

Міністерство освіти та науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-402М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи № 4 з навчальної дисципліни

«Електротехніка»

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за

освітньо-професійною програмою «Автоматизація,

комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані

технології та робототехніка»

денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІЕАВГ
Протокол № 5 від 30.12.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи № 4 з навчальної дисципліни «Електротехніка» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Маланчук Є. З., Христюк А. О. – Рівне : НУВГП, 2024. – 23 с.

Укладачі: Маланчук Є. З., д.т.н., професор кафедри АЕКІТ;
Христюк А. О., к.т.н., доцент кафедри АЕКІТ.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри АЕКІТ.

Керівник освітньої програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»: Христюк А. О., к.т.н., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

© Є. З. Маланчук,
А. О. Христюк, 2024
© НУВГП, 2024

Робота 4. Дослідження магнітного кола постійних струмів

Study of the magnetic circuit of direct currents

4.1. Мета роботи

Вивчити методи та прилади вимірювання магнітної індукції і магнітного потоку та дослідити вебер-амперні характеристики магнітних кіл постійного струму.

The purpose of the work

To study the methods and devices for measuring magnetic induction and magnetic flux and to investigate the weber-ampere characteristics of direct current magnetic circuits.

4.2. Короткі теоретичні відомості

Частину електротехнічного пристрою, призначеного для створення в його робочому об'ємі магнітного поля заданої інтенсивності і конфігурації, називають магнітним колом. Магнітне коло складається з елементів, які збуджують магнітне поле (котушки, в яких протікає струм, постійні магніти) і магнітопроводів, по яким замикається магнітний потік. Елементи, які збуджують магнітне поле за аналогією з електричним колом, називають магнітно-рушійними силами (м.р.с.) або намагнічуючою силою.

Магнітопроводи виконують роль “провідників” магнітного потоку подібно провідникам електричного струму в електричних колах.

Магнітні властивості речовин визначаються величиною магнітної проникливості μ . Вона є фізичною константою. В залежності від величини магнітної проникливості μ всі речовини поділяють на діамагнетики (мідь, свинець, ртуть, алюміній та інші; $\mu_{\text{д}} = \mu_0 [1 - 1 \cdot (10^{-6} \dots 10^{-5})]$), парамагнетики (кисень, вуглець, деякі солі кобальту та інші; $\mu_{\text{п}} = \mu_0 [1 + 1 \cdot (10^{-6} \dots 10^{-5})]$) і феромагнетики (залізо з домішками, нікель та інші; $\mu_{\text{ф}} = \mu_0 (10^2 \dots 10^5)$), де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна проникливість вакууму.

Феромагнетики використовують для виготовлення магнітопроводів магнітних кіл. Чим вища магнітна проникливість, тим кращим є

магнітний матеріал, бо при тій же м.р.с. буде більшим магнітний потік.

Силовою характеристикою магнітного поля, яке є однією із форм електромагнітного поля, є магнітна індукція B - середнє значення макроскопічного магнітного поля, яке утворюється в даній точці простору як струмами провідності, так і наявними мікрострумами в тілі намагніченого магнітопроводу.

Магнітне поле, яке створене струмами провідності (рухом вільних носіїв електричних зарядів) і яке не залежить від магнітних властивостей середовища, характеризується вектором напруженості магнітного поля \vec{H} . Залежність між індукцією і напруженістю магнітного поля визначає магнітна проникливість речовини:

$$\mu = \frac{B}{H}. \quad /4.1/$$

Одиницею виміру магнітної індукції є Тесла, а напруженості - Ампер на метр.

Величина напруженості магнітного поля залежить від величини струмів, які збуджують це магнітне поле в магнітному колі. Тому при одній і тій же напруженості H величина магнітної індукції B буде різною в магнітних колах з різних матеріалів. Щоби мати великі значення індукції, магнітопроводи виконують з феромагнетиків з великими значеннями магнітної проникливості (електротехнічна сталь, пермалой, ферити тощо).

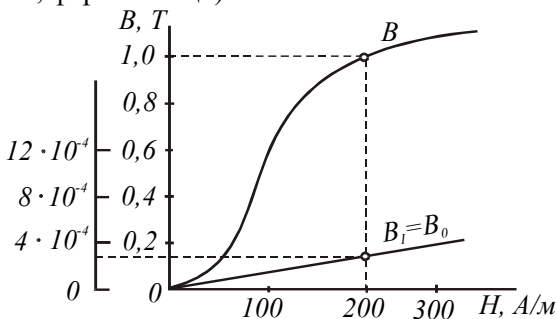


Рис.4.1.

Особливістю феромагнетиків є нелінійна залежність між магнітною індукцією і напруженістю магнітного поля, тобто магнітна проникливість μ не є сталою величиною, а залежить від напруженості магнітного поля. Цю залежність називають кривою

намагнічення. Її знімають експериментально для кожного феромагнетика і в довідниках вона представлена у вигляді графіка $B = f(H)$, або відповідних таблиць.

