

Міністерство освіти і науки молоді та спорту України
Управління освіти і науки Рівненської обласної
державної адміністрації
Рівненський професійний ліцей

Вихрові струми та їх використання. Закони повного струму

Автор: викладач спецдисциплін Костюкевич І.Г.

Рівне - 2013

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

Даний матеріал вивчається згідно Державного стандарту професійно-технічної освіти України з професії «Електромонтер з ремонту та обслуговування електроустаткування» в темі «Електромагнетизм» (2, 3, 4 розряд), в темі «Вектор електричного зміщення (індукція). Теорема Гауса» та в темах «Трансформатори», «Електричні машини» (3 розряд); по професії «Верстатник широкого профілю» в темі «Електромагнетизм» (2,3,4 розряд); по професії «Електрогазозварник, рихтувальник кузовів» в темі «Магнітне поле» (2 розряд), в темі «Трансформатори» (3 розряд), в темі «Електричні вимірювання» (4 розряд); по професії «Слюсар з ремонту автомобілів. Водій автотранспортних засобів» в темі «Електромагнетизм» (2,3,4 розряд) та в інших групах з предмету «Електротехніка».

Зрозуміло, що перші інформаційні відомості про магнітне поле учні мають змогу отримати ще при вивченні шкільного матеріалу. Однак навчальна програма згідно ДСТУ ПТО поглиблює знання учнів про особливості магнітних полів, про сферу застосування їх в системі електротехнічних пристроїв, про характер їх впливу в системі роботи працівника кожної спеціальності. Вивчення даного матеріалу базується на основі вимог ПУЕ, ПБЕЕС, ПТЕЕС про принципи роботи електропристроїв та є розширенням знань учнів про математичне оформлення магнітного поля, розрахунків магнітопроводів, визначення законів про магнітне поле та співвідношень подібності законів як у колі постійного струму так і в системі магнітного кола.

Потреба в написанні методичної розробки по даній темі викликано відсутністю інформаційного і навчального матеріалу в підручниках, які видані на даний час державною мовою.

Магнітне коло, магнітний опір, розрахунок магнітних кіл – це матеріал, що має особливо важливе значення для розуміння принципу роботи трансформаторів, магнітних пускачів, реле, електродвигунів та інших електротехнічних приладів, а тому якісно підібраний матеріал по цих темах є одним із базових для вивчення «Електротехніки», «Електротехніки з основами промислової електроніки» та «Спецтехнології».

Мета написання методичної розробки – доповнити теми необхідним змістовим та наочним матеріалом щодо логічності викладення, сумісності і поєднання електричних та магнітних полів, методики проведення уроку по даній темі і використання матеріалу для проведення позаурочних заходів.

Зміст підбраного матеріалу має розширити знання учнів про науковість, цілісність електромагнітних взаємодій, переконати в значимості наукових ідей та їх втілення в електротехнічних пристроях, а отже повинен забезпечуватися відповідними методами викладання, всемірною активізацією пізнавальної діяльності учнів, розвитком їх творчих здібностей, прищеплення інтересу до предмета, що вивчається.

ПОЗНАЧЕННЯ, СКОРОЧЕННЯ, ТЕРМІНИ ТА ОСНОВНІ ФОРМУЛИ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ:

ПУЕ – Правила улаштування електроустановок

Правила улаштування електроустановок поширюються на електроустановки, що споруджуються і реконструюються з різними напругами до 500кВ включно, за винятком спеціальних електроустановок, у відношенні яких ПУЕ обов'язкові у тій мірі, в якій вони не змінені спеціальними правилами.

ПУЕ розроблені з врахуванням обов'язковості в умовах експлуатації планово-попереджувальних і профілактичних випробувань, ремонтів електроустановок і їх електрообладнання, а також систематичного навчання і перевірки обслуговуючого персоналу в об'ємах вимог діючих Правил технічної експлуатації і Правил по техніці безпеки.

ПБЕЕС – Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів

Вимоги цих Правил поширюються на працівників, що обслуговують діючі електроустановки споживачів напругою до 220 кВ включно і є обов'язковими для всіх споживачів та виробників електроенергії, незалежно від їх відомчої належності і форм власності на засоби виробництва.

Вимоги цих Правил повинні виконуватись під час експлуатації діючих електроустановок, електричних станцій, електричної частини ТАВ, ЗДТУ, районних котелень, що обслуговуються споживачами, під час виконання в них монтажних, налагоджувальних, випробувальних, ремонтних і будівельних робіт.

В цих Правилах викладені Основні вимоги щодо убезпечення працівників під час експлуатації електроустановок.

Заходи додаткового підвищення безпеки, які передбачаються безпосередньо на місці проведення робіт, не повинні суперечити цим Правилам або послаблювати їхню дію.

ПТЕЕС – Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів

установлюють основні організаційні й технічні вимоги до експлуатації електроустановок та енергообладнання (енергоустановки) споживачів. Правила поширюються на діючі електроустановки напругою до 150 кВ включно, які належать споживачам електричної енергії, незалежно від форм власності та відповідної належності, а також на електроустановки населення напругою понад 1000 В.

Правила поширюються також на електроустановки до 1000 В, які перебувають на правах власності в населення, у частині застосування норм випробувань та вимірювання параметрів електрообладнання.

Вимоги до експлуатації генераторів, синхронних компенсаторів, силових кабельних ліній з масло наповненими кабелями споживачів будь-якої напруги, а також силових трансформаторів, автотрансформаторів, реакторів, повітряних ліній електропередавання та електроустановки споживачів напругою понад 150 кВ установлюються відповідно до галузевого керівного документа Міністерства палива та енергетики України ГДК 34.20.507-2003 „Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила”, затверджені наказом Міністерства палива та енергетики України від 13.06.2003 №296.

Правила обов'язкові для працівників, що здійснюють експлуатацію енергоустановок споживачів, функції керування, регулювання режимів енергоспоживання, інспектування електроустановок споживачів, а також підприємств, установ, та організацій усіх форм власності, що виконують науково-дослідні, проектно-конструкторські і проектні роботи, виготовлення, постачання, монтаж, налагодження, випробування, діагностику, ремонт електроустановок споживачів.

Електромагнетизм, наука, яка займається питанням взаємозалежності магнітних та електричних явищ, наприклад, виникнення магнітного поля при проходженні електричного струму.

Електрика: 1) явища, в яких істотну роль відіграє електричний заряд або струм, 2) наука, про електричні заряди та пов'язані з ними електричні й магнітні поля (напр., магнітне поле навколо провідника зі струмом), взаємозв'язок між електричними та магнітними полями, а також пов'язані з ними явища.

Магнетизм, явища і властивості матерії, пов'язані з взаємодією тіл через магнітне поле.

Магніт, елемент із магнітного, твердого матеріалу, джерело постійного магнітного поля; кожний магніт має два різноіменних полюси (т.зв. південний та північний), навколо яких поле є найсильнішим; магніти бувають брусківі, тороїдальні, у формі підкови та ін.; використовуються у компасах, електрогенераторах, двигунах, гучномовцях, мікрофонах, замках, тощо.

Електромагніт, котушка з феромагнітним осердям (напр.. з м'якої сталі), яка під впливом магнітного поля, створеного при проходженні через обмотку електричного струму, стає магнітом. Електромагніт (англ. electromagnet, нім. Elektromagnet m) — пристрій, що створює магнітне поле при проходженні електричного струму. У електромагнітах, призначених, перш за все, для створення механічного зусилля також присутній якір (рухома частина магнітопроводу), що передає зусилля.

ОСНОВНІ ФОРМУЛИ

до тем

1. Електричне коло постійного струму. Закони постійного струму
2. Магнітне поле струму. Електромагнітна індукція. Електромагнетизм

Назва	Величина, її визначення	Одиниці вимірювання
Електростатика		
1. Закон збереження електричного заряду. Закон Кулона		
$q_1 + q_2 + q_3 + \dots q_n = \text{const}$	q - електричний заряд	Кл
$F = k \frac{ q_1 \cdot q_2 }{\epsilon r^2}$	F - модуль сили електростатичної взаємодії	Н
	r - відстань між зарядами	м
$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ - електрична стала	$\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$
	ϵ - діелектрична проникність середовища	
	k - коефіцієнт пропорційності	$\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$
2. Напруженість електричного поля		
$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$	$\vec{E}$ - напруженість електричного поля	Н/Кл, В/м
$E = k \frac{ q }{\epsilon r^2}$	q_0 - пробний заряд	Кл
	q - заряд, який створює електричне поле	Кл
	r - відстань від заряду до довільної точки поля	м
$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$	$E_1, E_2, \dots, E_n$ - напруженості електричних полів заряджених частинок замкнутої системи тіл	Н/Кл, В/м
3. Потенціал і напруга		
$\varphi = \frac{W_p}{q}$	φ - потенціал електричного поля	В
$\varphi = Ed$	W_p - потенціальна енергія електричного заряду в заданій точці поля	Дж
	q - електричний заряд	Кл
	U - напруга	В
$U =$	A - робота сил електричного поля	Дж
$U = E \varphi d$	d - відстань, на яку перемістився заряд	м
	φd - відстань між точками електричного поля	м
4. Робота під час переміщення заряду		
$A = qE \varphi d$	A - робота сил електричного поля	Дж
	E - напруженість електричного поля	Н/Кл, В/м
	φd - відстань між точками електричного поля	м
	q - електричний заряд	Кл
5. Електроємність. Енергія зарядженого конденсатора		
$C = \frac{ q }{U}$	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$	C - електроємність провідника, конденсатора або системи конденсаторів
		Ф

