

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання лабораторних та контрольних робіт
студентами всіх форм навчання при вивченні
дисципліни «Електричні апарати»
для підготовки бакалаврів за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» з подальшим навчанням
за освітньою програмою
«Електромеханічне обладнання енергоємних
виробництв»
Частина 1**

2017

Методичні вказівки до виконання лабораторних та контрольних робіт студентами всіх форм навчання при вивченні дисципліни «Електричні апарати» для підготовки бакалаврів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» з подальшим навчанням за освітньою програмою «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв» Частина 1/ Укл.: Жорняк Л.Б., Антонова М. В. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 58 с.

Укладачі: Л. Б. Жорняк, доцент, к.т.н.
М. В. Антонова, ст. викладач

Рецензент: О.В. Близняков, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск: П.Д. Андрієнко, професор, д.т.н.

Затверджено
на засіданні НМК ЕТФ
протокол №3
від 20.04.2017

Затверджено
на засіданні кафедри
"ЕЕА", протокол №1
від 19.04.2017

ЗМІСТ

Вступ. Загальні вимоги щодо виконання, оформлення та захисту звітів про виконання лабораторних робіт.....	4
1 Лабораторна робота № 1 Дослідження магнітних провідностей повітряних зазорів	6
2 Лабораторна робота № 2 Дослідження електромагніта постійного струму	12
3 Лабораторна робота № 3 Дослідження електромагніта змінного струму	19
4 Лабораторна робота № 4 Дослідження часових параметрів спрацьовування електромагніту	27
5 Лабораторна робота № 5 Дослідження схемних методів прискорення та уповільнення спрацьовування електромагнітів.....	32
6 Лабораторна робота № 6 Дослідження перехідного контактного опору	35
7 Лабораторна робота № 7 Дослідження електродинамічних зусиль в електричних апаратах.....	48
8 Контрольна робота №1 Дугогасна камера контактора постійного струму.....	54
Перелік посилань.....	58

ВСТУП

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ЩОДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ ЗВІТІВ ПРО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Виконання лабораторної роботи складається з роботи студента у лабораторії, а також із самостійної роботи. Активна самостійна робота є визначальним чинником ефективного сприйняття змісту лабораторних занять.

Самостійна робота студента передбачає:

- теоретичну підготовку до чергової роботи;
- підготовку відповідей на контрольні запитання, що наведені в кінці кожної лабораторної роботи;

- аналіз результатів дослідів, що виконуються у лабораторії;
- оформлення звітів про виконання лабораторних робіт.

Теоретична підготовка до чергової роботи передбачає:

- проробку розділів теорії, що визначають зміст та методику досліджень;
 - проробку методичних вказівок до лабораторних робіт з використанням рекомендованих підручників та посібників;
 - оформлення звіту про виконання лабораторної роботи.
- Робота студента у лабораторії передбачає такі етапи:
- отримання допуску до лабораторної роботи;
 - отримання дозволу на ввімкнення лабораторної установки (стенду);

- виконання дій з досліджуваним об'єктом відповідно до методичних вказівок; спостереження за факторами, що впливають на досліджуваний об'єкт; проведення дослідів та запис результатів вимірів;
- захист звітів про виконання лабораторних робіт.

Звіти про виконання лабораторних робіт складаються окремо кожним студентом в одному зошиті, або в друкованому вигляді.

Зміст кожного звіту включає:

- мета роботи, предмет дослідження;
- завдання щодо виконання лабораторної роботи;
- електрична схема проведення дослідів;
- таблиці дослідних даних;
- графіки залежностей, побудованих за дослідними даними;

- висновки по роботі.

Захист звітів про виконання лабораторних робіт здійснюється членами бригади одночасно, але контрольні запитання та оцінку якості виконання кожним студентом отримує окремо.

Студенти, які не захистили два звіти про виконання лабораторних робіт, до наступної роботи не допускаються.

Студенти, які не виконали всі лабораторні роботи або не захистили всі звіти про виконання лабораторних робіт, передбачених навчальним планом та навчальною програмою, не допускаються до заліку та екзамену.

Примітки:

1. Виконання лабораторних робіт у лабораторії здійснюється за розкладом, затвердженим проректором з навчальної роботи.

2. Відпрацьовування пропущених робіт у лабораторії здійснюється перед модульним тижнем за окремим розкладом, затвердженим завідувачем кафедри.