На рис.4.1 наведені залежності $B = f(H)$ для електротехнічної сталі $E - 42$ і вакууму, для якого $B_0 = \mu_0 H$. З наведених графіків знаходимо, що при напруженості магнітного поля 200 А/м індукція в сталі $B = 1.0 \text{ Т}$, (Тесла), а у вакуумі $B = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Т}$, що в 400 разів менше. Отже, магнітопровід із електротехнічної сталі посилює магнітну індукцію в 400 разів у порівнянні з вакуумом. При розрахунках магнітну проникливість повітря приймають рівною μ_0 .

Магнітне коло більшості електротехнічних пристроїв (електромашин, реле, контакторів та інше) складається з магнітопроводів і повітряних проміжків. Наприклад, магнітопроводи і повітряні проміжки між статором і ротором електричних машин.

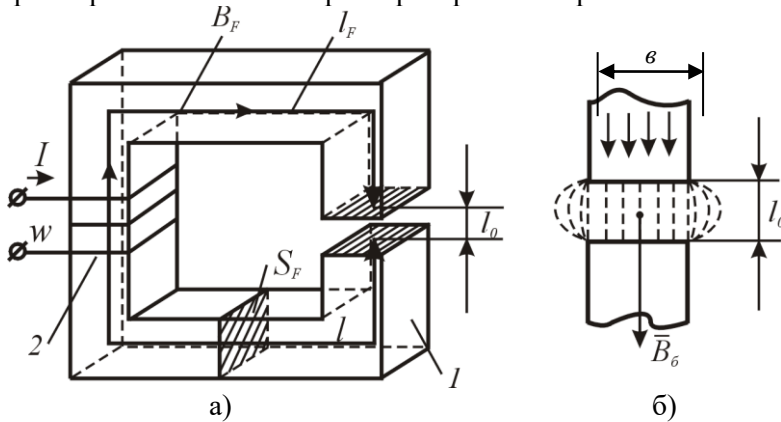


Рис.4.2.

На рис.4.2 зображено просте послідовне магнітне коло з повітряним проміжком l_0 . Магнітне поле в сталевому осерді 1 збуджується котушкою зі струмом 2, магніторушійна сила якої

$$F = IW, \quad /4.2/$$

де I - струм в провідниках котушки, А; W - кількість витків у котушці.

Магніторушійна сила F збуджує в сталевому осерді довжиною l_F та в повітряному проміжку довжиною l_0 відповідно магнітні індукції B_F і

B_l . Якщо магнітну індукцію в поперечному перерізі магнітопровода вважати постійною величиною, то магнітний потік в осерді

$$\Phi = B_F \cdot S_F, \quad /4.3/$$

де S_F - площа поперечного перерізу магнітопровода, м^2 .

При невеликих значеннях повітряних проміжків ($l_0 < 0,001$ м) можна нехтувати замиканням ("розпертям") магнітного потоку з боків магнітопровода (рис.4.2, б) і вважати, що

$$S_F = S_l = S, \quad /4.4/$$

де S_l - поперечний переріз повітряного проміжку.

Так як $B_l = \frac{\Phi}{S_l}$ і $B_F = \frac{\Phi}{S_F}$, то $B_l = B_F$, тобто магнітна індукція в сталевому осерді і в повітряному проміжку l_0 вважаються рівними: $B_F = B_l = B$.

Напруженність магнітного поля в магнітопроводі $H_F = B / \mu_F$, а у повітряному проміжку - $H_l = B / \mu_0$. Оскільки $\mu_F \gg \mu_0$, то напруженність H_F значно менша напруженності H_l : $H_{Fl} \ll H_l$.

Розрахунки магнітних кіл за аналогією з розрахунками електричних кіл проводять на підставі законів Ома і Кірхгофа, прирівнявши намагнічуючу силу F до е.р.с., а магнітний потік Φ - до сили струму I . Тому закон Ома для нерозгалуженого магнітного кола матиме вигляд

$$\Phi = \frac{F}{R_\mu}, \quad /4.5/$$

де Φ - магнітний потік; R_μ - магнітний опір кола.

Магнітний опір R_μ складається із магнітних опорів ділянок кола. Магнітний опір ділянки залежить від магнітної проникливості ділянки μ_d , і від її геометричних розмірів:

$$R_{\mu d} = \frac{l_d}{\mu_d S_d}, \quad /4.6/$$

де l_d - довжина магнітних силових ліній в ділянці; S_d - поперечний переріз ділянки.

Для кола, наведеного на рис.4.2, магнітні опори ділянок $R_{\mu F} = \frac{l_F}{\mu_F S}$; $R_{\mu l} = \frac{l_0}{\mu_0 S}$ і рівняння /4.5/ можна представити у вигляді

$$\Phi = \frac{IW}{R_{\mu l} + R_{\mu F}}. \quad /4.7/$$

Виразу /4.7/ відповідає заступна схема, наведена на рис.4.3.

На підставі заступної схеми можна визначити величину магнітного потоку, а знаючи його, визначають магнітну індукцію, або, задавшись величиною B , визначають намагнічуючу силу котушки IW .