$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$ $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$ $W_e = \frac{qU}{2}; \quad W_e = \frac{q^2}{2C}$ $W_e = \frac{CU^2}{2}$	q - електричний заряд конденсатора	Кл
	U - напруга між обкладками конденсатора	В
	S - площа однієї із пластин плоского конденсатора	м ²
	d - відстань між пластинами	м
	W_e - енергія зарядженого конденсатора	Дж
	ϵ_0 - діелектрична проникність середовища	
	ϵ_0 - електрична стала	$\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$
Закони постійного струму		
6. Електричний струм		
$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ $I = q_0 n \langle v \rangle S$ $j = \frac{I}{S}$ $j = q_0 n \langle v \rangle$	I - сила струму	А
	q - кількість електрики	Кл
	t - інтервал часу	с
	q_0 - заряд електрона (іона)	Кл
	n - концентрація зарядів	м ⁻³
	$\langle v \rangle$ - середня швидкість носіїв заряду	м/с
	S - площа поперечного перерізу провідника	м ²
7. Закон Ома для ділянки кола і для повного кола		
$I = \frac{U}{R}$ $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$	I - сила струму	А
	U - напруга на кінцях ділянки	В
	R - опір ділянки кола	Ом
	$\mathcal{E}$ - електрорушійна сила	В
	R - опір зовнішньої ділянки кола	Ом
	r - опір джерела струму	Ом
8. Робота і потужність струму		
$A = UI \Delta t; \quad A = I^2 R \Delta t$ $A = \frac{U^2 \Delta t}{R}$ $P = IU; \quad P = I^2 R$ $P = \frac{U^2}{R}$	A - робота електричного струму	Дж
	I - сила струму	А
	U - напруга	В
	R - опір провідника	Ом
	t - час	с
	P - потужність електричного струму	Вт
Електричний струм в різних середовищах		
9. Об'єднаний закон електролізу		
$m = \frac{1}{F} \frac{M}{Z} I \Delta t$	m - маса речовини, що виділилась	кг
	M - молярна маса речовини	кг/моль
	$F = 96500$ Кл/моль - число Фарадея	

	Z - валентність	
	I - сила струму	А
	t - час	с
Магнітне поле струму		
10. Індукція магнітного поля		
$B = \frac{M}{IS} = \frac{F}{Il}$	M - магнітний момент рамки	Н·м
	I - сила струму	А
	S - площа рамки	м ²
	B - магнітна індукція	Тл
	F - максимальна сила, що діє на ділянку провідника l з боку магнітного поля	Н
11. Магнітний потік		
$\Phi = BS \cos \alpha$	Φ - потік магнітної індукції	Вб
	B - магнітна індукція	Тл
	S - площа контуру	м ²
	α - кут між вектором індукції і нормаллю до поверхні	град
12. Сила Ампера		
$F = BIl \sin \alpha$	F - сила, що діє на провідник із струмом з боку магнітного поля	Н
	I - сила струму в провіднику	А
	l - активна довжина провідника	м
	α - кут між напрямом сили струму і вектором магнітної індукції	град
13. Сила Лоренца		
$F = q_0 v B \sin \alpha$	F - сила, яка діє на електричний заряд, що рухається в магнітному полі	Н
	q_0 - заряд частинки	Кл
	v - швидкість частинки	м/с
	α - кут між напрямом швидкості руху заряду і вектором магнітної індукції	град
14. Магнітна проникність середовища		
$\mu = \frac{B}{B_0}$	B - індукція магнітного поля в довільному середовищі	Тл
	B_0 - індукція магнітного поля у вакуумі	Тл
Електромагнітна індукція		
15. Закон електромагнітної індукції		
$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ $\mathcal{E}_i = - N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$	i - ЕРС індукції контуру	В
	Φ - зміна магнітного потоку	Вб
	t - час зміни потоку	с
	N - кількість витків в котушці	
	i - ЕРС індукції, що виникає в прямолінійному провіднику	В

$\varphi_i = Blv \sin \alpha$	B - індукція магнітного поля	Тл
	l - активна довжина провідника	м
	v - швидкість руху провідника	м/с
	α - кут між напрямками вектора магнітної індукції і швидкістю руху провідника	град
16. ЕРС самоіндукції		
$\varphi_{si} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ $\Phi = LI$ $\varphi_{si} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}$	φ_{si} - ЕРС самоіндукції	В
	Φ - зміна магнітного потоку	Вб
	Φ - магнітний потік, що пронизує контур	Вб
	I - сила струму, що проходить в контурі	А
	L - індуктивність контуру	Гн
	ΔI - зміна сили струму	А
	t - час	с
17. Енергія магнітного поля струму		
$W_m = \frac{LI^2}{2}$	W_m - енергія магнітного поля струму	Дж
	I - сила струму	А
	L - індуктивність контуру	Гн

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ, ЩОДО ОПРАЦЮВАННЯ МАТЕРІАЛУ ТЕМ

З погляду на складність поняття магнітного поля, треба звернути особливу увагу на створення в учнів уявлення про його властивості і прояви. Для цього повною мірою треба використати вивчення магнітних спектрів прямого струму, витка і соленоїда. Важливо також теоретично проаналізувати і порівняти властивості магнітного та електричного полів, що характеризують різні сторони єдиного електромагнітного поля. У зв'язку з цим одним з найважливіших питань є формування в учнів поняття про закон електромагнітної індукції, магнітне коло, магнітний опір, закон повного струму. Ці поняття формують поступово при вивченні всіх тем з електромагнетизму. У підсумку учні повинні засвоїти, що для опису електромагнітних явищ, як і електричних в цілому, має бути сформована чітка структура логічних висновків, яка завершується відповідними законами.

Електромагнітні явища лежать в основі численних технологічних пристроїв, приладів і електромашин. Тому поряд з розповіддю викладача тут треба дуже широко використовувати покази технічних пристроїв, приладів і машин (реле, магнітні пускачі, електродвигуни і т.д.), а також демонструвати різні технічні моделі.

Розглянемо стисло основні поняття теми, що дозволить більш системно подати матеріал.

Взаємодія між електричними струмами, яку називають **магнітною**, відбувається через магнітне поле. Основною характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції $\vec{B}$.

Як **напрямок вектора магнітної індукції** взято напрям нормалі до рамки зі струмом, яка має змогу вільно орієнтуватися в магнітному полі. Цей напрям збігається з напрямом магнітної стрілки в полі, тобто з напрямом лінії, проведеної від південного полюса стрілки до північного.

Модуль вектора магнітної індукції визначається відношенням максимального моменту сил, що діють на рамку (контур) з боку магнітного поля, до добутку сили струму в ньому на його площу.

Лінії магнітної індукції охоплюють провідники зі струмом і завжди замкнені. Такі поля із замкненими лініями називають **вихровими**.

За законом Ампера на відрізок провідника зі струмом завдовжки dl з боку магнітного поля діє сила, модуль якої $F_A = BIl \sin \alpha$. А на рухому заряджену частинку діє **сила Лоренца** $F = |q_0| v B \sin \alpha$. Сила Лоренца перпендикулярна до швидкості частинки і тому не виконує роботи.

Усі тіла в магнітному полі намагнічуються, тобто самі створюють магнітне поле. Відношення вектора магнітної індукції в однорідному середовищі до магнітної індукції у вакуумі називають **магнітною проникністю**. Вона характеризує магнітні властивості речовини.

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

У більшості речовин магнітні властивості виражено слабо. Лише магнітна проникність феромагнітних тіл, до яких належать залізо, дуже велика ($\mu \gg 1$) і залежить від магнітної індукції. Хоч феромагнетиків у природі порівняно небагато, вони мають велике практичне значення, бо дають змогу в сотні разів збільшувати магнітну індукцію поля без затрат енергії.

В шкільній програмі розглядалися електричні і магнітні поля, що не змінюються у часі. Можна помітити багато подібного у природі цих полів, методах їх виявлення і характеристиках. Це дозволить, знаючи закони електростатики, постійного струму глибше засвоїти і закономірності електромагнетизму.

Подібно до того, як у просторі, який оточує нерухомі електричні заряди, виникає електричне поле, у просторі, який оточує струми, виникає поле, яке називають **магнітним**. Як електричне, так і магнітне поле є другим видом матерії поряд з речовиною. Електричне поле виявляється за дією на нерухомі заряди (одиночні пробні заряди), внесені в це поле, а магнітне - дією на струм (рухомі заряди).

