	3000	1211	0,93	1,5
80	4	155	125	–	15	120	20	1500	1211	0,99	1,5
81	5	120	90	–	15	–	5	3000	Ст.2	0,98	1,9
82	5	125	95	–	15	–	10	3000	Ст.2	0,96	1,5
83	5	125	105	–	10	–	15	2500	1512	0,94	1,5
84	5	135	115	–	10	–	20	2000	1211	0,94	1,8
85	6	120	–	–	15	165	15	1500	Ст.2	0,93	1,7
86	6	125	–	–	15	170	20	1700	1512	0,94	2
87	6	135	–	–	20	180	10	1200	1211	0,96	2,1
88	6	145	–	–	20	180	10	1000	Ст.2	0,95	2,4
89	7	115	85	–	15	60	15	1500	1211	0,96	2,5
90	7	120	90	–	15	65	20	800	1512	0,97	2,3
91	7	125	95	–	15	70	25	700	Ст.2	0,98	2,4
92	7	130	100	–	15	75	30	1500	Ст.2	0,99	2,5
93	8	140	–	–	15	60	10	600	Ст.2	0,98	2,1
94	8	160	–	–	10	60	10	800	Ст.2	0,97	2,4
95	8	170	–	–	5	50	15	1000	1211	0,96	2,2
96	8	190	–	–	10	60	15	1200	1512	0,95	2,2
97	8	200	–	–	15	80	20	1500	1512	0,93	2,3
98	8	200	–	–	20	80	20	2000	Ст.2	0,95	2,4
99	8	150	–	–	10	40	15	1500	1512	0,97	1,7
100	8	130	–	–	5	40	15	1000	1211	1	2
101	1	100	–	–	10	–	10	500	1512	0,98	1,5
102	1	150	–	–	20	–	20	800	1211	0,96	1,6
103	1	200	–	–	20	–	25	1000	1211	0,99	1,7
104	1	80	–	–	5	–	15	2000	Ст.2	1	1,8
105	2	100	80	–	–	–	10	1000	Ст.2	0,93	1,9

Таблиця 6.2 – Варіанти параметрів котушки зі сталевим осердям

№ варіанта	Варіант за рис.6.2	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Коеф. розсіяння	Індукція в проміжку, Тл	Коеф. струму
		$D$	$d$	$a$	$b$	$c$	$\delta$						
1	1	110	70	15	16	18	2,0	1000	1512	0,96	1,10	1,10	1,1
2	4	84	54	15	12	14	1,5	1500	Ст.2	1,00	1,15	1,05	1,2
3	11	131	85	18	13	22	3,3	1200	1211	0,93	1,20	1,25	1,3
4	18	157	103	27	29	26	2,7	750	1512	0,95	1,05	1,15	1,4
5	10	206	136	35	38	34	3,5	500	Ст.2	1,00	1,25	1,35	1,5
6	3	108	72	19	20	18	1,8	3000	1211	0,94	1,10	1,40	1,1
7	15	195	131	32	36	32	3,2	600	1512	0,96	1,15	1,45	1,2
8	5	155	105	25	26	24	2,5	1300	Ст.2	1,00	1,20	1,30	1,3
9	7	189	129	30	32	29	3,0	1000	1211	0,93	1,05	1,05	1,4
10	2	83	57	12	14	13	1,3	1500	1512	0,95	1,25	1,30	1,5
11	6	85	70	20	18	19	2,0	1200	Ст.2	1,00	1,10	1,15	1,1
12	7	84	54	15	16	14	1,5	750	1211	0,94	1,15	1,35	1,2
13	2	131	85	20	26	22	2,3	500	1512	0,96	1,20	1,25	1,3
14	7	157	103	27	30	26	2,7	3000	Ст.2	1,00	1,05	1,45	1,4
15	1	206	136	30	28	33	2,5	600	1211	0,93	1,25	1,30	1,5
16	8	108	72	15	16	17	1,8	1300	1512	0,95	1,10	1,40	1,1
17	13	195	131	30	35	31	3,2	1000	Ст.2	1,00	1,15	1,30	1,2
18	9	155	140	25	27	24	2,5	1500	1211	0,94	1,20	1,15	1,3
19	6	110	129	30	25	30	3,0	1200	1512	0,96	1,05	1,05	1,4
20	8	83	57	12	10	13	1,3	750	Ст.2	1,00	1,25	1,25	1,5
21	4	110	70	20	15	19	2,0	500	1211	0,93	1,10	1,45	1,1
22	12	84	54	16	14	14	1,5	3000	1512	0,95	1,15	1,35	1,2
23	9	131	121	15	25	21	2,3	600	Ст.2	1,00	1,20	1,40	1,3
24	16	80	62	15	15	16	1,4	750	1512	0,95	1,15	1,15	1,2
25	14	206	136	38	36	33	0,7	1000	1512	0,96	1,25	1,10	1,5
26	2	108	72	15	20	17	1,8	1500	Ст.2	1,00	1,10	1,05	1,1
27	9	195	150	32	36	31	3,2	1200	1211	0,93	1,15	1,25	1,2

Продовження таблиці 6.2

№ варіанта	Варіант за рис.6.2	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Коеф. розсіяння	Індукція в проміжку, Тл	Коеф. струму
		$D$	$d$	$a$	$b$	$c$	$\delta$						
28	2	155	105	22	28	25	1,5	750	1512	0,95	1,20	1,15	1,3
29	15	189	129	30	32	29	3,0	500	Ст.2	1,00	1,05	1,35	1,4
30	7	83	57	13	14	13	1,3	3000	1211	0,94	1,25	1,40	1,5
31	12	110	70	22	20	18	2,0	600	1512	0,96	1,10	1,45	1,1
32	3	84	54	15	16	14	1,5	1300	Ст.2	1,00	1,15	1,30	1,2
33	10	131	85	21	25	22	2,3	1000	1211	0,93	1,20	1,05	1,3
34	1	157	103	30	25	26	2,7	1500	1512	0,95	1,05	1,30	1,4
35	17	206	136	35	29	34	3,5	1200	Ст.2	1,00	1,25	1,15	1,5
36	6	100	72	18	15	17	1,8	750	1211	0,94	1,10	1,35	1,1
37	11	195	131	35	28	31	3,2	500	1512	0,96	1,15	1,25	1,2
38	4	155	105	25	26	24	2,5	3000	Ст.2	1,00	1,20	1,45	1,3
39	12	189	129	33	30	29	3,0	600	1211	0,93	1,05	1,30	1,4
40	17	83	57	16	14	13	1,3	1300	1512	0,95	1,25	1,40	1,5
41	12	110	70	25	20	19	2,0	1000	Ст.2	1,00	1,10	1,30	1,1
42	3	84	54	12	17	14	1,5	1500	1211	0,94	1,15	1,15	1,2
43	10	131	85	23	24	21	2,3	1200	1512	0,96	1,20	1,05	1,3
44	4	157	103	27	30	25	2,7	750	Ст.2	1,00	1,05	1,25	1,4
45	18	206	136	35	38	33	3,5	500	1211	0,93	1,25	1,45	1,5
46	5	108	72	18	20	17	1,8	3000	1512	0,95	1,10	1,35	1,1
47	13	195	131	28	35	31	3,2	600	Ст.2	1,00	1,15	1,40	1,2
48	10	155	105	25	28	25	2,5	1300	1211	0,94	1,20	1,50	1,3
49	8	189	129	36	29	30	3,0	1000	1512	0,96	1,05	1,10	1,4
50	6	70	58	13	15	13	1,3	1500	Ст.2	1,00	1,25	1,05	1,5
51	7	110	70	20	21	18	2,0	1200	1211	0,93	1,10	1,25	1,1
52	16	84	54	15	16	14	1,5	750	1512	0,95	1,15	1,15	1,2
53	1	131	85	17	19	22	1,3	500	Ст.2	1,00	1,20	1,35	1,3
54	5	157	103	27	30	26	2,7	3000	1211	0,94	1,05	1,40	1,4