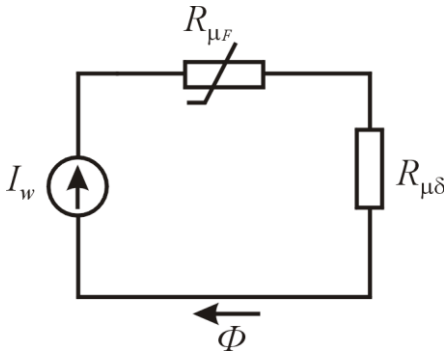


Рис.4.3.

Розрахунок або експериментальне дослідження магнітного кола дозволяє визначити такий дуже важливий параметр електромагнітних пристроїв як індуктивність котушки

$$L = \frac{\Psi}{I}, \quad [\text{Гн}] \quad /4.8/$$

де $\Psi = W \cdot \Phi$ - потокощеплення котушки; I і W - відповідно струм та число витків котушки.

Дослідження магнітних кіл зв'язане з вимірюванням магнітного потоку і магнітної індукції. Вимірювання магнітного потоку ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції.

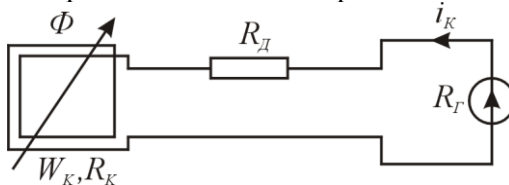


Рис.4.4.

На рис.4.4. зображена електрична схема вимірювання потоку індукційно-імпульсним методом. Вона складається із котушки з числом витків W_k , опору R_d і балістичного гальванометра з внутрішнім опором R_g . Якщо котушку помістити в магнітне коло, а потім швидко

видалити з нього, то зміна магнітного потоку, який пронизує котушку, спричинить виникнення в ній електрорушійної сили

$$e_k = -W_k \frac{d\Phi}{dt}. \quad /4.9/$$

Під дією е.р.с. e_k в колі буде протікати струм

$$i_k = \frac{e_k}{R} = -\frac{W_k}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad /4.10/$$

де $R = R_k + R_d + R_r$ - загальний опір кола котушки, який буде протікати доти, доки відбувається зміна магнітного потоку, який пронизує котушку. Цей струм буде імпульсним і оцінити його можна за кількістю електричних зарядів (носіїв струму) за час зміни потоку від Φ до нуля, тобто можна записати, що

$$q = \int_0^t i dt = \int_0^t \frac{e_k}{R} dt = -\frac{W_k}{R} \int_{\Phi}^0 d\Phi = \frac{W_k}{R} \Phi. \quad /4.11/$$

Заряд q , протікаючи через балістичний гальванометр, зумовить відхилення його стрілки. Отже, ступінь відхилення стрілки гальванометра буде мірою магнітного потоку.

Прилади, які призначені для вимірювання магнітного потоку описаним вище методом, називаються мілівеберметрами. Крім стрілочних, випускають і цифрові мілівеберметри.

Стосовно вимірювання магнітного потоку мілівеберметром формулу /4.11/ можна представити у виді

$$\Phi = \frac{C_\Phi \alpha}{W_k}, \quad /4.12/$$

де C_Φ - ціна поділки мілівеберметра, α - кількість поділок, на яку відхиляється стрілка.

При вимірюванні магнітного потоку електромагнітів можна не видаляти вимірювальну котушку з магнітного поля, а вмикати (вимикати) струм котушки, яка збуджує магнітне поле.

Для вимірювання магнітної індукції використовують ефект Холла, який полягає в тому, що в пластинці з металу або

напівпровідникового матеріалу, по якій протікає струм I і яка знаходиться в магнітному полі, вектор якого перпендикулярний до вектора струму, виникає електричне поле, направлене перпендикулярно до векторів \vec{B} і \vec{I} . Напруженість цього поля (поле Холла)

$$E_x = \frac{R_x}{d} IB, \quad /4.13/$$

де d - товщина пластинки; R_x - стала Холла, яка залежить, в основному, від концентрації носіїв струму (рис.4.5).

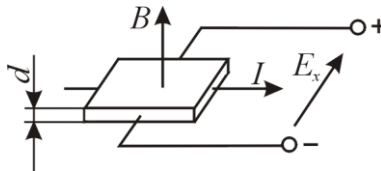


Рис.4.5.

Із рівняння /4.13/ знаходимо, що магнітна індукція

$$B = \frac{d}{R_x I} E_x, \quad /4.14/$$

тобто B буде пропорційним E_x за умови $I = \text{const}$.

За допомогою вимірювальних перетворювачів Холла можна вимірювати магнітну індукцію в межах 0,001...2 Тесла.

Прилад, який побудований на використанні ефекту Холла і який призначений для вимірювання магнітної індукції, називається тесламетром. Він складається з стрілкового або цифрового приладу, щупа, в який вбудовано давач Холла, і джерела живлення постійного струму зі стабілізованою напругою, щоби забезпечити $I = \text{const}$ при вимірюванні.