Для дослідження магнітного поля використовують маленьку дрітчану рамку довільної форми, подібно до того, як для дослідження електричного поля використовували невелике заряджене тіло (пробний заряд). Магнітна стрілка, залізні ошурки (маленькі магнітики) дають змогу також виявити і дослідити магнітне поле.

Аналогом силової характеристики електричного поля - напруженості $\vec{E}$ є вектор магнітної індукції $\vec{B}$, що характеризує однорідне магнітне поле в кожній точці простору. Величина, що залежить від

значень вектора $\vec{B}$ не в одній точці, а в усіх точках поверхні, обмеженої плоским, замкненим контуром, називають **магнітним потоком** Φ . Магнітний потік можна витлумачити як величину, пропорційну кількості ліній магнітної індукції, що пронизують поверхню площею S .

Аналогії можна проводити і для трьох полів: гравітаційного, електричного, магнітного (табл. 1).

Таблиця 1 Характеристика фізичних полів

Параметр поля	Фізичне поле		
	Гравітаційне	Електростатичне	Магнітне
Властивість тіл, що створюють поле	Маса	Нерухомий заряд	Рухомий заряд
Пробне тіло	Матеріальна точка	Точковий заряд	Елемент струму
Характеристика поля (за властивостями тіл, що створюють поле)	$g = G \frac{M}{r^2}$	$E = k \frac{Q}{\epsilon r^2}$	–
Характеристика поля (за дією на пробне тіло)	$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$	$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{Il}$
Спосіб зображення поля	Силкові лінії	Силкові лінії	Силкові лінії
Робота сил поля	$A = mgDx$	$A = qEDx$	Не виконують

Ще Фарадей був упевнений в єдиній природі електричних і магнітних явищ. Електричний струм, міркував Фарадей, здатний намагнітити шматок заліза. Чи не спричиняє магніт, у свою чергу, електричний струм? З відкриттям явища електромагнітної індукції стало зрозумілим, що магнітне поле, яке змінюється в часі, породжує електричне поле, а змінне електричне поле породжує магнітне.

Явище електромагнітної індукції полягає у виникненні ЕРС індукції в замкненому контурі внаслідок зміни магнітного потоку через площу, обмежену цим контуром. За законом електромагнітної індукції Фарадея ЕРС індукції в замкненому контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку, взятій зі знаком мінус:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

За правилом Ленца індукційний струм, що виникає в замкненому контурі, протидіє зміні магнітного потоку, який спричинив цей струм.

У нерухомому провіднику сторонньою силою, що діє на заряди, є вихрове електричне поле, породжуване змінним магнітним полем, а у рухомому провіднику - магнітна сила Лоренца, що діє на заряджені частинки, які рухаються разом з провідником.

Важливим окремим випадком електромагнітної індукції є **самоіндукція**. Під час самоіндукції змінне магнітне поле індуктує ЕРС у тому самому провіднику, по якому проходить струм, що створює це поле.

Електрорушійна сила самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в провіднику:

$$\mathcal{E}_{si} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Коефіцієнт пропорційності **L** називають **індуктивністю**. Індуктивність залежить від розмірів і форми провідника, а також від властивостей середовища, в якому міститься провідник.

Її вимірюють в генрі:

$$1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}$$

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$

Енергія магнітного поля струму дорівнює роботі, яку має виконати джерело, щоб створити цей струм.

Ще більш "прозорим" стане цей навчальний матеріал, якщо збагнути його у логічній послідовності, запропонованій на рис.1.

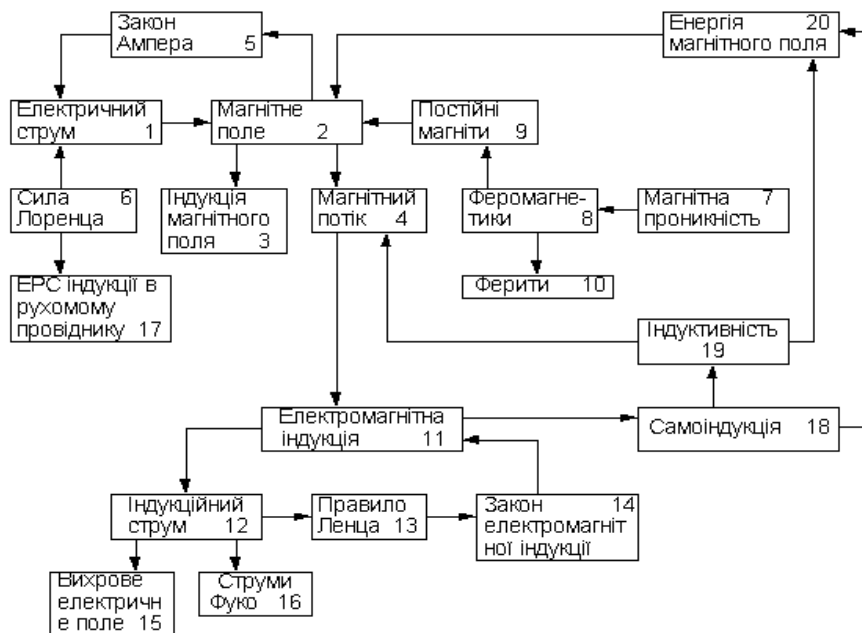


Рис.4.4.1.

ЯК СТВОРЮВАЛАСЯ КАРТИНА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ. ФАРАДЕЙ І МАКСВЕЛЛ

Близько 1800 р. Вольта винайшов «вольтів стовп» — джерело постійного струму. В 1820 р. Ерстед відкрив дію струму на магнітну стрілку. Через кілька місяців Ампер, виконавши аналогічний дослід, установив, що два паралельних провідники, по яких іде струм в одному напрямі, притягуються один до одного і відштовхуються, якщо струми мають протилежні напрями. Він дослідив також властивості соленоїда і створив прилад, який назвали гальванометром. Згодом Ампер установив взаємодію соленоїдів і помітив їх подібність до магнітів.

Тоді ж Араго відкрив явище намагнічування заліза струмом і збудував перший електромагніт.

Ця епоха великих відкриттів безпосередньо зв'язана з бурхливим прогресом у промисловості в період початкового розвитку й утвердження капіталізму після перемоги над феодалним способом виробництва. Різко збільшилась потреба в досконалішій техніці виробництва, транспорту, зв'язку. Учених цієї епохи цікавило кожне відкриття в галузі електрики, чи то — випадкове відкриття лікаря Гальвані й Ерстеда чи планомірні дослідження Ампера й Араго.

Плеяда першокласних учених, професорів провідних університетів Європи займається дослідженням і розв'язанням зовсім нових, проблем і крок за кроком проникає в невідомий світ електричних явищ і законів будови матерії. Серед цих блискучих імен виділяється ім'я видатного англійського фізика і хіміка Майкла Фарадея, ученого-самоука, який здобув у школі лише початкову освіту. Генію Фарадея належить ідея про електромагнітне поле, яку було покладено в основу всього дальшого розвитку фізики й техніки. Але спочатку звернемось до деяких епізодів його незвичайної біографії.

Один з грудневих днів 1812 р. Сер Гемфрі Деві щойно закінчив читати досить дивний лист. Якийсь юнак — учень палітурника, що підписався нікому на той час невідомим прізвищем Фарадей, повідомляв у листі, що він старанно відвідував курс популярних лекцій Деві в Королівському інституті. Він писав про своє палке бажання присвятити себе науковій діяльності. До листа були додані записи прослуханих лекцій, ретельно переписаних і власноручно опрацьованих автором листа.

- Ось лист одного юнака, на прізвище Фарадей; він слухав мої лекції й просить дати йому місце в інституті. Що мені з ним робити? - звернувся Деві до інститутського товариша Піпіса, який був під час читання листа.

- Що робити? Накажи йому мити пляшки, - відповів Піпіс. - Якщо він погодиться, то з нього будуть люди, а якщо ні, то з нього не буде пуття.

У березні 1813 р. на прохання Деві Фарадей дістає місце асистента в лабораторії Королівського інституту. Тут були виконані всі праці Фарадея, спочатку в галузі хімії, а з 1820 р. переважно в галузі електрики.

Відкриття Ерстедом дії струму на магнітну стрілку, яке набуло великого розголосу, викликало в учених великий інтерес, і захоплюючі відкриття в цій галузі йшли одно за одним. Араго показав, що залізні ошурки притягуються до мідного проводу, коли по ньому йде гальванічний струм. Повторюючи досліди Араго, Деві встановив, що ошурки, розсіпані на аркуші паперу, крізь який проходить перпендикулярно до аркуша провідник із струмом, розміщуються навколо проводу концентричними колами. У щоденнику його асистента Фарадея зроблений малюнок (Мал.213), який показує розміщення цих ошурків, - малюнок, який тепер можна побачити в будь-якому підручнику з фізики. Фарадей і сам виконав багато дослідів з магнітною голкою і провідником із струмом. Поводження магнітної стрілки наводило на думку: чи не можна дістати безперервне обертання магніту навколо проводу або змусити провідник із струмом обертатися навколо магніту? Здійсненню такого обертання заважало те, що магніт має два полюси. Фарадей винайшов спосіб усунути це утруднення. Малюнок 214 ілюструє досліди, які дають поняття про те, як це було зроблено. Дротина, підвішена на гачку іншої дротини, по якій підводиться струм, обертається (відхиляючись під дією, відцентрового ефекту) навколо полюса магніту. На другому малюнку показано, як магніт, що має на нижньому кінці платиновий тягарець, вертикально плаває в ртуті навколо провідника із струмом. В обох випадках другий полюс магніту, як більш віддалений, не чинить протилежної дії. Описані два досліди містять у собі основні ідеї взаємодії електрики і магнетизму: замкнута магнітна лінія і замкнутий контур струму («вихор», за висловленням самого Фарадея) в обох випадках є ніби двома ланками одного ланцюга.