3. Проведення дослідів під час виконання лабораторної роботи здійснюється членами бригади разом.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ПРОВІДНОСТЕЙ ПОВІТРЯНИХ ЗАЗОРІВ.

Тривалість лабораторного заняття – 4 години.

1.1 Мета роботи

Вивчення методів та проведення практичної роботи з експериментального визначення магнітних провідностей повітряних зазорів магнітних кіл електричних апаратів.

1.2. Предмет дослідження

Магнітні кола електромагнітних систем електричних апаратів в більшості випадків містять у собі повітряні зазори: робочі, що передбачені для виконання тої чи іншої роботи, а також неробочі, які виникають в процесі конструктивного виконання електромагнітної системи. На проведення крізь зазори магнітного потоку витрачається частина магніторушійної сили (МРС), яка розвивається котушкою електромагніту. Знайти витрачену для цієї мети МРС при визначеному потоці можна, якщо відомий магнітний опір зазору чи зворотна йому величина - магнітна провідність зазору. Використовуючи закон Ома для магнітного кола, можна написати

$$(Iw)_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\Lambda_{\delta}}, \quad (1.1)$$

де $(Iw)_{\delta}$ - МРС, яка витрачається на проведення магнітного потоку, крізь повітряний зазор, А;

Φ_{δ} - магнітний потік у повітряному зазорі, Вб;

Λ_{δ} - магнітна провідність повітряного зазору, Гн.

Звідси

$$\Lambda_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{(Iw)_{\delta}} = \frac{B_{\delta} \cdot S_{\delta}}{H_{\delta} \cdot \delta} = \mu_0 \frac{S_{\delta}}{\delta}, \quad (1.2)$$

де S_{δ} - площа, крізь яку магнітний потік переходить з одного полюса на інший, м²;

δ - розмір зазору, м.

Труднощі знаходження магнітних провідностей за формулою (1.2) складаються у невизначеності S_{δ} . Якщо розглянути картину магнітного поля, що зображена на рис. 1.1, можна побачити, що крім магнітного потоку з торців полюсів Φ_T є ще магнітні потоки випучування, які складаються з потоку з ребер полюса Φ_p й потоку з бокової поверхні Φ_z .

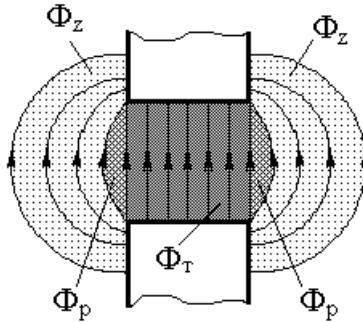


Рисунок 1.1 - Картина магнітного поля у повітряному зазорі.

При малих зазорах $(\Phi_p + \Phi_z) \ll \Phi_T$, тому ними можна зневажати і магнітну провідність можна знайти по формулі (1.2), прийнявши $S_{\delta} = S_T$. В інших випадках для визначення магнітної провідності зазорів застосовується один з існуючих методів розрахунку:

- метод імовірних шляхів потоку (метод Ротерса);
- за питомими провідностями з ребер та бокових граней полюсів
- за емпіричними формулами, одержаними за допомогою обробки дослідницьких даних;
- графічний метод, тобто за допомогою графічної картини магнітного поля.

1.3 Опис експериментальної установки

В лабораторній роботі експериментально визначається магнітна провідність повітряного зазору і коефіцієнт випучування між полюсами прямокутної форми за допомогою експериментальної установки, яка надана на рис. 1.2. Основним елементом установки є Ш-образний електромагніт змінного струму, який складається з магнітопроводу 2,

на крайньому полюсі якого розміщені вимірювальні котушки K1, K2, K3 з кількістю витків 20. Котушки розміщені так, що перша зчіплюється з потоком з торців $\Phi_1 = \Phi_T$, друга - з сумою потоків торця і з ребер $\Phi_2 = \Phi_T + \Phi_P$, третя - з повним потоком $\Phi_3 = \Phi_T + \Phi_P + \Phi_Z$.