Brief theoretical information

A part of an electrical device designed to create a magnetic field of a given intensity and configuration in its working volume is called a magnetic circuit. The magnetic circuit consists of elements that excite the magnetic field (coils in which current flows, permanent magnets) and

magnetic conductors through which the magnetic flux is closed. Elements that excite a magnetic field by analogy with an electric circuit are called magneto-motive forces (MMF) or magnetizing force.

Magnetoconductors perform the role of "conductors" of magnetic flux, similar to conductors of electric current in electric circuits.

Magnetic properties of substances are determined by the value of magnetic permeability μ . It is a physical constant. Depending on the value of magnetic permeability μ , all substances are divided into diamagnetic (copper, lead, mercury, aluminum, and others; $\mu_{\text{д}} = \mu_0 [1 - 1(10^{-6} \dots 10^{-5})]$), paramagnets (oxygen, carbon, some cobalt salts and others; $\mu_{\text{п}} = \mu_0 [1 + 1 \cdot (10^{-6} \dots 10^{-5})]$) and ferromagnets (iron with impurities, nickel and others; $\mu_{\text{ф}} = \mu_0 (10^2 \dots 10^5)$), where $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hn/m}$ is the magnetic permeability of vacuum.

Ferromagnets are used to manufacture magnetic circuits of magnetic circuits. The higher the magnetic permeability, the better the magnetic material, because at the same m.m.f. the magnetic flux will be greater.

The strength characteristic of the magnetic field, which is one of the forms of the electromagnetic field, is magnetic induction B - the average value of the macroscopic magnetic field, which is formed at a given point in space by both conduction currents and microcurrents present in the body of the magnetized magnetic conductor.

The magnetic field, which is created by conduction currents (the movement of free carriers of electric charges) and which does not depend on the magnetic properties of the medium, is characterized by the magnetic field intensity vector \vec{H} . The dependence between the induction and the intensity of the magnetic field is determined by the magnetic permeability of the substance:

$$\mu = \frac{B}{H}. \quad /4.1/$$

The unit of measurement of magnetic induction is Tesla, and the unit of intensity is Ampere per meter.

The magnitude of the magnetic field intensity depends on the magnitude of the currents that excite this magnetic field in the magnetic circuit. Therefore, at the same tension H value of magnetic induction B will be different in magnetic circles made of different materials. In order to have large values of induction, magnetic conductors are made of ferromagnets

with large values of magnetic permeability (electrical steel, permalloy, ferrites, etc.).

A feature of ferromagnets is the nonlinear dependence between magnetic induction and magnetic field strength, that is, magnetic permeability μ is not a constant value, but depends on the strength of the magnetic field. This dependence is called the magnetization curve. It is taken experimentally for each ferromagnet and is presented in the form of a graph in reference books $B = f(H)$, or corresponding tables

Figure 4.1 shows dependencies $B = f(H)$ for electrical steel $E - 42$ and vacuum for which $B_0 = \mu_0 H$. From the above graphs, we find that at a magnetic field strength of 200 A/m, induction in steel $B = 1.0 T$, (Tesla), and in a vacuum $B = 2.5 \cdot 10^{-4} T$, which is 400 times less. So, a magnet wire made of electrical steel increases magnetic induction 400 times compared to a vacuum. In the calculations, the magnetic permeability of air is assumed to be equal μ_0 .

The magnetic circuit of most electrical devices (electric machines, relays, contactors, etc.) consists of magnetic conductors and air gaps. For example, magnetic conductors and air gaps between the stator and rotor of electric machines.

Figure 4.2 shows a simple series magnetic circuit with an air gap l_0 . The magnetic field in the steel core 1 is excited by the current-carrying coil 2, the magnetomotive force of which

$$F = IW, \quad /4.2/$$

as well I - current in coil conductors, A; W - the number of turns in the coil.

Magnetomotive force F excites in a steel core with a length l_F and in the air gap length l_0 respectively magnetic inductions B_F and B_l . If the magnetic induction in the cross-section of the magnetic conductor is considered a constant value, then the magnetic flux in the core

$$\Phi = B_F \cdot S_F, \quad /4.3/$$

as well S_F - cross-sectional area of the magnet wire, m^2 .

With small values of air gaps ($l_0 < 0.001$ m) it is possible to neglect the closing (“opening”) of the magnetic flux from the sides of the magnetic conductor (Fig. 4.2, b) and assume that

$$S_F = S_l = S, \quad /4.4/$$

as well S_l - cross section of the air gap.

As $B_l = \frac{\Phi}{S_l}$ and $B_F = \frac{\Phi}{S_F}$, then $B_l = B_F$, that is, magnetic induction in

the steel core and in the air gap l_0 are considered equal: $B_F = B_l = B$.

The magnetic field strength in the magnetic field $H_F = B / \mu_F$, and in the air gap - $H_l = B / \mu_0$. Since $\mu_F \gg \mu_0$, then tension H_F significantly less tension H_l : $H_{Fl} \ll H_l$.