Продовження таблиці 6.2

№ варіанта	Варіант за рис. 6.2	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Коеф. розсіяння	Індукція в проміжку, Тл	Коеф. струму
		$D$	$d$	$a$	$b$	$c$	$\delta$						
55	12	206	136	35	28	34	3,5	600	1512	0,96	1,25	1,45	1,5
56	13	108	72	18	20	18	1,8	1300	Ст.2	1,00	1,10	1,30	1,1
57	2	195	131	30	34	30	3,2	1000	1211	0,93	1,15	1,05	1,2
58	8	155	105	27	26	24	2,5	1500	1512	0,95	1,20	1,30	1,3
59	15	189	129	30	32	29	3,0	1200	Ст.2	1,00	1,05	1,15	1,4
60	10	83	57	13	14	13	1,3	750	1211	0,94	1,25	1,35	1,5
61	3	110	70	19	22	19	2,0	500	1512	0,96	1,10	1,25	1,1
62	1	84	54	15	18	14	1,5	3000	Ст.2	1,00	1,15	1,45	1,2
63	14	131	85	18	20	22	1,1	600	1211	0,93	1,20	1,30	1,3
64	6	95	103	27	22	25	2,7	1300	1512	0,95	1,05	1,40	1,4
65	18	206	186	35	37	33	3,5	1000	Ст.2	1,00	1,25	1,30	1,5
66	9	108	89	18	19	17	1,8	1500	1211	0,94	1,10	1,15	1,1
67	5	195	131	32	35	31	3,2	1200	1512	0,96	1,15	1,05	1,2
68	13	155	105	22	28	25	2,5	750	Ст.2	1,00	1,20	1,25	1,3
69	18	189	129	30	33	30	3,0	500	1211	0,93	1,05	1,45	1,4
70	7	83	57	13	15	13	1,3	3000	1512	0,95	1,25	1,35	1,5
71	2	110	70	17	21	18	2,0	600	Ст.2	1,00	1,10	1,40	1,1
72	4	84	54	15	16	14	1,5	1300	1211	0,94	1,15	1,50	1,2
73	12	131	85	33	25	22	2,3	1000	1512	0,96	1,20	1,10	1,3
74	13	157	103	30	29	26	2,7	1500	Ст.2	1,00	1,05	1,05	1,4
75	4	206	156	35	30	34	3,5	1200	1211	0,93	1,25	1,25	1,5
76	15	130	85	20	25	20	2,2	750	1211	0,93	1,20	1,45	1,3
77	9	195	150	32	36	32	3,2	500	Ст.2	1,00	1,15	1,35	1,2
78	5	155	105	25	26	24	2,5	3000	1211	0,94	1,20	1,40	1,3
79	13	189	129	30	32	29	3,0	600	1512	0,96	1,05	1,45	1,4
80	8	83	57	10	12	13	3,3	1300	Ст.2	1,00	1,25	1,30	1,5

Продовження таблиці 6.2

№ варіанта	Варіант за рис. 6.2	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Коеф. розсіяння	Індукція в проміжку, Тл	Коеф. струму
		$D$	$d$	$a$	$b$	$c$	$\delta$						
81	11	110	70	15	20	19	2,0	1000	1211	0,93	1,10	1,05	1,1
82	14	84	54	10	12	14	1,0	1500	1512	0,95	1,15	1,30	1,2
83	16	150	122	30	20	25	2,0	1400	Ст.2	1,00	1,20	1,05	1,3
84	10	157	103	27	30	26	2,7	750	1211	0,94	1,05	1,35	1,4
85	18	206	136	35	37	33	3,5	500	1512	0,96	1,25	1,25	1,5
86	10	108	72	18	19	17	1,8	3000	Ст.2	1,00	1,10	1,45	1,1
87	13	195	131	27	35	31	3,2	600	1211	0,93	1,15	1,30	1,2
88	18	155	105	25	27	24	2,5	1300	1512	0,95	1,20	1,40	1,3
89	7	189	129	32	38	30	2,0	1000	Ст.2	1,00	1,05	1,30	1,4
90	17	83	57	13	14	13	1,3	1500	1211	0,94	1,25	1,15	1,5
91	3	110	70	16	22	19	2,0	1200	1512	0,96	1,10	1,05	1,1
92	8	84	54	10	12	14	3,5	750	Ст.2	1,00	1,15	1,25	1,2
93	15	131	85	20	25	21	2,3	500	1211	0,93	1,20	1,45	1,3
94	12	157	103	27	20	25	2,7	3000	1512	0,95	1,05	1,35	1,4
95	1	206	136	35	36	33	3,5	600	Ст.2	1,00	1,25	1,40	1,5
96	4	108	72	18	20	17	1,8	1300	1211	0,94	1,10	1,50	1,1
97	16	155	125	35	28	25	2,5	1500	Ст.2	1,00	1,20	1,05	1,3
98	7	189	129	30	32	29	2,0	1200	1211	0,93	1,05	1,25	1,4
99	12	131	85	33	25	22	2,3	1000	1512	0,96	1,20	1,10	1,3
100	8	83	57	12	14	13	3,3	1300	Ст.2	1,00	1,25	1,30	1,5
101	11	110	70	15	13	19	2,0	1000	1211	0,93	1,10	1,05	1,1
102	2	131	85	20	26	22	2,3	1200	Ст.2	1,00	1,20	1,15	1,3
103	13	195	131	29	35	31	3,2	600	1211	0,93	1,15	1,30	1,2
104	10	131	105	23	25	22	2,3	1000	1211	0,93	1,20	1,05	1,3
105	16	145	120	22	20	24	2,1	1600	Ст.2	1,00	1,20	1,05	1,3

Таблиця 6.3 – Варіанти параметрів вантажопідйомних електромагнітів та електромагнітів реле

№ варіанта	Варіанта за рис. 6.3	Розміри осердя, мм					Кількість витків	Марка сталі	Коеф. жорсткості, Н/м	Маса, кг
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$\delta$				
1	1	100	50	20	15	10	2000	1211	10 <sup>4</sup>	–
2	1	150	70	10	10	15	1500	1512	10 <sup>4</sup>	–
3	2	120	60	30	10	10	1800	Ст.2	–	3
4	2	150	80	20	10	5	1800	1211	–	1,5
5	3	100	40	20	10	5	1500	1512	–	2
6	3	120	60	20	10	10	2000	Ст.2	–	2,5
7	4	180	50	25	5	5	2000	Ст.2	–	1
8	4	200	80	30	10	15	1800	1211	–	1,8
9	5	100	30	10	10	5	1500	1211	10 <sup>4</sup>	–
10	5	150	30	10	10	8	1500	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
11	6	160	40	10	15	12	2000	1512	–	4,5
12	6	140	40	20	10	14	1500	Ст.2	–	3,5
13	7	180	60	20	10	5	2000	Ст.2	–	2,5
14	7	220	90	40	10	5	1500	1211	–	1,6
15	8	200	40	20	5	2	2000	1211	–	1
16	8	200	80	40	10	10	1000	1512	–	3
17	9	240	60	20	5	10	2000	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
18	9	200	60	10	5	15	1500	1512	10 <sup>4</sup>	–
19	10	260	50	20	10	10	1500	1512	10 <sup>4</sup>	–
20	10	220	40	20	20	10	2000	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
21	11	300	80	10	20	10	2000	Ст.2	–	4
22	11	320	60	20	10	10	2000	Ст.2	–	2,5
23	12	260	60	10	10	5	1500	1211	–	3,5
24	12	280	50	20	10	4	1000	Ст.2	–	1,5
25	1	120	40	15	10	10	2000	1512	10 <sup>4</sup>	–
26	1	140	60	15	15	10	1500	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
27	2	140	80	10	15	5	1200	1211	–	2,5
28	2	120	70	20	20	5	1200	1512	–	1,5
29	3	110	30	30	10	4	1500	Ст.2	–	2
30	3	160	70	30	15	6	1800	Ст.2	–	1,5
31	4	150	40	10	6	4	1000	1211	–	1,5
32	4	160	40	30	15	4	1000	1512	–	2,5
33	5	110	15	10	10	5	1500	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–