У 1827 р. Фарадей дістав професорську кафедру в Королівському інституті. Про величезну працездатність Фарадея можна зробити висновок з його друкованої праці «Експериментальні дослідження з електрики», яка виходила в світ окремими серіями з 1831 по 1865 р. Видання складалося з 30 серій. Воно засвідчило вміння Фарадея працювати систематично. Питання, які підлягали дослідженню, він записував на окремих аркушах, і потім поступово їх розв'язував. Власноручні нотатки Фарадея до його праць акуратно пронумеровані. Останній параграф до «Експериментальних досліджень» має №... 16 041!

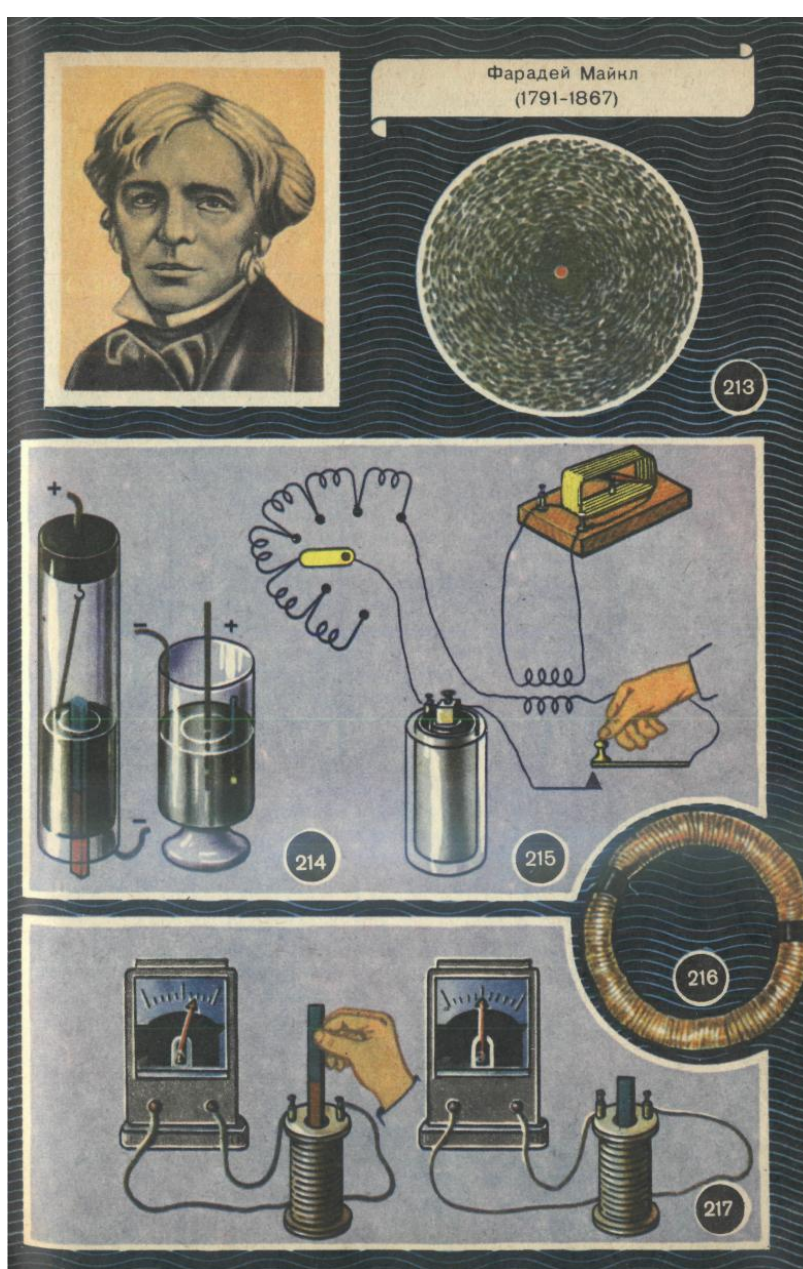
Переконання в єдності сил природи - основна риса світогляду Фарадея. Через десять років після дослідів Ерстеда, **29 серпня 1831 р.**, Фарадеєві вдалося на досліді спостерігати явище електромагнітної індукції під час зміни струму. При розмиканні струму, що проходить через дрітну котушку, виникав короточасний струм у паралельно поставленій другій котушці, що можна було помітити за слабкими відхиленнями стрілки гальванометра. У момент замикання струму в першій котушці в другій котушці знову виникав струм, але протилежного напрямку. Малюнок 215 дає схему дослідів (насправді обидві котушки були намотані на одне спільне дерев'яне осердя). Введення всередину котушок залізного осердя різко підсилювало спостережуване явище. На малюнку 216 ви бачите «кільце Фарадея»: на залізному кільці намотано дві котушки ізольованого дроту.

17 жовтня 1831 р. Фарадей виконав поставлене перед собою завдання - «перетворити магнетизм в електрику». «...Магніт відразу було внесено в котушку. Стрілка гальванометра показала миттєве відхилення... Якщо магніт залишався всередині котушки, то стрілка знову приходила в своє попереднє положення й при вийманні його відхилялась у протилежному напрямі» (мал. 217). Такими словами Фарадей описав зроблене ним видатне відкриття.

Історичний дослід з кільцем Фарадея виконують тепер у будь-якій школі: замикання струму в одній обмотці намагнічує залізне кільце. Виходить так, ніби в другу обмотку раптом вносять магніт. Розмикання струму супроводиться розмагнічуванням осердя, що відповідає вийманню магніту.

Першим після Кавендіша, праці якого ще не були опубліковані, Фарадей звернув увагу на істотний вплив середовища на електричні явища і взаємодії, які відбуваються в ньому. Фарадей заперечував можливість взаємодії на відстані й твердив, що вона відбувається через якесь середовище («світовий ефір»).

Учені - сучасники Фарадея були далекі від такого пояснення явища електромагнітної індукції. Здавалося природним, що дія одного тіла на друге може передаватися на великі відстані й до того ж умить. У більшості вчених не виникало ще й сумніву про можливість такого передавання без якого-небудь посередника.



Вводячи поняття поля й заперечуючи теорію далекодії, Фарадей був переконаний у матеріальності силових ліній, які йдуть від магніту або зарядженого провідника. Для нього силові лінії були не просто графічним зображенням дії сил, а такими, що реально існують і заповнюють увесь простір навколо магніту або зарядженого провідника.

Згодом Максвелл ідеї Фарадея втілював у математичну форму. Він високо оцінив ідеї Фарадея за прихований у них глибокий математичний зміст, за точність і логічність його означень. «Коли я став заглиблюватись у вивчення праць Фарадея,- пише він,- я помітив, що метод його розуміння також математичний, хоч і не поданий в умовній формі математичних символів. Я також виявив, що метод можна виразити в звичайній математичній формі і таким чином порівняти з методами визначних математиків».

На протилежність Фарадею Максвелл, син заможних батьків, здобув найкращу освіту, яку можна було тоді здобути в Англії. Обдарований винятковими математичними здібностями, він, ще навчаючись у середній школі, надіслав до королівського товариства в Лондон свою першу працю з геометрії. У 25

років Максвелл — професор фізики в Абердіні (Шотландія), а з 1860 по 1865 р. у Королівському коледжі в Лондоні.

У 1873 р. вийшов у світ знаменитий «Трактат з електрики і магнетизму» - плід восьмирічної праці Максвелла. У трактаті викладено нову теорію електромагнітного поля. Виведені Максвеллом рівняння покладені в основу сучасної електро- і радіотехніки.

На жаль, щоб зрозуміти математичну форму рівнянь Максвелла, треба мати відповідну підготовку. Це не дає можливості тут показати всю глибину і витонченість закладених у рівняннях ідей. Вражений внутрішньою і зовнішньою красою математичної форми рівнянь Максвелла, німецький фізик Больцман своє захоплення висловив віршами, які починаються фразою:

War es ein Gott der diese Zeichen schrieb?..»

(«А чи не бог ці знаки написав?..»)

З чотирьох рівнянь Максвелла, які звичайно подають у підручниках вищої школи, спинимося на двох, що безпосередньо стосуються електротехніки.