Вивідні кінці вимірювальних котушок виведені на перемикач S. МРС повітряного зазору вимірюється за допомогою вимірювальної котушки без феромагнітного осердя (поясу Роговського) 7, підключеного також до перемикача S. ЕРС поясу і напруга вимірювальних котушок K₁, K₂, K₃ вимірюється вольтметром PV, що підключений до клем панелі. Повітряний зазор між полюсами регулюється за допомогою шайби 9 по лінійці 8. Аналогічна шайба та лінійка знаходяться у нижній частині магнітопроводу (на рис. 1.2 не показані). Обмотка електромагніту 3 підключається автоматом SF до джерела живлення з вихідною напругою, що регулюється у межах 0...250 В і контролюється вольтметром PV6.

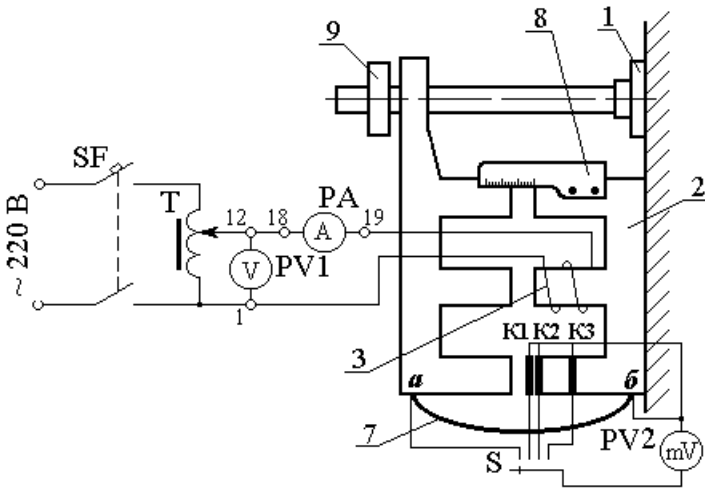


Рисунок 1.2 - Ескіз лабораторної установки і електрична схема з'єднань.

За вимірними ЕРС котушок U_1 , U_2 , U_3 визначаються магнітні потоки Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 :

$$\Phi_i = \frac{U_i}{4,44 \cdot f \cdot w_k}, \quad (1.3)$$

де U_i - напруга вимірювальних котушок, В;

f - частота;

w_k - кількість витків вимірювальних котушок, яке дорівнює 20.

ЕРС, яка наводиться в обмотці поясу Роговського, пропорційна потокозчепленню з магнітним полем котушки намагнічування

$$E_{\Pi} = \omega \cdot \Psi, \quad (1.4)$$

а потокозчеплення

$$\Psi = \mu_0 \cdot S_{\Pi} \cdot w'_{\Pi} \cdot U_{\text{м.а-б}}, \quad (1.5)$$

де μ_0 - магнітна проникність повітря, яка дорівнює $12,56 \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

S_{Π} - переріз поясу Роговського, який дорівнює $2 \cdot 10^{-5}$ м²;

w'_{Π} - приведена кількість витків поясу, яка дорівнює 13300;

$U_{\text{м.а-б}}$ - різниця магнітних потенціалів між кінцями поясу, А.

З формули (1.5) випливає, що

$$(Iw) = U_{\text{м.а-б}} = \frac{\Psi}{\mu_0 \cdot S_{\Pi} \cdot w'_{\Pi}} = c \cdot \Psi, \quad (1.6)$$

де c - постійна пояса, 1/Гн.

Якщо з формули (1.4) вираз для потокозчеплення підставити до формули (1.6), одержимо вираз

$$(Iw) = U_{\text{м.а-б}} = c' \cdot E_{\Pi}, \quad (1.7)$$

де c' - постійна системи пояс-вольтметр, яка визначається за такою формулою

$$c' = \frac{\Psi}{\mu_0 \cdot S_{\Pi} \cdot w'_{\Pi} \cdot \omega}.$$

Таким чином, вимірюючи вольтметром ЕРС поясу, можна знайти різницю магнітних потенціалів (МРС) у повітряному зазорі, а з формули (1.1) при відомих значеннях Φ_i та (Iw) за законом Ома для ділянки магнітного провідності повітряного зазору

$$\Lambda_i = \frac{\Phi_i}{(Iw)}. \quad (1.8)$$

За вимірними значеннями Φ_1 , Φ_2 та Φ_3 можна підрахувати коефіцієнт випучування магнітного потоку у повітряному зазорі

$$\sigma_{\text{вп}} = \frac{\Phi_3}{\Phi_1}. \quad (1.9)$$

1.4 Завдання

1.4.1. Визначити експериментальним шляхом магнітну провідність при кількох значеннях повітряного зазору між прямокутними полюсами.