Продовження таблиці 6.3

№ варіанта	Варіанта за рис.6.3	Розміри осердя, мм					Кількість витків	Марка сталі	Коеф. жорсткості, Н/м	Маса, кг
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$\delta$				
34	5	130	20	20	10	10	2000	1211	10 <sup>4</sup>	-
35	6	120	30	15	10	5	1500	1512	–	1
36	6	130	50	25	20	5	1200	Ст.2	–	1,5
37	7	160	40	20	30	10	1500	1211	–	2,5
38	7	160	60	10	10	5	1500	1512	–	1,5
39	8	180	50	10	5	10	2000	Ст.2	–	2
40	8	160	40	20	10	10	1000	1512	–	2
41	9	200	30	10	10	5	1000	1512	10 <sup>4</sup>	–
42	9	220	40	15	20	10	1500	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
43	10	240	60	15	10	5	1500	1211	10 <sup>4</sup>	–
44	10	230	25	25	15	10	2000	1512	10 <sup>4</sup>	–
45	11	250	60	20	20	5	1500	1512	–	1
46	11	270	80	10	10	10	2000	1211	–	2
47	12	200	40	10	10	10	2000	Ст.2	–	2,4
48	12	250	60	20	20	5	1500	1211	–	1,2
49	1	110	50	45	20	5	1800	1512	10 <sup>4</sup>	–
50	1	130	80	20	25	4	1500	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
51	2	140	40	20	12	6	2000	1211	–	2
52	2	180	60	35	16	3	1200	Ст.2	–	1,5
53	3	135	40	18	8	4	1500	1512	–	1,5
54	3	155	65	24	16	6	1800	1211	–	2
55	4	170	50	20	14	12	1800	1211	–	2,5
56	4	120	65	40	12	14	2000	Ст.2	–	2,5
57	5	120	18	10	18	4	1200	1512	10 <sup>4</sup>	–
58	5	140	24	20	12	12	2000	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
59	6	110	44	25	10	10	1700	1211	–	1,5
60	6	180	60	30	12	8	1500	1211	–	2
61	7	190	50	30	12	10	1200	1512	–	1,5
62	7	240	100	36	16	8	2000	Ст.2	–	2,7
63	8	150	50	16	14	6	2000	Ст.2	–	2
64	8	190	56	24	8	4	2000	1211	–	3
65	9	214	66	16	10	14	1500	1512	10 <sup>4</sup>	–
66	9	208	70	18	8	18	2000	1211	10 <sup>4</sup>	–
67	10	210	36	20	14	22	1800	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–

Продовження таблиці 6.3

№ варіанта	Варіанта за рис.6.3	Розміри осердя, мм					Кількість витків	Марка сталі	Коеф. жорсткості, Н/м	Маса, кг
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	$\delta$				
68	10	216	48	16	14	18	2000	1512	10 <sup>4</sup>	–
69	11	306	70	22	18	16	2000	1211	–	3,5
70	11	284	74	26	16	8	2000	1512	–	2
71	12	230	72	12	10	8	2000	Ст.2	–	4
72	12	202	56	16	10	6	1800	1211	–	1,5
73	1	160	30	25	10	5	2000	1211	10 <sup>4</sup>	–
74	1	180	40	35	25	4	1000	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
75	2	110	50	15	18	8	1500	Ст.2	–	3
76	2	130	70	25	24	9	2000	1512	–	1,5
77	3	130	45	12	14	6	1500	1512	–	1,8
78	3	165	55	16	22	8	2400	1211	–	2
79	4	130	45	35	16	4	2000	1211	–	2,5
80	4	210	55	50	18	3	1800	Ст.2	–	1,5
81	5	145	25	10	12	5	1900	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
82	5	165	16	24	16	7	2000	1512	10 <sup>4</sup>	–
83	6	175	36	22	14	6	1800	1211	–	3
84	6	165	55	32	22	14	1400	Ст.2	–	2
85	7	200	64	24	24	4	1500	1512	–	1,5
86	7	210	82	50	28	5	1200	1211	–	1,2
87	8	155	58	32	10	8	1600	Ст.2	–	1
88	8	196	62	36	12	10	2200	1512	–	1,3
89	9	210	100	12	12	12	2000	1211	10 <sup>4</sup>	–
90	9	230	80	14	14	16	1800	Ст.2	10 <sup>4</sup>	–
91	10	230	30	18	16	20	2000	1512	10 <sup>4</sup>	–
92	10	226	46	14	12	15	1600	1211	10 <sup>4</sup>	–
93	11	310	64	12	24	10	1200	1211	–	1,5
94	11	330	58	16	30	12	1800	1512	–	2
95	12	240	62	10	12	10	2000	Ст.2	–	2
96	12	224	54	14	16	8	1600	Ст.2	–	2,5
97	11	280	65	14	20	10	1800	Ст.2	–	1,5
98	11	240	72	10	16	10	2000	1211	–	2,2
99	11	250	80	10	15	12	1500	Ст.2	–	1,8
100	11	260	90	15	12	15	2000	1211	–	2,5
101	1	180	40	35	25	4	1000	1211	10 <sup>4</sup>	–
102	2	110	50	15	18	8	1500	Ст.2	–	3
103	2	130	70	25	24	9	2000	Ст.2	–	1,5
104	3	130	45	12	14	6	1500	1512	–	1,8
105	3	165	55	16	22	8	2400	1211	–	2

Таблиця 6.4 – Варіанти параметрів дроселя зі знімним якорем

№ варіанта	Виміряні при вилученому якорі			Кількість витків котушки	Виміряні при замкненому магнітопроводі		Кількість витків і напруга вимірювальної котушки	
	$I_0$ , А	$U_0$ , В	$P_0$ , Вт	$w_K$	$I$ , А	$P$ , Вт	$w_B$	$U_B$ , В
1	1,0	10	5	2000	1,0	12	50	2
2	2,5	12	14	800	2,5	36	55	6
3	3,5	24	37	570	3,5	100	60	19
4	5,0	14	28	400	5,0	78	65	17
5	1,5	20	11	1330	1,5	32	70	8
6	4,0	18	25	500	4,0	75	75	22
7	3,0	28	26	670	3,0	81	80	27
8	2,0	16	9	1000	2,0	29	85	11
9	4,5	30	33	440	4,5	109	90	53
10	1,0	22	11	2000	1,0	28	50	5
11	2,5	26	31	800	2,5	81	55	16
12	3,5	10	15	570	3,5	40	60	7
13	5,0	12	24	400	5,0	67	65	14
14	1,5	24	13	1330	1,5	38	70	9
15	4,0	14	19	500	4,0	57	75	16
16	3,0	20	19	670	3,0	59	80	19
17	2,0	18	10	1000	2,0	32	85	12
18	4,5	28	30	440	4,5	99	90	47
19	1,0	16	8	2000	1,0	20	50	3
20	2,5	30	35	800	2,5	91	55	18
21	3,5	22	34	570	3,5	92	60	20
22	5,0	26	53	400	5,0	148	65	38
23	1,5	10	6	1330	1,5	17	70	4
24	4,0	12	16	500	4,0	48	75	13
25	3,0	24	22	670	3,0	68	80	21
26	2,0	14	8	1000	2,0	26	85	9
27	4,5	20	22	440	4,5	73	90	32