Для електромагнітного поля (коли немає провідників) їх можна записати так:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ — рівняння електрорушійної сили;}$$

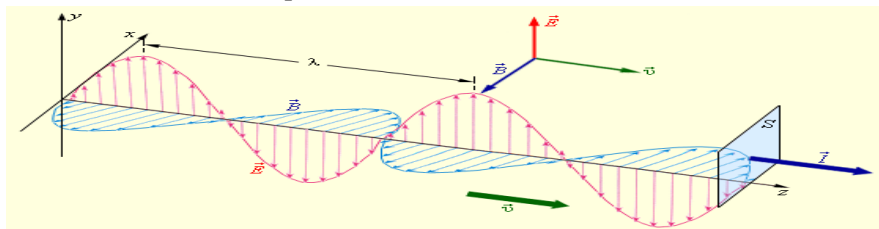
$$\oint \mathbf{H} \cdot d\vec{l} = \frac{dN}{dt} \text{ — рівняння магніторушійної сили,}$$

Де E – напруженість електричного поля на ділянці dl , H - напруженість магнітного поля на ділянці dl , Φ – потік магнітної індукції, t - час.

Впадає в око симетричний характер рівнянь, які встановлюють: перше – зв'язок електричних і магнітних явищ; друге – аналогічний зв'язок магнітних явищ з електричними. Фізичну суть цих рівнянь можна популярно охарактеризувати такими двома положеннями:

1. Зміна електричного поля завжди супроводиться магнітним полем.
2. Змінюване магнітне поле завжди супроводиться електричним полем.

Замкненість магнітних і електричних силових ліній електромагнітного поля – дуже важливе положення в теорії Максвелла.



Наука ХХ ст. остаточно відкинула суперечливе поняття світлового ефіру, хоч у розмовній мові й досі збереглися вислови «хвилі ефіру», «передача в ефірі», коли йдеться про радіомовлення і коли по суті ми маємо справу з коливальними явищами в електромагнітному полі.

Максвеллові не вдалося дожити до того часу, коли його ідеї дістали практичне підтвердження, він помер у розквіті творчих сил у 1879 р., коли йому було 48 років.

У 1888 р. Герц експериментально дістав електромагнітні хвилі, у 1895 р. О. С. Попов застосував електромагнітні хвилі для передавання і приймання сигналів без проводів.

Основні властивості магнітного поля:

- 1) магнітне поле породжується електричним струмом (рухомими зарядами);
- 2) магнітне поле виявляється за дією на електричний струм (рухомі заряди);
- 3) як і електричне, магнітне поле існує реально незалежно від знань про нього. Це підтверджується існуванням електромагнітних хвиль.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

1. Класифікація магнітних кіл. Елементи магнітного кола

Магнітна система є одним із основних елементів електричних машин і багатьох електротехнічних пристроїв. До **магнітної системи** входять джерела магнітного поля (обмотки зі струмом, які збуджують магнітне поле, постійний магніт, що застосовують у вимірювальних приладах, лічильниках, тощо) і система магнітопроводів із феромагнітного матеріалу, по яких проходить магнітний потік.

Магнітні кола бувають не розгалужені і розгалужені, однорідні і неоднорідні, симетричні і несиметричні.

Нерозгалуженим магнітним колом називають коло, через елементи якого замикається один і той же магнітний потік.

У **розгалуженому** магнітному колі є вітки, в кожній з яких замикаються свої магнітні потоки.

В **однорідному** магнітному колі, утвореному замкненим магнітопроводом, магнітний потік знаходиться в однорідному середовищі.

Неоднорідним називають магнітне коло, яке складається з ділянок, які мають різні перерізи, повітряні зазори, феромагнітні поля з різними магнітними властивостями ($\mu > 1$, $\mu < 1$, $\mu \gg 1$).

Основні феромагнетики: залізо (Fe), кобальт (Co), нікель (Ni), рідкоземельні елементи : гадоліній (Gd), диспрозій (Dy) та ін.

Магнітом'які: технічно чисте залізо, сплави заліза і нікелю (пермалої) тощо. Вони розмагнічуються навіть в магнітному полі Землі. Мають малу коерцитивну силу.

Магнітотверді також виготовляють із сплавів на основі заліза, але за спеціальною технологією. Вони відрізняються великою коерцитивною силою H_c і широкою петлею гістерезису.

Коерцитивною силою називають силу, яка прагне зберегти створену мікрострумами намагніченість.

Деякі речовини під дією напруженості зовнішнього магнітного поля H створюють власне магнітне поле, що називається намагніченістю, яка характеризується магнітною сприйнятністю (магнітною проникністю). Якщо після намагнічення до стану насичення зовнішнє магнітне поле забрати (або зменшити до нуля), то матеріал може лишитись маючи своє магнітне поле за рахунок намагніченості – залишкова намагніченість.

Залежність магнітної індукції у речовині (матеріалі) від напруженості зовнішнього магнітного поля (B від H , $B(H)$) носить нелінійний характер: по мірі збільшення H індукція B спершу зростає різко, а потім, наближаючись до області насичення процес намагнічення сповільнюється і припиняється, коли резерви феромагнетика є вичерпані (петля гістерезису).

Магнітна проникність. Для характеристики поведінки магнітних матеріалів у полі з напруженістю H користуються поняттями абсолютної магнітної проникності μ_a і відносної магнітної проникності μ :

$$\mu_a = B/H,$$

$$\mu = B/(\mu_0 H) = \mu_a/\mu_0,$$

де μ_a , — абсолютна магнітна проникність, Гн/м; μ_0 — магнітна постійна, яка дорівнює 1,257 мкГн/м.

Підставляючи в ці співвідношення конкретні значення B і H , одержують різні види магнітної проникності, які використовують у техніці. Найчастіше використовують поняття нормальної μ , початкової μ_p , максимальної $\mu_{\max}$ диференціальної $\mu_{\text{диф}}$ та імпульсної μ_i магнітної проникності. Відносну магнітну проникність матеріалу μ одержують по основній кривій намагнічування. Для простоти слово «відносна» не згадується. Магнітну проникність при $H = 0$ називають початковою магнітною проникністю μ_p , її значення визначають при дуже слабких полях (приблизно 0,1 А/м).

Максимум на кривій проникності, що відповідає другій частині ділянки кривої намагнічування, характеризується значенням максимальної магнітної проникності $\mu_{\max}$. Початкова і максимальні магнітні проникності являють собою окремі випадки нормальної магнітної проникності, їх значення

поряд з B_s , B_c і H_c є важливими параметрами магнітного матеріалу. В сильних полях в області насичення магнітна проникність наближається до одиниці.

2. Магнітний опір.

Величина магнітного потоку електромагніту залежить від кількості витків та якості його магнітного кола.

Магнітним колом називається шлях, по якому замикається магнітний потік. Магнітне коло володіє певним магнітним опором.

Магнітний опір залежить від магнітної проникності середовища, через яке проходить магнітний потік. Чим більша магнітна проникність середовища, тим менший його магнітний опір.

Оскільки магнітна проникність феромагнетика у багато разів більша магнітної проникності повітря, тому вигідніше робити електромагніти так, щоб їх магнітне коло не мало в собі повітряних ділянок.

Чим менша магнітна проникність, тим більший його магнітний опір.

Добуток величини струму на число витків обмотки називають магніторушійною силою (МРС). (Вимірюють числом ампервитків)

Дія МРС аналогічна дії ЕРС в електричному колі. Аналогічно, як е.р.с. є причиною виникнення електричного струму, так і МРС є причиною виникнення магнітного потоку в електромагніті.

Так як в електричному колі зі збільшенням ЕРС збільшується сила струму, так і в магнітному колі зі збільшенням МРС збільшується магнітний потік.

Однак аналогія електричних і магнітних кіл формальна. По своєму внутрішньому стану вони суттєво різні: ЕРС джерела існує і залишається сталою при будь-якому режимі електрокола (при холостому ході, номінальному режимі, короткому замиканні тощо), а МРС – завжди пов'язана з існуванням магнітного потоку.

Дія магнітного опору аналогічна дії електричного опору кола: як зі збільшенням опору електричного кола зменшується сила струму в колі, так і в магнітному колі зі збільшенням магнітного опору зменшується його магнітний потік. Залежність магнітного потоку від МРС і його магнітного опору може бути виражена формулою, аналогічно закону Ома в електричному колі:

Магнітний потік = МРС / магнітний опір

3. Закон повного струму

Цей закон визначає залежність напруженості магнітного поля від сили струму, що збуджує це поле. Властивість струму збуджувати магнітне поле називають намагнічуючою силою або магніторушійною силою.

В практичній системі СІ і раціоналізованій системі рівнянь електромагнетизму МРС приймають чисельно рівною силі струму, що збуджує це магнітне поле. А відповідно МРС (НС) провідника струму дорівнює цьому струму: $F = I$

Закон повного струму виведений на основі багаточисельних дослідів. Згідно цього закону інтеграл від напруженості магнітного поля по будь-якому замкненому контуру (циркуляція вектора напруженості) дорівнює алгебраїчній сумі струмів, з'єднаних в цьому контурі:

$$\oint H = \sum I; \quad I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

Для збудження сильних магнітних полів часто застосовують котушки із ізольованого проводу. Так як намагнічуюча сила одного витка рівна його силі струму I , то намагнічуюча сила котушки, в якій струм проходить по w витках буде рівною $I w$ ампер (часто говорять ампер-витків).