Calculations of magnetic circuits by analogy with calculations of electric circuits are carried out on the basis of Ohm's and Kirchoff's laws, equating the magnetizing force F to the emf, and the magnetic flux Φ to the current strength I . Therefore, Ohm's law for an unbranched magnetic circuit will have the form

$$\Phi = \frac{F}{R_\mu}, \quad /4.5/$$

where Φ is the magnetic flux; R_μ - magnetic resistance of the circuit.

The magnetic resistance R_μ consists of the magnetic resistances of the sections of the circle. The magnetic resistance of the site depends on the magnetic permeability μ_d of the site and on its geometric dimensions:

$$R_{\mu d} = \frac{l_d}{\mu_d S_d}, \quad /4.6/$$

as well l_d - length of magnetic power lines in the area; S_d - cross section of the site.

For the circle shown in Fig. 4.2, the magnetic resistances of the sections $R_{\mu F} = \frac{l_F}{\mu_F S}$; $R_{\mu l} = \frac{l_0}{\mu_0 S}$ and equation /4.5/ can be represented in the form

$$\Phi = \frac{IW}{R_{\mu l} + R_{\mu F}}. \quad /4.7/$$

The expression /4.7/ corresponds to the replacement scheme shown in

Fig. 4.3.

On the basis of the substitute scheme, it is possible to determine the magnitude of the magnetic flux, and knowing it, determine the magnetic induction, or, given the magnitude B , determine the magnetizing force of the coil IW .

Calculation or experimental study of the magnetic circuit allows you to determine such a very important parameter of electromagnetic devices as the inductance of the coil

$$L = \frac{\psi}{I}, [\text{Hn}] \quad /4.8/$$

Where $\psi = W \cdot \Phi$ - flux grafting of the coil; I and W - current and number of turns of the coil, respectively.

The study of magnetic circles is connected with the measurement of magnetic flux and magnetic induction. The measurement of the magnetic flux is based on the use of the phenomenon of electromagnetic induction.

In Fig. 4.4. the electrical scheme of the flow measurement by the induction-pulse method is shown. It consists of a coil with a number of turns W_k resistance R_d and ballistic galvanometer with internal resistance R_G . If a coil is placed in a magnetic circle and then quickly removed from it, the change in the magnetic flux that permeates the coil will cause an electromotive force to appear in it

$$e_k = -W_k \frac{d\Phi}{dt}. \quad /4.9/$$

Under the influence of electromotive force current will flow in the circuit

$$i_k = \frac{e_k}{R} = -\frac{W_k}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad /4.10/$$

as well $R = R_{T0} + R_d + R_G$ - the total resistance of the coil circuit, which will flow as long as there is a change in the magnetic flux that permeates the coil. This current will be pulsed and it can be estimated by the number of electric charges (current carriers) during the time the flow changes from Φ to zero, that is, it can be written that

$$q = \int_0^t i dt = \int_0^t \frac{e_k}{R} dt = -\frac{W_k}{R} \int_{\Phi}^0 d\Phi = \frac{W_k}{R} \Phi. \quad /4.11/$$

Charge q , flowing through the ballistic galvanometer, will cause its arrow to deviate. Therefore, the degree of deflection of the galvanometer needle will be a measure of the magnetic flux.

Devices designed to measure magnetic flux using the method described above are called milliwebermeters. In addition to arrow meters, they also produce digital milliwebermeters.

Regarding the measurement of the magnetic flux with a milliwebermeter, the formula /4.11/ can be presented in the form

$$\Phi = \frac{C_{\phi} \alpha}{W_k}, \quad /4.12/$$

as well C_{ϕ} - the price of a milliwebermeter division, α - the number of divisions by which the needle deviates.

When measuring the magnetic flux of electromagnets, it is possible not to remove the measuring coil from the magnetic field, but to turn on (off) the current of the coil that excites the magnetic field.

To measure magnetic induction, the Hall effect is used, which consists in the fact that in a plate made of metal or semiconductor material, through which a current flows I and which is in a magnetic field, the vector of which is perpendicular to the current vector, an electric field directed perpendicular to the vectors \vec{B} and \vec{I} . The intensity of this field (Hall field)

$$E_x = \frac{R_x}{d} IB, \quad /4.13/$$

as well d - plate thickness; R_x - the Hall constant, which depends mainly on the concentration of current carriers (Fig. 4.5).

From equation /4.13/ we find that magnetic induction

$$B = \frac{d}{R_x I} E_x, \quad /4.14/$$

i.e. B will be proportional E_x provided $I = \text{const.}$

With the help of measuring Hall transducers, it is possible to measure magnetic induction in the range of 0.001...2 Tesla.

The device, which is built on the use of the Hall effect and which is designed to measure magnetic induction, is called a Tesla meter. It consists of a pointer or digital instrument, a probe into which a Hall sensor is built, and a DC power supply with a stabilized voltage to ensure $I = \text{const}$ when measuring.