Продовження таблиці 6.4

№ варіанта	Виміряні при вилученому якорі			Кількість витків котушки	Виміряні при замкненому магнітопроводі		Кількість витків і напруга вимірювальної котушки	
	$I_0$ , А	$U_0$ , В	$P_0$ , Вт		$w_K$	$I$ , А	$P$ , Вт	$w_B$
28	1,0	18	9	2000	1,0	22	50	4
29	2,5	28	33	800	2,5	86	55	16
30	3,5	16	25	570	3,5	68	60	14
31	5,0	30	61	400	5,0	171	65	42
32	1,5	22	12	1330	1,5	35	70	10
33	4,0	26	36	500	4,0	108	75	35
34	3,0	10	9	670	3,0	28	80	8
35	2,0	12	7	1000	2,0	22	85	7
36	4,5	24	26	440	4,5	86	90	36
37	1,0	14	7	2000	1,0	18	50	3
38	2,5	20	23	800	2,5	60	55	11
39	3,5	18	28	570	3,5	76	60	15
40	5,0	28	57	400	5,0	160	65	37
41	1,5	16	9	1330	1,5	26	70	7
42	4,0	30	41	500	4,0	123	75	39
43	3,0	22	20	670	3,0	62	80	23
44	2,0	26	14	1000	2,0	45	85	20
45	4,5	10	11	440	4,5	36	90	14
46	1,0	12	6	2000	1,0	15	50	2
47	2,5	24	28	800	2,5	73	55	12
48	3,5	14	21	570	3,5	57	60	11
49	5,0	20	41	400	5,0	115	65	25
50	1,5	18	10	1330	1,5	29	70	8
51	4,0	28	38	500	4,0	114	75	34
52	3,0	16	15	670	3,0	46	80	16
53	2,0	30	17	1000	2,0	54	85	22
54	4,5	22	24	440	4,5	79	90	40

Продовження таблиці 6.4

№ варіанта	Виміряні при вилученому якорі			Кількість витків котушки $w_K$	Виміряні при замкненому магнітопроводі		Кількість витків і напруга вимірювальної котушки $w_B$ , $U_B$ , В	
	$I_0$ , А	$U_0$ , В	$P_0$ , Вт		$I$ , А	$P$ , Вт	$w_B$	$U_B$ , В
55	1,0	26	13	2000	1,0	32	50	6
56	2,5	10	12	800	2,5	31	55	5
57	3,5	12	18	570	3,5	49	60	9
58	5,0	24	49	400	5,0	137	65	29
59	1,5	14	8	1330	1,5	23	70	6
60	4,0	20	27	500	4,0	81	75	23
61	3,0	18	17	670	3,0	53	80	17
62	2,0	28	15	1000	2,0	48	85	20
63	4,5	16	17	440	4,5	56	90	27
64	1,0	30	15	2000	1,0	38	50	6
65	2,5	22	26	800	2,5	68	55	13
66	3,5	26	40	570	3,5	108	60	25
67	5,0	10	20	400	5,0	56	65	11
68	1,5	12	7	1330	1,5	20	70	5
69	4,0	24	33	500	4,0	99	75	27
70	3,0	14	13	670	3,0	40	80	13
71	2,0	20	11	1000	2,0	35	85	13
72	4,5	18	20	440	4,5	66	90	29
73	1,0	28	14	2000	1,0	35	50	6
74	2,5	16	19	800	2,5	49	55	9
75	3,5	30	46	570	3,5	124	60	27
76	5,0	22	45	400	5,0	126	65	31
77	1,5	26	15	1330	1,5	44	70	12
78	4,0	10	14	500	4,0	42	75	11
79	3,0	12	11	670	3,0	34	80	10
80	2,0	24	13	1000	2,0	42	85	15
81	4,5	14	15	440	4,5	50	90	22
82	1,0	20	10	2000	1,0	25	50	4



Продовження таблиці 6.4

№ варіанта	Виміряні при вилученому якорі			Кількість витків котушки $w_K$	Виміряні при замкненому магнітопроводі		Число витків і напруга вимірювальної котушки	
	$I_0$ , А	$U_0$ , В	$P_0$ , Вт		$I$ , А	$P$ , Вт	$w_B$	$U_B$ , В
83	2,5	18	21	800	2,5	55	55	10
84	3,5	28	43	570	3,5	116	60	24
85	5,0	16	33	400	5,0	92	65	22
86	1,5	30	17	1330	1,5	49	70	14
87	4,0	22	30	500	4,0	90	75	29
88	3,0	26	24	670	3,0	74	80	28
89	2,0	10	6	1000	2,0	19	85	6
90	4,5	12	13	440	4,5	43	90	18
90	4,5	12	13	440	4,5	43	90	18
91	1,0	24	12	2000	1,0	30	50	4
92	2,5	14	16	800	2,5	42	55	7
93	3,5	20	31	570	3,5	84	60	16
94	5,0	18	37	400	5,0	104	65	23
95	1,5	28	16	1330	1,5	46	70	12
96	4,0	16	22	500	4,0	66	75	20
98	2,0	22	12	1000	2,0	38	85	16
99	4,5	26	28	440	4,5	92	90	48
100	2,0	24	13	1000	2,0	42	85	15
101	4,5	14	15	440	4,5	50	90	22
102	4,0	12	16	500	4,0	48	75	13
103	3,0	24	22	670	3,0	68	80	21
104	1,0	12	6	2000	1,0	15	50	2
105	2,5	24	28	800	2,5	73	55	12

Таблиця 6.5 – Варіанти параметрів однофазного трансформатора і його навантаження

№ варіанта	Повна потужність, кВА	Номинальні напруги обмоток, В		Струм НХ, %	Втрати потужності, Вт		Напруга КЗ, %	Коефіцієнт потужності активно-індуктивного навантаження
		ВН	НН		НХ	КЗ		
	$S_{\text{НОМ}}$	$U_{\text{ВННОМ}}$	$U_{\text{НННОМ}}$	$i_x$	$P_0$	$P_K$	$u_K$	$\cos \varphi_H$
1	0,25	660	230	17,6	5,9	17,8	7,3	0,90
2	0,25	380	230	17,5	5,9	17,6	7,2	0,85
3	0,50	660	230	15,9	10,4	32,1	6,7	0,90
4	0,50	380	230	15,9	10,2	31,8	6,6	0,85
5	0,63	660	230	14,3	11,3	36,0	6,0	0,90
6	0,63	380	230	14,2	11,1	35,5	6,0	0,85
7	1,00	660	230	12,6	15,1	49,9	5,4	0,90
8	1,00	380	230	12,5	14,9	49,1	5,3	0,85
9	1,60	660	230	10,9	20,0	68,0	4,6	0,90
10	1,60	380	230	10,8	19,6	66,8	4,6	0,85
11	2,50	660	230	9,1	25,0	87,5	3,9	0,90
12	2,50	380	230	9,0	24,4	85,6	3,8	0,85
13	4,00	660	230	8,3	34,8	125,2	3,5	0,90
14	4,00	380	230	8,2	33,9	122,1	3,5	0,85
15	6,30	660	230	9,6	60,3	223,2	4,1	0,90
16	6,30	380	230	9,5	59,0	218,2	4,0	0,85
17	10,00	660	230	9,2	87,5	332,5	3,9	0,90
18	10,00	380	230	9,1	85,4	324,6	3,8	0,85
19	16,00	660	230	9,1	130,6	509,4	3,8	0,90
20	16,00	380	230	8,9	127,3	496,7	3,7	0,85
21	0,25	660	133	17,5	5,9	17,6	7,2	0,85
22	0,25	380	133	17,4	5,7	17,2	7,1	0,80
23	0,25	220	133	17,3	5,6	16,9	7,0	0,75
24	0,50	660	133	15,9	10,2	31,8	6,6	0,85
25	0,50	380	133	15,7	10,0	31,0	6,5	0,80