У відповідності з законом повного струму напруженість магнітного поля H слід розглядати як МРС, що припадає на одиницю довжини магнітної лінії (подібно того, як напруженість E електричного кола виражається ЕРС чи напругою, що припадає на одиницю довжини шляху струму).

Закон повного струму для провідника по якому проходить струм:

$$H = I / 2 \pi x$$

Де x - відстань від провідника до точки магнітного поля створеного цим струмом.

Закон повного струму для тороїда: $H = I w / 2 \pi R$

де R - радіус тороїда.

В більшості електропристроїв напруженість магнітного поля вздовж магнітної лінії змінюється в залежності від умов ділянок, через які вона проходить. В цих умовах шлях магнітного потоку (магнітне коло) ділиться на n ділянок, в межах кожного із яких можна рахувати напруженість поля H_k – постійною. Це дає можливість у виразі закону повного струму зробити заміну інтегралу інтегральним сумуванням:

$$H_k l_k = I n$$

Тобто згідно закону повного струму МРС (НС) рівна сумі добутків напруженості поля на довжину відповідних ділянок магнітного кола, а в простішому випадку – добутку напруженості магнітного поля на довжину магнітної лінії. Цей добуток часто називають магнітною напругою:

$$Hl = I n$$

В приведеній загальній формі закон повного струму широко використовується для розрахунку магнітних кіл електромашин і електроапаратів.

При аналізі і розрахунках магнітних кіл приймають наступні допуски:

- не враховується випучення ліній магнітної індукції в повітряних зазорах;
- не враховують викривлення цих ліній у вузлах розгалуження магнітних потоків та місцях різких згинів магнітного кола;
- приймають, що конфігурація ліній магнітної індукції співпадає з конфігурацією магнітного кола;
- приймають, що в усіх точках площі поперечного перерізу будь-якої ділянки магнітного кола, напруженості магнітного поля, а отже, і магнітні індукції мають одне і те ж значення.

Враховуючи це, при аналізі і розрахунках магнітних кіл вибирають контури, що співпадають зі середньою лінією магнітної індукції (див. роздатковий матеріал).

Велике значення має правильно вибраний додатній напрям магнітних потоків і напруженості магнітного поля, так як від них вибирають знаки перед вказаними величинами в рівняннях. (Додатні напрямки на розрахункових кресленнях вказані стрілками).

Аналогія до законів Кірхгофа в електричному колі:

1. I закон К. Алгебраїчна сума магнітних потоків, що сходяться в будь-якому вузлі магнітного кола, дорівнює нулю.

$$\sum \Phi = 0$$

2. II закон К. Алгебраїчна сума спадів магнітних напруг в будь-якому замкнутому контурі магнітного кола, дорівнює алгебраїчній сумі магніторушійних сил в контурі:

$$\sum Hl = \sum U_m$$

4. Методичні вказівки щодо застосування основних законів магнітних кіл при розрахунках і аналізі .

Нехай маємо деяке магнітне коло (рис. 6.8, а), що має кілька ділянок із феромагнітного матеріалу з різними площами поперечного перерізу ($S_1, S_2, \dots$) і довжинами ($l_1, l_2, \dots$). Ділянки l_1 і l_4 , l_2 і l_3 розділені повітряними зазорами. Магнітні поля, які виникають під дією МРС обмоток, прийнято підрозділяти на основні поля, що характеризуються основними магнітними потоками Φ_1 , Φ_2 і Φ_3 , і на поля розсіювання, що характеризуються деякими еквівалентними магнітними потоками розсіювання Φ_{p1} і Φ_{p2} .

Основними називають магнітні поля, лінії магнітної індукції яких по всій довжині проходять по магнітопроводу.

Лінії магнітної індукції полів розсіювання замикаються навколо витків відповідних котушок, проходять в більшості по повітрю і не перетинають витків інших котушок.

Еквівалентний магнітний потік розсіювання можна визначити наступним чином:

$$\Phi_p = w' \Phi' + w'' \Phi'' + \dots / w = \Psi_p / w$$

Де Φ' , Φ'' і т.д. – магнітні потоки поля розсіювання, що пронизують частини w' , w'' і т.д. загального числа витків w обмотки. Величина $\Psi_p = w' \Phi' + w'' \Phi'' + \dots$ називається потокотцепленням обмотки.

Якщо ступінь насичення феромагнітного матеріалу і повітряного зазору невеликі, то еквівалентні магнітні потоки розсіювання можна не враховувати і магнітний потік по всій довжині вважаємо однаковими. Крім цього при аналізі і розрахунку магнітних кіл приймають зазвичай наступні (вищевказані) допуски:

- не враховують випучення ліній магнітної індукції у повітряних зазорах та їх викривлення у вузлах розгалужень потоків і місцях різких згинів магнітного кола, рахуючи, що конфігурація ліній магнітної індукції співпадає з конфігурацією магнітного кола;
- приймають, що в усіх точках площі поперечного перерізу будь-якої ділянки магнітного кола напруженість магнітного поля, а отже і магнітні індукції мають одне і те ж значення.

Для аналізу вибирають контури, які співпадають із середньою лінією магнітної індукції та додатній напрям магнітного потоку, який вказують на кресленнях стрілками.

В цілому при аналізі і розрахунках магнітних кіл велике значення має не лише додатній напрям магнітного потоку, а і додатній напрям напруженостей магнітного поля, так як в залежності від них вибирають знаки перед вказаними величинами в рівняннях.

У випадку однієї намагнічуючої обмотки, за додатній напрям магнітного потоку приймають напрям, що пов'язують правилом «свердлика» з додатнім напрямом струму намагнічуючої котушки. Коли ж додатній напрям магнітного потоку визначити тяжко, що буває при наявності кількох намагнічуючих обмоток, напрям визначають довільно. Про дійсний напрям магнітного потоку дізнаються в результаті повного аналізу чи розрахунку.

За додатній напрям магнітних індукцій магнітного поля слід приймати, очевидно, напрям, що співпадає з додатнім напрямом відповідних магнітних потоків. Враховуючи це на розрахункових кресленнях нема потреби вказувати додатні напрями магнітних потоків, індукцій, напруженостей, а достатньо вказати лише додатній напрям магнітних потоків.

Магнітні потоки, що входять до вузла розгалуження потоків мають знак «+», а ті що виходять з вузла розгалуження – «-», або навпаки.

Наприклад на рис. 6.8, в напрямки потоків для вузла «а» становлять:

$$\sum \Phi = 0; \quad \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

При аналізі і розрахунках магнітних кіл поряд з I з. Кірхгофа використовують і закон повного струму, який в застосуванні до магнітних кіл відповідним чином також видозмінюється. Так для контура $bmkanb$ при обході за годинниковою стрілкою

$$\int H \cos \alpha \, dl = I_1 w_1 - I_2 w_2$$

Замінивши інтеграл сумою інтегралів по ділянках і врахувавши, що в межах будь-якої ділянки з однією площею поперечного перерізу $H = \text{const}$, а також що на ділянках де додатній напрям напруженості H співпадає з напрямком обходу контура $\cos \alpha = 1$, а де не співпадає – $\cos \alpha = -1$, отримаємо:

$$H_1 l_1 + H_{\sigma 1} l_{\sigma 1} + H_4 l_4 - H_2 l_2 - H_{\sigma 2} l_{\sigma 2} - H_5 l_5 = I_1 w_1 - I_2 w_2$$

В загальному вигляді, для будь-якого замкнутого контуру магнітного кола, закон повного струму буде мати вигляд:

$$\sum H l = \sum I w$$

Зі знаком «+» слід брати напруженості, додатній напрям яких співпадає з напрямом обходу контуру, і струми, додатні напрями яких співпадають з напрямом обходу контуру правилом правого гвинта.

Оскільки напруженість H можна розглядати як відносну МРС, яка необхідна для створення магнітного потоку на одиниці довжини контура інтегрування, то очевидно добуток Hl можна розглядати як МРС, що необхідна для створення магнітного потоку на ділянці магнітного кола довжиною l . Величину Hl називають різницею скалярних магнітних потенціалів і інколи магнітною напругою:

$$Hl = U_m$$

На ділянках магнітного кола, що не мають намагнічуючої обмотки, додатній напрям магнітної напруги співпадає з напрямом напруженості.

Якщо у загальному виразі закону повного струму $\sum I = 0$ подати подібно до алгебраїчної суми ЕРС, а $\sum H l = \sum U_m$ – алгебраїчною сумою напруг в електричному колі, то вираз $\sum H l = \sum I w$ інколи і називають другим законом Кірхгофа для магнітного кола.

Даний вираз можна застосовувати і до замкнутого в геометричному сенсі контуру. Це значить, що частина контуру може проходити по стрілці, яка вказує додатній напрям магнітної напруги між певними точками на контурі. Ця особливість дозволяє легко знайти магнітну напругу між точками магнітопроводу, що нас цікавлять.