4.3. Програма роботи

1. Вивчити будову та принципи дії мілівеберметра і мілітесламетра.
2. Вивчити лабораторну установку дослідження характеристик Ш-подібного електромагніта.
3. Експериментальним шляхом зняти вебер-амперну характеристику електромагніта $\Phi = f(I_k \cdot W_k)$. На підставі експериментальних даних провести необхідні розрахунки і побудувати криву намагнічування $B = f(H)$ і залежності $R_\mu = f(\Phi)$ і $L_k = f(I_k)$.
4. Зняти експериментально і побудувати характеристики, які вказані в п.3, якщо повітряний проміжок між ярмом і якорем електромагніта $\delta = 1$ мм.
5. Зняти залежність магнітної індукції в повітряному проміжку від його величини $B = f(\delta)$ і побудувати залежності $R_\mu = f(\delta)$ і $L_k = f(\delta)$.
6. Зробити висновки щодо кривої намагнічування і впливу величини повітряного проміжку на характеристики і параметри магнітного кола.

Work program

1. To study the structure and principles of operation of the milliwebermeter and milliteslameter.
2. To study the laboratory setup for studying the characteristics of a W-shaped electromagnet.
3. Experimentally measure the weber-ampere characteristic of the electromagnet $\Phi = f(I_k \cdot W_k)$. Based on the experimental data, make the

necessary calculations and construct the magnetization curve $B = f(H)$ and the dependence $R_{\mu} = f(\Phi)$ and $L_k = f(I_k)$.

4. Experimentally measure and construct the characteristics specified in p.3, if the air gap between the yoke and the armature of the electromagnet $\delta = 1$ mm.

5. To get the dependence of the magnetic induction in the air gap on its magnitude $B = f(\delta)$ and to construct the dependences $R_{\mu} = f(\delta)$ and $L_k = f(\delta)$.

6. To draw conclusions regarding the magnetization curve and the influence of the air gap magnitude on the characteristics and parameters of the magnetic circuit.

4.4. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з Ш-подібного електромагніта, переносних мілівеберметра і мілітесламетра та джерела живлення з регульованою напругою.

Магнітне коло електромагніта (рис.4.6) складається з ярма 1, якоря 2 і каліброваної прокладки 3 із немагнітного матеріалу товщиною δ . Магнітне поле збуджується котушкою зі струмом 4 з числом витків W_3 . На боковому стержні магнітопроводу розміщена вимірювальна котушка 5 з числом витків W_6 .

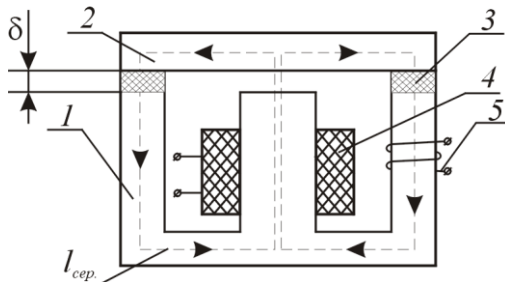


Рис.4.6.

Числа витків котушок і довжина середньої лінії магнітопроводу (без повітряних проміжків) наведені на панелі установки. Там же вказана і максимально допустима сила струму котушки збудження I_{kmax} .

На рис.4.7. наведена електрична схема установки. Вона складається із джерела живлення постійного струму G , регулятора напруги PH , котушки збудження електромагніта $K3$, вимикача SA , амперметра PA і вольтметра PV . Вимірювана котушка KB під'єднана до мілівеберметра mB .

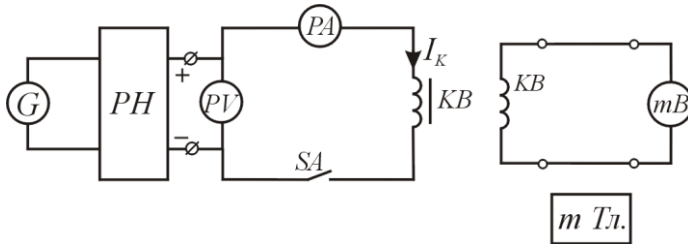


Рис.4.7.

Напругу на котушці збудження регулюють регулятором PH в межах $0...50V$ і вимірюють вольтметром PV . Це дозволяє регулювати силу струму в котушці збудження, тобто намагнічуючу силу ($I_K W_K$), від нуля до насичення магнітопровода.

Магнітний потік, зчеплений з вимірювальною котушкою, вимірюють мілівеберметром при вмиканні і вимиканні струму I_K вимикачем SA . При цьому вимірюється половина магнітного потоку, створеного котушкою збудження.

Description of the laboratory setup

The laboratory setup consists of a W-shaped electromagnet, a portable millivoltmeter and a milliammeter, and a power supply with adjustable voltage.

The magnetic circle of the electromagnet (Fig. 4.b) consists of a yoke 1, an anchor 2 and a calibrated gasket 3 made of non-magnetic material with a thickness of δ . The magnetic field is excited by a coil with a current of I_K with the number of turns W_3 . A measuring coil 5 with the number of turns is placed on the side rod of the magnetic circuit W_6 .