Продовження таблиці 6.5

№ варіанта	Повна потужність, кВА	Номинальні напруги обмоток, В		Струм НХ, %	Втрати потужності, Вт		Напруга КЗ, %	Коефіцієнт потужності активно-індуктивного навантаження
		ВН	НН		НХ	КЗ		
	$S_{НОМ}$	$U_{ВННОМ}$	$U_{НННОМ}$	$i_x$	$P_0$	$P_K$	$u_K$	$\cos \varphi_H$
26	0,50	220	133	15,6	9,8	30,2	6,3	0,75
27	0,63	660	133	14,2	11,1	35,5	6,0	0,85
28	0,63	380	133	14,1	10,8	34,6	5,8	0,80
29	0,63	220	133	13,9	10,5	33,6	5,7	0,75
30	1,00	660	133	12,5	14,9	49,1	5,3	0,85
31	1,00	380	133	12,3	14,4	47,6	5,1	0,80
32	1,00	220	133	12,1	14,0	46,0	5,0	0,75
33	1,60	660	133	10,8	19,6	66,8	4,6	0,85
34	1,60	380	133	10,6	18,9	64,3	4,4	0,80
35	1,60	220	133	10,3	18,2	61,8	4,2	0,75
36	2,50	660	133	9,0	24,4	85,6	3,8	0,85
37	2,50	380	133	8,7	23,3	81,7	3,6	0,80
38	2,50	220	133	8,5	22,2	77,8	3,5	0,75
39	4,00	660	133	8,2	33,9	122,1	3,5	0,85
40	4,00	380	133	7,9	32,2	115,8	3,3	0,80
41	4,00	220	133	7,6	30,4	109,6	3,1	0,75
42	6,30	660	133	9,5	59,0	218,2	4,0	0,85
43	6,30	380	133	9,2	56,3	208,3	3,8	0,80
44	6,30	220	133	9,0	53,6	198,4	3,6	0,75
45	10,00	660	133	9,1	85,4	324,6	3,8	0,85
46	10,00	380	133	8,8	81,2	308,7	3,6	0,80
47	10,00	220	133	8,6	77,1	292,9	3,4	0,75
48	16,00	660	133	8,9	127,3	496,7	3,7	0,85
49	16,00	380	133	8,7	120,8	471,2	3,5	0,80
50	16,00	220	133	8,4	114,3	445,7	3,3	0,75
51	0,25	660	115	17,5	5,8	17,4	7,2	0,80

Продовження таблиці 6.5

№ варіанта	Повна потужність, кВА	Номинальні напруги обмоток, В		Струм НХ, %	Втрати потужності, Вт		Напруга КЗ, %	Коефіцієнт потужності активно-індуктивного навантаження
		ВН	НН		НХ	КЗ		
	$S_{НОМ}$	$U_{ВННОМ}$	$U_{НННОМ}$	$i_x$	$P_0$	$P_K$	$u_K$	$\cos \varphi_H$
52	0,25	380	115	17,3	5,6	16,9	7,0	0,75
53	0,25	220	115	17,1	5,4	16,3	6,7	0,70
54	0,50	660	115	15,8	10,1	31,4	6,6	0,80
55	0,50	380	115	15,6	9,8	30,2	6,3	0,75
56	0,50	220	115	15,4	9,4	29,1	6,1	0,70
57	0,63	660	115	14,1	11,0	35,0	5,9	0,80
58	0,63	380	115	13,9	10,5	33,6	5,7	0,75
59	0,63	220	115	13,6	10,0	32,2	5,4	0,70
60	1,00	660	115	12,4	14,7	48,3	5,2	0,80
61	1,00	380	115	12,1	14,0	46,0	5,0	0,75
62	1,00	220	115	11,8	13,3	43,7	4,7	0,70
63	1,60	660	115	10,7	19,3	65,5	4,5	0,80
64	1,60	380	115	10,3	18,2	61,8	4,2	0,75
65	1,60	220	115	10,0	17,1	58,1	4,0	0,70
66	2,50	660	115	8,8	23,9	83,6	3,7	0,80
67	2,50	380	115	8,5	22,2	77,8	3,5	0,75
68	2,50	220	115	8,1	20,6	71,9	3,2	0,70
69	4,00	660	115	8,0	33,0	119,0	3,4	0,80
70	4,00	380	115	7,6	30,4	109,6	3,1	0,75
71	4,00	220	115	7,2	27,8	100,2	2,9	0,70
72	6,30	660	115	9,3	57,6	213,3	3,9	0,80
73	6,30	380	115	9,0	53,6	198,4	3,6	0,75
74	6,30	220	115	8,6	49,6	183,5	3,4	0,70
75	10,00	660	115	9,0	83,3	316,7	3,7	0,80
76	10,00	380	115	8,6	77,1	292,9	3,4	0,75
77	10,00	220	115	8,1	70,8	269,2	3,2	0,70
78	16,00	660	115	8,8	124,1	483,9	3,6	0,80

Продовження таблиці 6.5

№ варіанта	Повна потужність, кВА	Номинальні напруги обмоток, В		Струм НХ, %	Втрати потужності, Вт		Напруга КЗ, %	Коефіцієнт потужності активно-індуктивного навантаження
		ВН	НН		НХ	КЗ		
	$S_{\text{НОМ}}$	$U_{\text{ВННОМ}}$	$U_{\text{НННОМ}}$	$i_x$	$P_0$	$P_K$	$u_K$	$\cos \varphi_H$
79	16,00	380	115	8,4	114,3	445,7	3,3	0,75
80	16,00	220	115	8,0	104,5	407,5	3,1	0,70
81	0,25	660	26	17,4	5,7	17,2	7,1	0,75
82	0,25	380	26	17,2	5,5	16,5	6,8	0,70
83	0,25	220	26	16,9	5,3	15,7	6,5	0,65
84	0,50	660	26	15,7	10,0	31,0	6,5	0,75
85	0,50	380	26	15,5	9,5	29,5	6,2	0,70
86	0,50	220	26	15,2	9,0	28,0	5,9	0,65
87	0,63	660	26	14,1	10,8	34,6	5,8	0,75
88	0,63	380	26	13,7	10,2	32,6	5,5	0,70
89	0,63	220	26	13,4	9,6	30,7	5,2	0,65
90	1,00	660	26	12,3	14,4	47,6	5,1	0,75
91	1,00	380	26	11,9	13,5	44,5	4,8	0,70
92	1,00	220	26	11,5	12,6	41,4	4,5	0,65
93	1,60	660	26	10,6	18,9	64,3	4,4	0,75
94	1,60	380	26	10,1	17,5	59,3	4,1	0,70
95	1,60	220	26	9,6	16,0	54,4	3,8	0,65
96	2,50	660	26	8,7	23,3	81,7	3,6	0,75
97	2,50	380	26	8,2	21,1	73,9	3,3	0,70
98	2,50	220	26	7,6	18,9	66,1	3,0	0,65
99	4,00	660	26	7,9	32,2	115,8	3,3	0,75
100	4,00	660	115	8,0	33,0	119,0	3,4	0,80
101	4,00	380	115	7,6	30,4	109,6	3,1	0,75
102	6,30	660	115	9,3	57,6	213,3	3,9	0,80
103	6,30	380	115	9,0	53,6	198,4	3,6	0,75
104	10,00	380	115	8,6	77,1	292,9	3,4	0,75
105	10,00	220	115	8,1	70,8	269,2	3,2	0,70

Таблиця 6.6 – Дані двигуна постійного струму з паралельним збудженням

№ варіанта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом	Опір обмотки збудження, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$R_a$	$R_z$
1	4	220	900	0,723	1,60	191
2	3,15	220	750	0,693	2,38	255
3	2	220	450	0,576	3,16	199
4	4,25	220	730	0,680	1,61	110
5	3	220	475	0,603	3,14	139
6	3,55	220	425	0,601	2,67	117
7	15	220	1400	0,779	0,37	103
8	7,5	220	1000	0,760	0,79	175
9	6	220	875	0,740	0,80	85
10	4,25	220	580	0,650	1,84	105
11	11	220	1060	0,785	0,45	100
12	8,5	220	875	0,760	0,62	98
13	8	220	600	0,680	0,85	58
14	11	220	800	0,760	0,48	73
15	8,5	220	515	0,680	0,93	91
16	15	220	850	0,807	0,21	45
17	11	220	530	0,705	0,56	46
18	15	220	580	0,753	0,34	44
19	17	220	500	0,730	0,33	34
20	20	220	475	0,750	0,26	32
21	7,5	440	2120	0,871	1,54	1124
22	5,5	440	1450	0,814	3,06	964
23	4,25	440	975	0,740	5,93	971
24	3,14	440	730	0,690	9,64	994
25	7,5	440	1450	0,825	1,54	414
26	5,5	440	900	0,741	4,96	1304
27	4,25	440	690	0,674	6,62	438