Приклад. Необхідно знайти напругу між точками k і b (рис.6.8,в).

Вибираємо додатній напрям магнітної напруги U_{mkb} (як показано на рис.) і обходячи контур $abka$ за годинниковою стрілкою, отримуємо:

$$H_3 l_3 - U_{mkb} + H_{\sigma 1} l_{\sigma 1} + H_4 l_4 = 0$$

$$\text{Звідки } U_{mkb} = H_3 l_3 + H_{\sigma 1} l_{\sigma 1} + H_4 l_4$$

Для визначення U_{mkb} можна скористатись контурами $bmkb$ і $bkanb$.

Так при обході за годинниковою стрілкою контура $bmkb$ знайдемо, що

$$U_{mkb} = I_1 w_1 - H_1 l_1$$

Слід відмітити, що коли у виразі магнітної напруги $U_m = H l$ замінити H на B/μ_a , а B – на Φ/S , то отримуємо

$$U_m = \Phi R_m$$

де $R_m = l/\mu_a S$ – магнітний опір ділянки магнітного кола.

Цей вираз є аналогом закону Ома для пасивної ділянки електричного кола.

5. Послідовність розрахунків

Задача1. Визначити МРС і струм обмотки, якщо в повітряному зазорі магнітного кола (рис. 6.9, а) необхідно отримати $B_{\sigma} = 1,4$ Тл. Число витків обмотки $w = 1000$, крива намагнічення сталі приведена на рис 6.9.б

Розв'язок. Розбивши магнітне коло на ділянки, знаходимо їх довжини і площі поперечного перерізу: $l_1 = 252,2$ мм, $S_1 = 1200$ мм², $l_2 = 117,5$ мм, $S_2 = 800$ мм², $l_3 = 50$ мм,

$$S_3 = S_{\sigma} = S_4 = 600 \text{ мм}^2, l_4 = 83 \text{ мм}, l_{\sigma} = 2 \text{ мм}$$

Обрахунки проводимо в системі СІ. Обрахуємо магнітний потік і магнітні індукції:

$$\Phi = B_{\sigma} S_{\sigma} = 1,4 * 600 * 10^{-6} \text{ Вб}$$

$$B_1 = \Phi / S_1 = 0,7 \text{ Тл, аналогічно } B_2 \approx 0,93 \text{ Тл; } B_3 = B_4 = B_{\sigma} = 1,4 \text{ Тл}$$

$$\text{За кривою намагнічення знаходимо } H_1 = 3 \text{ А/см} = 300 \text{ А/м}, H_2 = 400 \text{ А/м},$$

$$H_3 = H_4 = 3000 \text{ А/м.}$$

Напруженість магнітного поля в повітряному зазорі:

$$H_{\sigma} = B_{\sigma} / \mu_0 = 1,4 / 4\pi * 10^{-7} = 112 * 10^4 \text{ А/м.}$$

Визначимо МРС і струм обмотки:

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 (l_3 + l_4) + H_{\sigma} l_{\sigma} = 300 * 252,5 + 400 * 117,5 + 3000 * 133 + 112 * 10^4 * 2 * 10^{-3} = 75,8 + 47 + 399 + 2240 = 2762 \text{ А.}$$

$$\text{Або } Iw = \sum H_{ct} l_{ct} + H_{\sigma} l_{\sigma} = 522 + 2240 = 2762 \text{ А, тобто } I = Iw / w = (\sum H_{ct} l_{ct} + H_{\sigma} l_{\sigma}) / w = I_{ct} + I_{\sigma} = 0,522 + 2,24 = 2,762 \text{ А.}$$

Як видно, не дивлячись на малий повітряний зазор, найбільша складова МРС і струму обмотки необхідні для створення магнітного потоку саме у повітряному зазорі.

Задача2. Розглянемо послідовність розв'язування зворотної задачі.

Припустимо, що в тому ж магнітному колі (див. рис 6.9.а) треба знайти магнітний потік Φ_x при заданій МРС (Iw)_x

Розв'язок. Дати відповідь шляхом однократного застосування рівняння

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_{\sigma} l_{\sigma} + H_4 l_4 = Iw \text{ не є можливим, оскільки воно містить чотири невідомі величини: } H_1, H_2, H_3 = H_4, H_{\sigma}.$$

Зворотні задачі рішають в такому порядку:

- 1) задаються декількома значеннями магнітного потоку i , виконавши декілька разів пряму задачу, знаходять відповідні цим потокам МРС обмотки;
- 2) будують магнітну характеристику, що являє собою залежність магнітного потоку від МРС обмотки $\Phi(I_w)$ (мал. 6.9, в);
- 3) користуючись магнітною характеристикою, знаходять магнітний потік Φ_x за заданою МРС $(I_w)_x$.

Найбільший магнітний потік, який слід розглядати, можна визначити з розрахунку, що $H_1=H_2=H_3=H_4=0$, а задана МРС витрачається лише на створення магнітного потоку в повітряному зазорі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

Запитання для перевірки та контролю знань учнів з тем:

«Взаємодія струмів. Магнітне поле. Індукція магнітного поля. Закон Ампера. Сила Лоренца»

1. Що називають магнітним полем? Які його основні властивості?
2. Як взаємодіють між собою паралельні струми? Чим викликається їх взаємодія?
3. Назвіть правила, що визначають напрям магнітного поля (ліній магнітної індукції)? Поясніть, як користуватися кожним правилом.
4. Як визначають модуль вектора магнітної індукції? Якими формулами його виражають?
5. У яких одиницях вимірюють магнітну індукцію в СІ? Сформулюйте визначення цієї одиниці.
6. Що називають лініями магнітної індукції?
7. Які поля називають вихровими?
8. Що встановлює закон Ампера?
9. Виконайте рисунок і опишіть дослід, за допомогою якого можна перевірити справедливості закону Ампера.
10. Чому дорівнює модуль сили Ампера?
11. Сформулюйте правило, що дозволяє визначити напрям сили Ампера.
12. Наведіть приклади практичного використання сили Ампера.
13. Яку силу називають силою Лоренца?
14. Запишіть формулу для визначення сили, з якою магнітне поле діє на заряд, що рухається в ньому.
15. Як рухається заряджена частинка в однорідному магнітному полі у випадку, коли напрям швидкості перпендикулярний до вектора магнітної індукції? Не перпендикулярний?
16. Чому сила Лоренца не змінює модуля швидкості зарядженої частинки?
17. Наведіть формулу радіуса руху зарядженої частинки в однорідному магнітному полі.
18. За якою формулою визначають період обертання зарядженої частинки по колу в однорідному магнітному полі?
19. Наведіть приклади практичного використання сили Лоренца.

Запитання для перевірки та контролю знань учнів з тем:

«Магнітний потік. Явище електромагнітної індукції. Закон електромагнітної індукції. Правило Ленца»

1. Що називають магнітним потоком (відповідь проілюструйте рисунком)? Магнітний потік величина скалярна чи векторна?
2. Як впливає розміщення поверхні, через яку проходить магнітний потік, на значення і знак цього потоку? Яка формула враховує цей вплив?
3. Який зв'язок кількості ліній індукції з модулем магнітного потоку?
4. Установіть одиницю магнітного потоку в СІ і сформулюйте визначення цієї одиниці.
5. У чому полягає сутність явища електромагнітної індукції?
6. Поясніть рисунками й опишіть експерименти, у яких спостерігається явище електромагнітної індукції.
7. Які умови потрібні для існування явища електромагнітної індукції?
8. Яке поле називають індукційним чи вихровим електричним полем?
9. Що є джерелом індукційного електричного поля?
10. Які відмінні властивості має індукційне електричне поле порівняно з магнітним полем? Стаціонарним чи електростатичним полем?
11. Що таке струми Фуко? Наведіть приклади використання їх у техніці. У яких випадках вони шкідливі?
12. Як напрямлене вихрове електричне поле відносно напрямку струму в провіднику під час збільшення і зменшення сили струму?
13. Що називають ЕРС індукції?
14. Яка формула виражає основний закон електромагнітної індукції?

15. Яка природа ЕРС індукції, що виникає в нерухомому контурі під час зміни магнітного поля, у якому знаходиться цей контур?
16. Виконавши рисунок, поясніть, як можна визначити напрям індукційного струму в нерухомому контурі залежно від характеру зміни магнітного потоку. Як формулюють правило Ленца?
17. Запишіть формулу, за якою визначають значення ЕРС індукції в прямолінійному провіднику, що рухається, перетинаючи лінії індукції однорідного магнітного поля.
18. Як визначають напрям індукційного струму в прямолінійному провіднику, що рухається в однорідному магнітному полі? Як формулюється правило правої руки?