1.4.2. Підрахувати магнітну провідність з торців полюса, а також повну магнітну провідність повітряного зазору, що досліджується та коефіцієнт випучування за емпіричними формулам.

1.4.3. Побудувати графіки здобутих залежностей.

1.4.4. Порівняти експериментальні залежності з розрахунковими.

1.4.5. Зробити висновки з роботи.

1.5 Методичні вказівки

1.5.1. Виконати електричні з'єднання відповідно до рис. 1.2, встановивши короткі перемички на лабораторному стенді та панелі лабораторної роботи 1-1, 12-12, 18-18, 19-19, і підключити переносний вольтметр PV.

1.5.2. Встановити шайбами 1 і 9 (рис. 1.2) один з заданих викладачем зазорів у верхній і нижній частинах магнітопроводу по лінії 8.

1.5.3. Увімкнути автомат Q, і за допомогою автотрансформатора T встановити по PV6 напругу, задану викладачем.

1.5.4. Послідовно увімкнути перемикач S у положення П, K₁, K₂, K₃ та виміряти ЕРС поясу Роговського E_п і напруги вимірювальних котушок U₁, U₂, U₃. Дані вимірів занести до таблиці 1.1.

1.5.5. Пункт 1.5.3 повторити для 4-5 значень повітряного зазору. Якщо величина зазору перевищує 10 мм, виміри потрібно проводити швидко, аби завадити перегрів котушки намагнічування.

1.5.6. Автотрансформатор T встановити у нульове положення і вимкнути автомат Q.

1.5.7. Величини (Iw), Φ₁ та σ_{вп} визначити за формулами (1.3), (1.7-1.9). Результати розрахунків занести до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Експериментальні дані

δ , мм	E_n , В	I_w , А	Напруги вимірювальних котушок та величини магнітних потоків						Розрахункові величини			
			U_1 , В	Φ_1 , Вб	U_1 , В	Φ_1 , Вб	U_1 , В	Φ_1 , Вб	Λ_T , Гн	Λ_δ , Гн	$\sigma_{вп}$	

1.5.8. Магнітну провідність з торця, повну провідність робочого зазору і коефіцієнт випучування для тих самих значень зазорів, що приймалися в експерименті обчислити за емпіричними формулами:

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \left[\frac{a \cdot b}{\delta} + 0,52(a + b) + \frac{1,28 \cdot (a + b)}{\frac{\delta}{m} + 1} \right], \quad (1.10)$$

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \cdot \frac{a \cdot b}{\delta}, \quad (1.11)$$

де a та b - розміри полюса, які відповідно дорівнюють 31 та 15 мм;

$$m = (1...2)\delta.$$

Розраховані за формулами (1.10-1.11) величини занести до таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Теоретичні дані

δ , мм	Λ_T , Гн	Λ_δ , Гн	$\sigma_{вп}$

1.5.9. Звіт до лабораторної роботи повинен містити:

- найменування та мету лабораторної роботи;
- ескіз експериментальної установки;
- таблицю експериментальних і теоретичних даних;
- графічні залежності;
- висновки з роботи.

1.6. Питання для самоперевірки

1.6.1. Закони Ома та Кірхгофа для магнітних кіл.

1.6.2. Розподіл магнітного потоку у повітряному зазорі.

1.6.3. Коефіцієнт випучування магнітного потоку.

1.6.4. Методи розрахунку магнітних провідностей повітряних зазорів та їх зміст.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Тривалість лабораторного заняття - 4 години.

2.1 Мета роботи

Експериментальне та теоретичне визначення розподілу магнітного потоку впродовж магнітного кола та тягової характеристики електромагнітного механізму контактора постійного струму.

2.2. Предмет дослідження

В магнітних колах, на відміну від електричних, де електричний струм проходить виключно по проводах, існують так звані магнітні потоки розсіювання, які проходять у повітрі та лише по окремих ділянках магнітопроводу, обминаючи в більшості випадків робочі повітряні зазори. Один з прикладів розподілу магнітних потоків в електромагніті клапанного типу показаний на рис. 2.1.

Частина магнітного потоку, що проходить поміж осердяч обмотки і ярмом електромагніту являє собою в даному випадку потік розсіювання Φ_s . Його величина залежить від величини робочого повітряного зазору. Чим більше зазор, тим більше потік розсіювання. При великих зазорах потоки розсіювання можуть перебільшувати за значенням робочий потік.