Продовження таблиці 6.6

№ Варі- анта	Потуж- ність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом	Опір обмотки збудження, Ом
	$P_{2\text{НОМ}}$	$U_{\text{НОМ}}$	$n_{\text{НОМ}}$	$\eta_{\text{НОМ}}$	$R_a$	$R_z$
28	10	440	1320	0,812	1,23	260
29	7,5	440	975	0,810	2,53	1045
30	5,5	440	690	0,708	5,24	671
31	30	440	3070	0,871	0,38	278
32	18,5	440	2180	0,850	0,63	264
33	15	440	1400	0,800	1,33	481
34	5,5	440	800	0,730	3,74	367
35	30	440	2300	0,863	0,42	278
36	22	440	1600	0,830	0,75	365
37	11	440	1090	0,800	1,53	352
38	8,5	440	800	0,750	2,77	459
39	23,6	440	1400	0,830	0,70	340
40	15	440	1030	0,810	1,15	341
41	11	440	825	0,780	1,72	325
42	30	440	1450	0,840	0,44	171
43	18,5	440	1090	0,820	0,65	164
44	15	440	730	0,761	1,32	191
45	22	440	1090	0,845	0,51	185
46	18,5	440	775	0,808	0,79	180
47	30	440	1030	0,855	0,36	160
48	22	440	775	0,813	0,64	157
49	45	440	1450	0,880	0,23	189
50	37	440	1150	0,850	0,32	136
51	26,5	440	775	0,780	0,61	99
52	45	440	1060	0,860	0,26	132
53	37	440	825	0,830	0,37	118
54	55	440	1000	0,849	0,25	136

Продовження таблиці 6.6

№ Варі- анта	Потуж- ність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом	Опір обмотки збудження, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$R_a$	$R_z$
55	75	440	1060	0,873	0,15	103
56	90	440	1000	0,900	0,09	96
57	110	440	1000	0,870	0,11	76
58	132	440	1000	0,870	0,08	49
59	160	440	1000	0,890	0,06	53
60	27	440	500	0,762	0,60	78
61	45	440	750	0,822	0,36	128
62	90	440	1500	0,886	0,11	90
63	37	440	500	0,786	0,56	147
64	55	440	750	0,833	0,29	143
65	110	440	1500	0,891	0,08	78
66	45	440	500	0,790	0,42	98
67	132	440	1500	0,891	0,05	18
68	50	440	500	0,776	0,43	99
69	75	440	750	0,840	0,20	108
70	160	440	1500	0,897	0,05	54
71	90	440	750	0,853	0,15	91
72	200	440	1500	0,903	0,04	43
73	75	440	500	0,822	0,23	100
74	110	440	750	0,867	0,11	76
75	250	440	1500	0,910	0,03	35
76	11	220	1000	0,830	0,24	73
77	22	440	600	0,840	0,56	246
78	45	220	750	0,870	0,04	23
79	55	440	500	0,880	0,12	103
80	10	220	1500	0,770	0,35	74
81	15	440	750	0,800	0,82	172



Продовження таблиці 6.6

№ Варіанта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом	Опір обмотки збудження, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$R_a$	$R_z$
82	37	220	500	0,880	0,04	28
83	11	440	1000	0,830	0,82	292
84	22	220	1500	0,840	0,09	41
85	45	440	1000	0,870	0,07	74
86	55	220	600	0,880	0,04	25
87	10	440	750	0,770	1,87	372
88	15	220	500	0,800	0,27	86
89	37	440	1500	0,880	0,07	92
90	11	220	750	0,830	0,12	60
91	22	440	500	0,840	0,50	184
92	45	220	1000	0,870	0,03	18
93	55	440	1500	0,880	0,08	68
94	10	220	1000	0,770	0,37	74
95	15	440	600	0,800	0,96	344
96	37	220	750	0,880	0,04	28
97	11	440	500	0,830	1,22	486
98	22	220	1500	0,840	0,09	37
99	45	440	750	0,870	0,04	62
100	37	440	1150	0,850	0,32	136
101	26,5	440	775	0,780	0,61	99
102	55	440	750	0,833	0,29	143
103	110	440	1500	0,891	0,08	78
104	2	220	450	0,576	3,16	199
105	4,25	220	730	0,680	1,61	110

Таблиця 6.7 – Дані двигуна постійного струму з послідовним збудженням

№ варіанта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом
	$P_{2\text{НОМ}}$	$U_{\text{НОМ}}$	$n_{\text{НОМ}}$	$\eta_{\text{НОМ}}$	$R_{\text{я}}$
1	45	220	1000	0,870	0,06
2	22	440	600	0,840	0,64
3	11	220	750	0,830	0,35
4	55	440	500	0,880	0,22
5	37	220	1500	0,880	0,08
6	15	440	750	0,800	1,07
7	10	220	500	0,770	0,46
8	45	440	1000	0,870	0,27
9	22	220	1500	0,840	0,17
10	11	440	1000	0,830	1,49
11	55	220	600	0,880	0,05
12	37	440	750	0,880	0,30
13	15	220	500	0,800	0,29
14	10	440	1500	0,770	1,99
15	45	220	750	0,870	0,07
16	22	440	500	0,840	0,62
17	11	220	1000	0,830	0,34
18	55	440	1500	0,880	0,21
19	37	220	1000	0,880	0,08
20	15	440	600	0,800	1,24
21	10	220	750	0,770	0,45
22	45	440	500	0,870	0,26
23	22	220	1500	0,840	0,17
24	11	440	750	0,830	1,44
25	4	220	900	0,723	1,45
26	3,15	220	750	0,693	1,96
27	2	220	450	0,576	3,55
28	4,25	220	730	0,680	1,49

Продовження таблиці 6.7

№ варі- анта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом
	$P_{2\text{НОМ}}$	$U_{\text{НОМ}}$	$n_{\text{НОМ}}$	$\eta_{\text{НОМ}}$	$R_{\text{я}}$
29	3	220	475	0,603	2,32
30	3,55	220	425	0,601	1,96
31	15	220	1400	0,779	0,33
32	7,5	220	1000	0,760	0,71
33	6	220	875	0,740	0,93
34	4,25	220	580	0,650	1,55
35	11	220	1060	0,785	0,45
36	8,5	220	875	0,760	0,62
37	8	220	600	0,680	0,79
38	11	220	800	0,760	0,48
39	8,5	220	515	0,680	0,74
40	15	220	850	0,807	0,30
41	11	220	530	0,705	0,55
42	15	220	580	0,753	0,36
43	17	220	500	0,730	0,34
44	20	220	475	0,750	0,27
45	7,5	440	2120	0,871	1,74
46	5,5	440	1450	0,814	3,20
47	4,25	440	975	0,740	5,26
48	3,14	440	730	0,690	7,91
49	7,5	440	1450	0,825	2,24
50	5,5	440	900	0,741	4,05
51	4,25	440	690	0,674	6,01
52	10	440	1320	0,812	1,77
53	7,5	440	975	0,810	2,38
54	5,5	440	690	0,708	4,37
55	30	440	3070	0,871	0,44
56	18,5	440	2180	0,850	0,80

Продовження таблиці 6.7

№ варі- анта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом
	$P_{2\text{НОМ}}$	$U_{\text{НОМ}}$	$n_{\text{НОМ}}$	$\eta_{\text{НОМ}}$	$R_{\text{я}}$
57	15	440	1400	0,800	1,24
58	5,5	440	800	0,730	4,16
59	30	440	2300	0,863	0,46
60	22	440	1600	0,830	0,75
61	11	440	1090	0,800	1,69
62	8,5	440	800	0,750	2,56
63	23,6	440	1400	0,830	0,69
64	15	440	1030	0,810	1,19
65	11	440	825	0,780	1,81
66	30	440	1450	0,840	0,52
67	18,5	440	1090	0,820	0,93
68	15	440	730	0,761	1,41
69	22	440	1090	0,845	0,69
70	18,5	440	775	0,808	0,97
71	30	440	1030	0,855	0,48
72	22	440	775	0,813	0,80
73	45	440	1450	0,880	0,27
74	37	440	1150	0,850	0,40
75	26,5	440	775	0,780	0,75
76	45	440	1060	0,860	0,31
77	37	440	825	0,830	0,44
78	55	440	1000	0,849	0,27
79	75	440	1060	0,873	0,17
80	90	440	1000	0,900	0,12
81	110	440	1000	0,870	0,12
82	132	440	1000	0,870	0,10
83	160	440	1000	0,890	0,07
84	27	440	500	0,762	0,78