Запитання для перевірки та контролю знань учнів з тем:

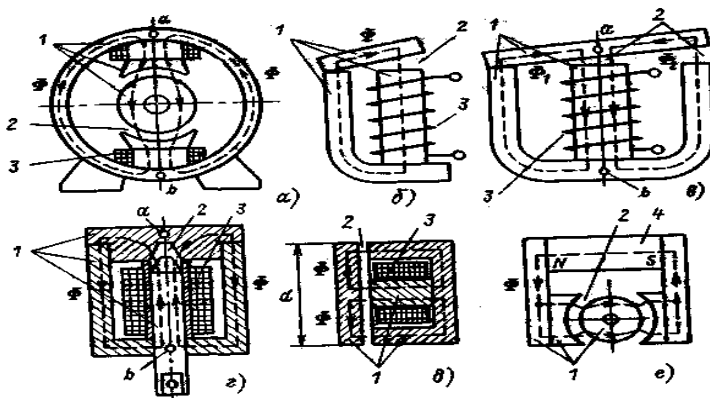
«Явище самоіндукції. Індуктивність. Енергія магнітного поля»

1. Що називають явищем самоіндукції?
2. Намалюйте схему досліду і поясніть явище самоіндукції під час замикання і розмикання кола. Побудуйте графіки залежності струму в колі від часу в цих дослідах.
3. Запишіть формулу, за якою визначають ЕРС самоіндукції.
4. Що називають індуктивністю провідника? Який фізичний зміст індуктивності?
5. Запишіть формулу ЕРС самоіндукції з урахуванням індуктивності, за нею знайдіть формулу індуктивності провідника.
6. Виведіть одиницю індуктивності в СІ і сформулюйте визначення цієї одиниці.
7. Чому для створення струму в провіднику з індуктивністю L має виконуватися робота? За рахунок якої енергії вона виконується?
8. Запишіть формулу енергії магнітного поля провідника зі струмом.
9. Що називають об'ємною густиною енергії магнітного поля? Який вигляд має формула для об'ємної густини енергії магнітного поля в СІ?

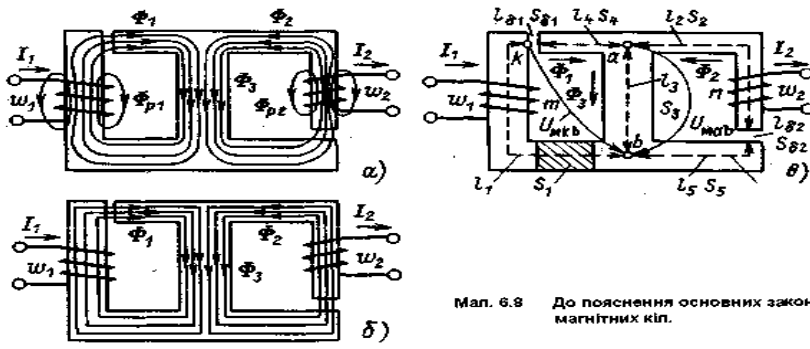
Запитання для перевірки та контролю знань учнів з тем:

«Класифікація магнітних кіл. Елементи магнітного кола. Магнітний опір. Закон повного струму»

1. Які бувають магнітні кола?
2. Які магнітні кола називають однорідними?
3. Чим відмінні однорідні і неоднорідні магнітні кола?
4. Яке магнітне коло вважають розгалуженим?
5. Що входить до магнітної системи приладу?
6. Що розуміють під намагніченістю і чим вона характеризується?
7. Чи є аналогія між електричними і магнітними колами і в чому вона виражена?
8. Що таке магнітний опір і від чого він залежить?
9. Що виражає МРС?
10. Закон повного струму та його визначення в системі СІ?
11. Як визначається закон повного струму для провідника?
12. Як визначається закон повного струму для соленоїда?
13. Які припущення треба враховувати при розрахунках магнітопроводів?
14. Що треба розуміти під магнітною напругою?



Мал. 6.1. Приклади магнітних кіл: а - машини постійного струму; б - електромагнітних реле; в і д - торіозних електромагнітів; е - магнітоелектричного вимірювального приладу



Мал. 6.8 До пояснення основних законів магнітних кіп.

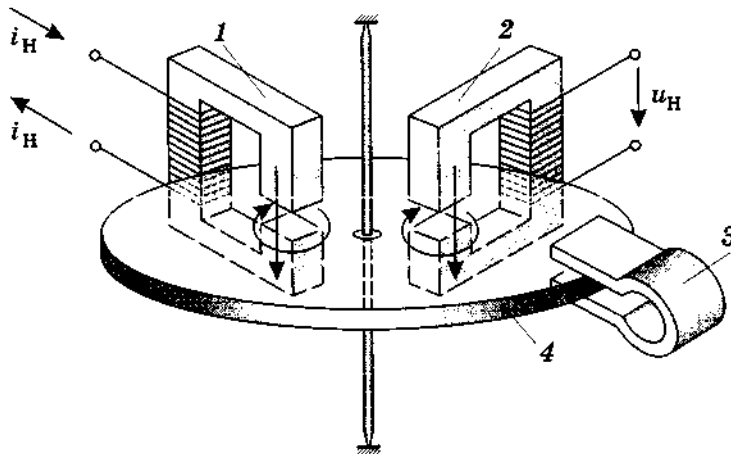
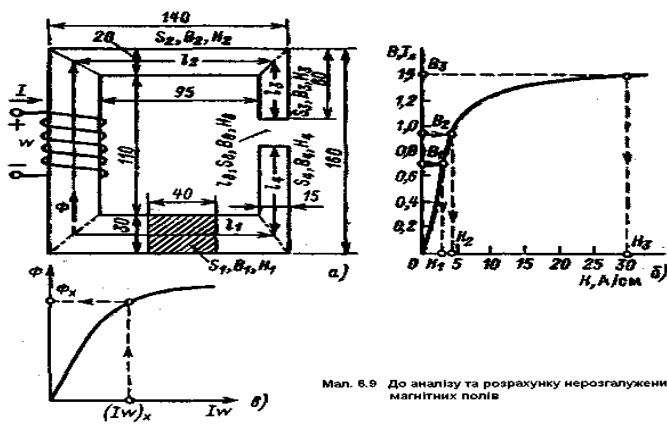


Рис. 5.17



Мал. 6.9 До аналізу та розрахунку нерозгалужених магнітних полів

Вимірювання електричної потужності і енергії

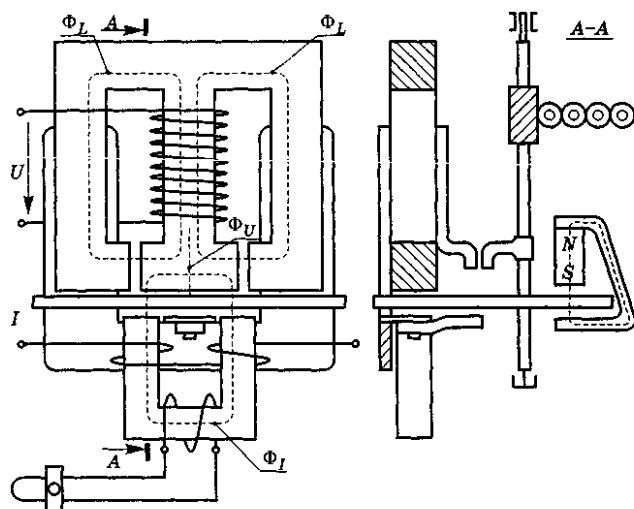
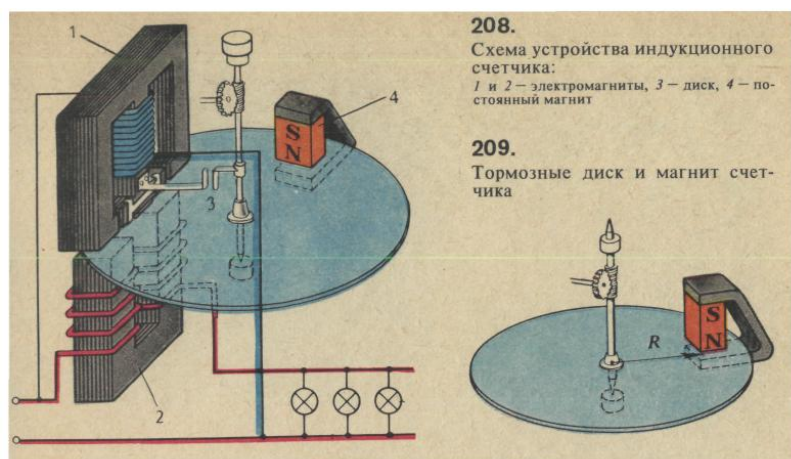


Рис. 6.46



Використана література:

1. ПУЕ
2. ПБЕЕС
3. ПТЕЕС
4. Ю.М.Борисов, Д.Н.Липатов, Ю.Н.Зорин, Электротехника /Учебное пособие для вузов/. –М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552с.
5. А.С.Касаткин, Основы электротехники /Учебное пособие для технических учебных заведений/. (Гл. 3, 6) –М.: Высшая школа, 1975.
6. И.П.Жеребцов, Электрические и магнитные цепи. Основы электротехники. -2-е изд., перераб. И доп.- Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 256с.
7. Л.В.Журавльова, В.М.Бондар, Електроматеріалознавство /Підручник ПТНЗ/. К.:Грамота, 2006. - 312с.