The number of turns of the coils and the length of the middle line of the magnet wire (without air gaps) are given on the installation panel. The maximum permissible current of the excitation coil is also indicated there I_{Kmax} .

In Fig. 4.7. the electrical diagram of the installation is given. It consists of a DC power supply G , voltage regulator PH, excitation coil of electromagnet K3, switch SA, ammeter PA and voltmeter PV. The KB coil to be measured is connected to the milliveber meter mB.

The voltage on the excitation coil is regulated by the PH regulator within 0...50V and measured with a voltmeter PV. This allows you to adjust the current in the excitation coil, that is, the magnetizing force ($I_k W_k$), from zero to saturation of the magnet wire.

The magnetic flux connected to the measuring coil is measured by a millivebermeter when the current is switched on and off I_k switch SA. At the same time, half of the magnetic flux created by the excitation coil is measured.

4.5. Порядок виконання роботи

1. Ознайомившись з будовою мілівеберметра і мілітесламетра, проведіть їх випробування, вимірюючи декілька разів магнітний потік і магнітну індукцію постійного магніту, який закріплений на стенді.

2. Вивчаючи будову лабораторної установки, зверніть увагу на спосіб зміни повітряного проміжку між ярмом і якорем магнітопроводу.

3. Вебер-амперну характеристику знімають у такій послідовності:

- розмикають вимикач SA;
- ручку регулятора напруги PH встановлюють в нульове положення, що контролюють вольтметром PV;
- під'єднують мілівеберметр до вимірювальної котушки і коректором переводять його стрілку на початок шкали;
- регулятором напруги PH виставляють напругу U_1 , величину якої задає викладач;
- замикають вимикач SA і визначають відхилення стрілки мілівеберметра в момент вмикання, а також фіксують величину струму в котушці збудження;
- вимикають вимикач SA і знову визначають відхилення стрілки в момент вимикання;
- дані вимірювань заносять в табл.1.

Потім дослід повторюють ще чотири рази з кроком напруги на котушці збудження $\Delta U_k = \frac{U_{k \max}}{5}$, де $U_{k \max}$ - максимально допустима

напруга, яка відповідає струму $I_{k \max}$, вказаному на панелі лабораторної установки.

На підставі експериментальних даних і параметрів, вказаних на панелі установки, за відповідними формулами вираховують магнітний потік Φ , індукцію B , напруженість H , намагнічуючу силу $I_k W_k$, магнітну проникливість μ , магнітний опір R_μ і індуктивність котушки збудження L_3 .

За даними розрахунків побудувати залежності $B = f(H)$, $R_\mu = f(\Phi)$ і $L_k = f(I_k)$.

Таблиця 1

№ з/п	Виміряти			Вирахувати						
	U_k	I_k	ψ	Φ	B	H	$I_k W_3$	μ	R_μ	L_k
	В	А	В.с	В.с	Вб	А/м	А	Гн/м	Гб	Гн
1										
2										
3										
4										
5	U_{kmax}	I_{kmax}								

4. Встановити між якорем і крайніми стержнями магнітопроводу немагнітні прокладки товщиною $\delta = 1$ мм. Щільно притиснути якір до ярма. Вставити щуп з давачем Холла в повітряний проміжок між середнім стержнем і якорем. Потім провести п'ять вимірювань згідно методики, описаної в п.4, доповнюючи досліди вимірюванням магнітної індукції мілітесламетром. Дані вимірювань занести в табл.2.

Таблиця 2

№ з/п	Виміряти			Вирахувати						
	U_k	I_k	ψ	B	Φ	H	$I_k W_3$	$R_{\mu k}$	L_k	
	В	А	В.с	Тл	В.с	Ам	А	Гб	Гн	
1										
2										
3										
4										
5										

Магнітний опір R_μ вираховують за формулою /4.7/.

За експериментальними і розрахунковими даними побудувати залежності $B = f(H)$, $R_{\text{дк}} = f(\Phi)$ і $L_{\text{к}} = f(I_{\text{к}})$.

5. Встановити на котушці збудження задану викладачем напругу $U_{\text{кл}}$ і слідкувати, щоби вона при експерименті не змінювалась. Потім провести вимірювання, описані в п.4., для каліброваних немагнітних прокладок товщиною 1; 2; 3; 4; і 5 мм. Дані вимірювань занести в табл. 3.

Таблиця 3

№ з/п	Виміряти				Вирахувати			
	δ	B	$I_{\text{к}}$	ψ	Φ	$I_{\text{к}} W_{\text{з}}$	$R_{\text{дк}}$	$L_{\text{к}}$
	мм	Тл	А	В.с	В.с	А	Гб	Гн
1	1							
2	2							
3	3							
4	4							
5	5							

За експериментальними і розрахунковими даними побудувати графіки $B = f(\delta)$; $R_{\text{дк}} = f(\delta)$ і $L_{\text{к}} = f(\delta)$.

Порівнюючи відповідні графіки, зробити аналіз впливу намагнічуючої сили і повітряного проміжку на параметри магнітного кола.