Продовження таблиці 6.7

№ варі- анта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом
	$P_{2\text{НОМ}}$	$U_{\text{НОМ}}$	$n_{\text{НОМ}}$	$\eta_{\text{НОМ}}$	$R_{\text{я}}$
85	45	440	750	0,822	0,38
86	90	440	1500	0,886	0,13
87	37	440	500	0,786	0,53
88	55	440	750	0,833	0,29
89	110	440	1500	0,891	0,10
90	45	440	500	0,790	0,43
91	132	440	1500	0,891	0,09
92	50	440	500	0,776	0,40
93	75	440	750	0,840	0,21
94	160	440	1500	0,897	0,07
95	90	440	750	0,853	0,16
96	200	440	1500	0,903	0,05
97	75	440	500	0,822	0,23
98	110	440	750	0,867	0,12
99	250	440	1500	0,910	0,04
100	55	440	500	0,880	0,22
101	37	220	1500	0,880	0,08
102	8,5	220	515	0,680	0,74
103	15	220	850	0,807	0,30
104	11	440	825	0,780	1,81
105	30	440	1450	0,840	0,52

Таблиця 6.8 – Дані трифазного асинхронного двигуна

№ варіанта	Схема з'єднання обмотки статора	Потужність, кВт	Кількість пар полюсів	Номінальне ко-взання	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	ККД	Коефіцієнт потужності
		$P_{2\text{ном}}$	$p$	$s_{\text{ном}}$	$\lambda_M$	$m_I$	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{1\text{ном}}$
1	Т	0,09	1	0,086	2,2	5,0	0,600	0,700
2	З	0,12	1	0,097	2,2	5,0	0,630	0,700
3	Т	0,18	1	0,080	2,2	5,0	0,660	0,760
4	З	0,25	1	0,080	2,2	5,0	0,680	0,770
5	Т	0,37	1	0,083	2,2	5,0	0,700	0,860
6	З	0,55	1	0,085	2,2	5,0	0,730	0,860
7	Т	0,75	1	0,053	2,2	5,5	0,770	0,870
8	З	1,1	1	0,063	2,2	5,5	0,775	0,870
9	Т	1,5	1	0,050	2,2	6,5	0,810	0,850
10	З	2,2	1	0,050	2,2	6,5	0,830	0,870
11	Т	3	1	0,054	2,2	6,5	0,845	0,880
12	З	4	1	0,040	2,2	7,5	0,865	0,890
13	Т	5,5	1	0,040	2,2	7,5	0,875	0,910
14	З	7,5	1	0,026	2,2	7,5	0,875	0,880
15	Т	11	1	0,031	2,2	7,5	0,880	0,900
16	З	15	1	0,023	2,2	7,5	0,880	0,910
17	Т	18,5	1	0,023	2,2	7,5	0,885	0,920
18	З	22	1	0,020	2,2	7,5	0,885	0,910
19	Т	30	1	0,019	2,2	7,5	0,905	0,900
20	З	37	1	0,019	2,2	7,5	0,900	0,890
21	Т	45	1	0,018	2,2	7,5	0,910	0,900
22	З	55	1	0,021	2,2	7,5	0,910	0,920
23	Т	75	1	0,014	2,2	7,5	0,910	0,890
24	З	90	1	0,014	2,2	7,5	0,920	0,900
25	Т	110	1	0,020	2,2	7,0	0,910	0,890
26	З	132	1	0,020	2,2	7,0	0,915	0,890
27	Т	160	1	0,019	1,9	7,0	0,920	0,900

Продовження таблиці 6.8

№ варіанта	Схема з'єднання обмотки статора	Потужність, кВт	Кількість пар полюсів	Номінальне козвання	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	ККД	Коефіцієнт потужності
		$P_{2\text{ном}}$	$p$	$s_{\text{ном}}$	$\lambda_M$	$m_I$	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{I\text{ном}}$
28	З	200	1	0,019	1,9	7,0	0,925	0,900
29	Т	250	1	0,019	1,9	7,0	0,925	0,900
30	З	315	1	0,020	1,9	7,0	0,930	0,910
31	Т	0,06	2	0,081	2,2	5,0	0,500	0,600
32	З	0,09	2	0,086	2,2	5,0	0,550	0,600
33	Т	0,12	2	0,080	2,2	5,0	0,630	0,660
34	З	0,18	2	0,087	2,2	5,0	0,640	0,640
35	Т	0,25	2	0,080	2,2	5,0	0,680	0,650
36	З	0,37	2	0,090	2,2	5,0	0,680	0,690
37	Т	0,55	2	0,087	2,2	4,5	0,705	0,700
38	З	0,75	2	0,087	2,2	4,5	0,720	0,730
39	Т	1,1	2	0,067	2,2	5,0	0,750	0,810
40	З	1,5	2	0,067	2,2	5,0	0,770	0,830
41	Т	2,2	2	0,054	2,2	6,0	0,800	0,830
42	З	3	2	0,053	2,2	6,5	0,820	0,830
43	Т	4	2	0,053	2,2	6,0	0,840	0,840
44	З	5,5	2	0,050	2,2	7,0	0,855	0,860
45	Т	7,5	2	0,030	2,2	7,5	0,875	0,860
46	З	11	2	0,028	2,2	7,5	0,875	0,870
47	Т	15	2	0,027	2,2	7,0	0,890	0,880
48	З	18,5	2	0,027	2,2	7,0	0,900	0,880
49	Т	22	2	0,020	2,2	7,0	0,900	0,900
50	З	30	2	0,020	2,2	7,0	0,910	0,890
51	Т	37	2	0,017	2,2	7,0	0,910	0,900
52	З	45	2	0,018	2,2	7,0	0,920	0,900
53	Т	55	2	0,020	2,2	7,0	0,925	0,900
54	З	75	2	0,014	2,2	7,0	0,930	0,900
55	Т	90	2	0,013	2,2	7,0	0,930	0,910

Продовження таблиці 6.8

№ варіанта	Схема з'єднання обмотки статора	Потужність, кВт	Кількість пар полюсів	Номінальне ко-взання	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{НОМ}}}$	ККД	Коефіцієнт потужності
		$P_{2\text{НОМ}}$	$p$	$s_{\text{НОМ}}$	$\lambda_M$	$m_I$	$\eta_{\text{НОМ}}$	$\cos\varphi_{1\text{НОМ}}$
56	З	110	2	0,023	2,0	7,0	0,925	0,900
57	Т	132	2	0,023	2,0	6,5	0,930	0,900
58	З	160	2	0,020	1,9	7,0	0,935	0,910
59	Т	200	2	0,017	1,9	7,0	0,940	0,920
60	З	250	2	0,017	1,9	7,0	0,945	0,920
61	Т	315	2	0,017	1,9	7,0	0,945	0,920
62	З	0,18	3	0,115	2,2	4,0	0,560	0,620
63	Т	0,25	3	0,108	2,2	4,0	0,590	0,620
64	З	0,37	3	0,080	2,2	4,0	0,645	0,690
65	Т	0,55	3	0,080	2,2	4,0	0,675	0,710
66	З	0,75	3	0,080	2,2	4,0	0,690	0,740
67	Т	1,1	3	0,080	2,2	4,0	0,740	0,740
68	З	1,5	3	0,064	2,2	5,5	0,750	0,740
69	Т	2,2	3	0,051	2,2	5,5	0,810	0,730
70	З	3	3	0,055	2,2	6,0	0,810	0,760
71	Т	4	3	0,051	2,2	6,0	0,820	0,810
72	З	5,5	3	0,041	2,2	7,0	0,850	0,800
73	Т	7,5	3	0,032	2,2	7,0	0,855	0,810
74	З	11	3	0,030	2,0	6,0	0,860	0,860
75	Т	15	3	0,030	2,0	6,0	0,875	0,870
76	З	18,5	3	0,027	2,0	6,0	0,880	0,870
77	Т	22	3	0,025	2,0	6,5	0,900	0,900
78	З	30	3	0,023	2,0	6,5	0,905	0,900
79	Т	37	3	0,020	2,0	6,5	0,910	0,890
80	З	45	3	0,015	2,0	7,0	0,915	0,890
81	Т	55	3	0,015	2,0	7,0	0,920	0,880
82	З	75	3	0,020	1,9	7,0	0,920	0,890
83	Т	90	3	0,020	1,9	7,0	0,925	0,890



Продовження таблиці 6.8

№ варіанта	Схема з'єднання обмотки статора	Потужність, кВт	Кількість пар полюсів	Номінальне ковзання	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	ККД	Коефіцієнт потужності
		$P_{2\text{ном}}$	$p$	$s_{\text{ном}}$	$\lambda_M$	$m_I$	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{1\text{ном}}$
84	З	110	3	0,020	1,9	7,0	0,930	0,900
85	Т	132	3	0,020	1,9	7,0	0,935	0,900
86	З	160	3	0,018	1,9	7,0	0,935	0,900
87	Т	200	3	0,018	1,9	7,0	0,940	0,900
88	З	0,25	4	0,093	1,7	3,5	0,560	0,650
89	Т	0,37	4	0,100	1,7	3,5	0,615	0,650
90	З	0,55	4	0,100	1,7	3,5	0,640	0,650
91	Т	0,75	4	0,060	1,7	3,5	0,680	0,620
92	З	1,1	4	0,070	1,7	3,5	0,700	0,680
93	Т	1,5	4	0,070	1,7	5,5	0,740	0,650
94	З	2,2	4	0,060	2,2	6,0	0,765	0,710
95	Т	3	4	0,065	2,2	6,0	0,790	0,740
96	З	4	4	0,041	2,2	6,0	0,830	0,700
97	Т	5,5	4	0,045	2,2	6,0	0,830	0,740
98	З	7,5	4	0,027	2,2	6,0	0,860	0,750
99	Т	11	4	0,027	2,2	6,0	0,870	0,750
100	Т	18,5	1	0,023	2,2	7,5	0,885	0,920
101	З	2,2	4	0,060	2,2	6,0	0,765	0,710
102	Т	3	4	0,065	2,2	6,0	0,790	0,740
103	Т	4	3	0,051	2,2	6,0	0,820	0,810
104	З	5,5	3	0,041	2,2	7,0	0,850	0,800
105	Т	315	2	0,017	1,9	7,0	0,945	0,920

ДОДАТОК 1

**ЗРАЗОК ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА**

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”

Кафедра загальної електротехніки

***КУРСОВА РОБОТА***

за темою:

**„РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ  
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ”**

з дисципліни  
„Електротехніка і електромеханіка”

Виконав студент:

групи

Перевірив:

Оцінка:

Харків (рік)

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Магнитные цепи и электротехнические устройства : учеб. пособие / В.Г. Данько, В.И. Милых, А.К. Черкасов и др. – К.: УМК ВО, 1991. – 116 с.
2. Електротехніка : навч. посібник для самостійної роботи студентів / В.Г. Данько, В.І. Мілих, А.К. Черкасов, В.Ф. Болух – К: УМК ВО, 1990. – 264 с.
3. Трегуб А.П. Электротехника / Под ред. Е.В. Кузнецова. – К: Вища школа, 1987. – 600 с.
4. Касаткин А.С. Электротехника / Касаткин А.С., Немцов В.М. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 440 с.
5. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1987. – 288 с.
6. Милых В.И. Магнитные цепи и электротехнические устройства : учебное пособие. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – 184 с.
7. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник / Мілих В.І., Шавьолкін О.О.; за ред. В.І. Мілих. – К.: Каравела, 2007. – 688 с.

## ЗМІСТ

ВСТУП . . . . .	3
1. МАГНІТНІ КОЛА . . . . .	4
1.1. Параметри, що характеризують магнітне поле . . . . .	4
1.2. Класифікація магнітних кіл . . . . .	5
1.3. Закони магнітних кіл . . . . .	7
1.4. Принципи розрахунку магнітних кіл . . . . .	11
1.5. Магнітні кола зі змінною магніторушійною силою . . . . .	12
1.6. Втрати потужності в магнітних колах і рівняння електричної рівноваги в їх обмотках . . . . .	13
1.7. Схема заміщення котушки зі сталевим осердям . . . . .	15
1.8. Розрахунок магнітних кіл постійного струму . . . . .	16
1.9. Визначення параметрів схеми заміщення дроселя, включеного на змінну напругу . . . . .	23
2. ЕЛЕКТРОМАГНІТИ ТА РЕЛЕ . . . . .	26
2.1. Будова та принцип роботи електромагнітів . . . . .	26
2.2. Будова та принцип роботи реле . . . . .	27
2.3. Приклади розрахунку параметрів електромагнітів та реле . . . . .	29
3. ТРАНСФОРМАТОРИ . . . . .	33
3.1. Будова і основні параметри трансформатора . . . . .	33
3.2. Енергетичні явища в трансформаторі . . . . .	36
3.3. Режими роботи і характеристики трансформатора . . . . .	37
3.4. Приклади розрахунку параметрів і характеристик однофазних трансформаторів . . . . .	38
4. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ . . . . .	43
4.1. Будова та принцип дії двигуна постійного струму . . . . .	43
4.2. Основні рівняння двигунів постійного струму . . . . .	46
4.3. Способи пуску в хід і регулювання частоти обертання двигунів постійного струму . . . . .	46
4.4. Механічні характеристики двигуна постійного струму . . . . .	47
4.5. Втрати і ККД двигуна постійного струму . . . . .	48

4.6. Приклади розрахунку параметрів і характеристик двигунів постійного струму . . . . .	49
5. АСИНХРОННІ ДВИГУНИ . . . . .	53
5.1. Будова трифазного асинхронного двигуна . . . . .	53
5.2. Обертове магнітне поле і його властивості . . . . .	55
5.3. Принцип роботи трифазного асинхронного двигуна . . . . .	57
5.4. Основні рівняння трифазного асинхронного двигуна . . . . .	58
5.5. Втрати і ККД асинхронного двигуна . . . . .	58
5.6. Обертальний момент і механічні характеристики асинхронного двигуна . . . . .	59
5.7. Робочі характеристики асинхронного двигуна. . . . .	61
5.8. Пуск в хід і регулювання частоти обертання асинхронного двигуна	61
5.9. Приклади розрахунку параметрів і характеристик асинхронних двигунів . . . . .	63
6. ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ КУРСОВОЇ РОБОТИ . . . . .	67
Задача 1. Котушка зі сталевим осердям (однорідне магнітне коло) . . .	67
Задача 2. Котушка зі сталевим осердям (неоднорідне магнітне коло) .	67
Задача 3. Вантажопідйомні електромагніти та електромагніти реле . .	72
Задача 4. Дросель зі знімним якорем . . . . .	75
Задача 5. Однофазний трансформатор . . . . .	76
Задача 6. Двигун постійного струму з паралельним збудженням . . . . .	77
Задача 7. Двигун постійного струму з послідовним збудженням . . . . .	78
Задача 8. Трифазний асинхронний двигун . . . . .	79
Таблиці даних з варіантами задач . . . . .	81
ДОДАТОК 1. Зразок титульного листа. . . . .	111
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ . . . . .	112

*Для нотаток*

Навчальне видання

# **РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ**

Навчальний посібник для курсової роботи з курсу

**«Електротехніка і електромеханіка»**

для студентів усіх неелектротехнічних спеціальностей

Укладачі: БОЛЮХ Володимир Федорович  
КОЖЕМЯКІН Сергій Михайлович  
МАРКОВ Владислав Сергійович

Відповідальний за випуск В.Г. Данько

Роботу рекомендував до видання В.В. Воїнов

В авторській редакції

План 2016

Підписано до друку. . Формат 60x84 1/16. Папір друк. №2.  
Друк - ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 5,2.  
Обл.-вид. арк .6,0. Наклад - 200 прим. Зам. № . Ціна договірна

---

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2001 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Друкарня НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21