The order of work

1. Having familiarized yourself with the structure of the milliwbebermeter and milliteslameter, test them by measuring the magnetic flux and magnetic induction of a permanent magnet fixed on the stand several times.

2. When studying the structure of the laboratory installation, pay attention to the method of changing the air gap between the yoke and the anchor of the magnet wire.

3. The Weber-ampere characteristic is removed in the following sequence:

- open the SA switch;

- the handle of the PH voltage regulator is set to the zero position, which is controlled by the PV voltmeter;
- connect the milliwbeber meter to the measuring coil and move its arrow to the beginning of the scale with a corrector;
- the voltage is set with the PH voltage regulator U_1 , the value of which is set by the teacher;
- close the SA switch and determine the deflection of the milliwbeber meter needle at the moment of switching on, as well as record the value of the current in the excitation coil;
- turn off the SA switch and again determine the deviation of the arrow at the moment of turning off;
- the measurement data are entered in Table 1.

Then the experiment is repeated four more times with a voltage step on the excitation coil $\Delta U_K = \frac{U_{K \max}}{5}$, where $U_{K \max}$ - the maximum allowable voltage that corresponds to the current $I_{K \max}$ indicated on the panel of the laboratory installation.

On the basis of experimental data and parameters specified on the installation panel, the magnetic flux Φ , induction B is calculated using the appropriate formulas, tension H , magnetizing force $I_K W_K$, magnetic permeability μ , magnetic resistance R_μ and inductance of the excitation coil L_3 .

Based on the calculations, build dependencies $B = f(H)$, $R_\mu = f(\Phi)$ i $L_K = f(I_K)$.

Table 1

№	to measure			Calculate						
	U_K	I_K	ψ	Φ	B	H	$I_K W_K$	μ	R_μ	L_K
	V	A	Vs	Vs	Vb	$\frac{A}{m}$	A	Hn/m	Ohm	Hn
1										
2										
3										
4										
5	$U_{K \max}$ x	$I_{K \max}$								

4. Install 1 mm-thick non-magnetic spacers between the armature and the extreme rods of the magnetic conductor. Firmly press the anchor to the yoke. Insert the probe with the Hall sensor into the air gap between the middle rod and the anchor. Then carry out five measurements according to the method described in point 4, supplementing the experiments with the measurement of magnetic induction with a milliteslameter. The measurement data are listed in Table 2.

Table 2

№	to measure				Calculate				
	U_k	I_k	ψ	B	Φ	H	$I_k W_z$	$R_{\mu k}$	L_k
	V	A	Vs	Tl	Vs	Am	A	GB	Hn
1									
2									
3									
4									
5									

The magnetic resistance R_μ is calculated according to the formula /4.7/.

Build dependencies based on experimental and calculated data $B = f(H)$, $R_{\mu k} = f(\Phi)$ and $L_k = f(I_k)$.

5. Set the voltage specified by the teacher on the excitation coil U_{k1} and to ensure that it does not change during the experiment. Then carry out the measurements described in point 4. for calibrated non-magnetic gaskets with a thickness of 1; 2; 3; 4; and 5 mm. Enter the measurement data in the table. 3.

Table 3

№	to measure				Calculate				
	δ	B	I_k	ψ	Φ	$I_k U_z$	$R_{\mu k}$	L_k	
	mm	Tl	A	Vs	Vs	A	GB	Hn	
1	1								
2	2								
3	3								
4	4								
5	5								

Draw graphs based on experimental and calculated data $B = f(\delta)$;
 $R_{\mu k} = f(\delta)$ and $L_k = f(\delta)$

Comparing the corresponding graphs, analyze the influence of the magnetizing force and the air gap on the parameters of the magnetic circuit.

4.6. Контрольні запитання

1. Яку роль виконують магнітопроводи в магнітних колах?
2. Як поділяються речовини в залежності від магнітної проникливості?
3. Які матеріали використовують для виготовлення магнітопроводів магнітних кіл?
4. Який вид має залежність магнітної індукції від намагнічення?
5. З яких ділянок складаються магнітні кола електротехнічних пристроїв (реле, контактори тощо)?
6. Як залежить магнітний опір від величини повітряного проміжку?
7. Як залежить індуктивність котушки від величини повітряного проміжку?
8. Як залежить величина індуктивності від насичення магнітопровода?
9. Як визначається індуктивність котушки за експериментальними даними?
10. Який графік має крива намагнічення сталі?

Control questions

1. What role do magnetic cores play in magnetic circuits?
2. How are substances divided depending on magnetic permeability?
3. What materials are used to manufacture magnetic cores of magnetic circuits?
4. What is the dependence of magnetic induction on magnetization?
5. What sections do magnetic circuits of electrical devices (relays, contactors, etc.) consist of?
6. How does magnetic resistance depend on the size of the air gap?
7. How does the inductance of a coil depend on the size of the air gap?
8. How does the inductance depend on the saturation of the magnetic core?
9. How is the inductance of a coil determined from experimental data?
10. What is the graph of the magnetization curve of steel?