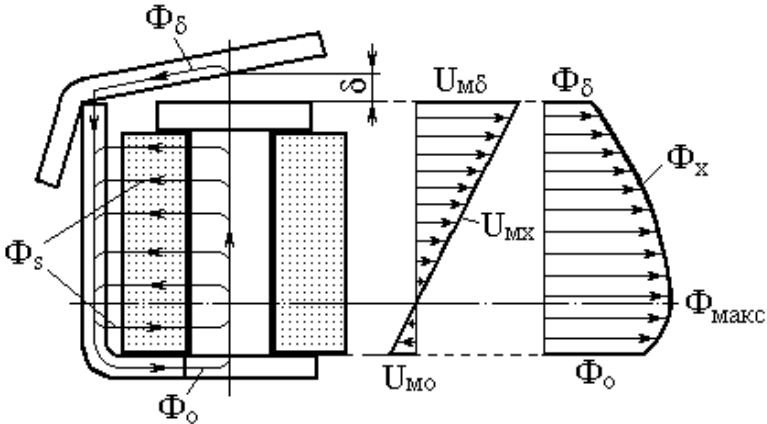


Рисунок 2.1 - Розподіл магнітного потоку вздовж магнітопроводу.

Зв'язок між потоками у магнітопроводі визначається через, так званий коефіцієнт розсіяння, який являє собою відношення потоку у будь-якому перерізі магнітопроводу на відстані x від робочого зазору до потоку у робочому повітряному зазорі

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_x}{\Phi_\delta}, \quad (2.1)$$

Відповідно, потік у перерізі на відстані x від робочого зазору складається з потоку у робочому зазорі й потоку розсіяння:

$$\Phi_x = \Phi_\delta + \Phi_{sx}, \quad (2.2)$$

де Φ_{sx} - магнітний потік розсіювання на ділянці від робочого зазору до перерізу x .

Для розподілу магнітного потоку відповідно рис. 2.1, максимальний потік $\Phi_{\text{макс}}$ буде змінюватися в залежності від величини робочого повітряного зазору: збільшуватися з його зменшенням і зменшуватися зі збільшенням.

Тяговою характеристикою електромагніта називають залежність тягової (електромагнітної) сили від робочого повітряного зазору. Тягова сила електромагнітів визначається магнітним потоком в робочому повітряному зазорі. При малих зазорах, коли можна знехтувати

потоками випучування, тягову силу можна знайти за формулою Максвелла:

$$F_{e/m} = \frac{\Phi_{\delta}^2}{2\mu_0 S}, \quad (2.3)$$

де Φ_{δ} - магнітний потік в зазорі, Вб;
 S - площа полюса, м².

При великих зазорах визначення сили по формулі (2.3) дає помітні помилки. В цих випадках тягову силу розраховують за формулою, одержаною з енергетичного балансу електромагніту:

$$f_{e/m} = 0,5 \cdot (Iw)_{\delta}^2 \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\delta}, \quad (2.4)$$

де $(Iw)_{\delta}$ - магніторушійна сила, яка припадає на робочий зазор, А;

Λ_{δ} - магнітна провідність робочого повітряного зазору, Гн.

Вид тягової характеристики залежить від того, в якій мірі буде змінюватися магнітний потік при зміні зазору. В електромагнітах клапанного типу тягова характеристика має гіперболічний характер. Тобто, при великому повітряному зазорі його зменшення не приводить до значного підвищення магнітної провідності і магнітного потоку, при малому ж зазорі незначне його зменшення приводить до різкого підвищення магнітної провідності зазору, що обумовлює різке підвищення потоку і тягової сили електромагніту.

2.3. Опис експериментальної установки

Дослідження здійснюється на електромагнітному механізмі контактора постійного струму КП-505, з якого знята контактнo-дугогасильна система, а в окремих місцях магнітопроводу намотані вимірювальні котушки, рис. 2.2: на полюсному наконечнику 1 (за допомогою цієї котушки вимірюється магнітний потік в робочому зазорі); в середині осердя 2; біля основи осердя 3; на основі 4; біля основи скоби 5; на середині скоби 6; у верхній частині скоби 7; у середині якоря 8. Кінці вимірювальних котушок виведені до перемикача S , до

якого підключений мілівеберметр Φ . Перемикачем можна підключити до мілівеберметру будь-яку вимірювальну котушку.

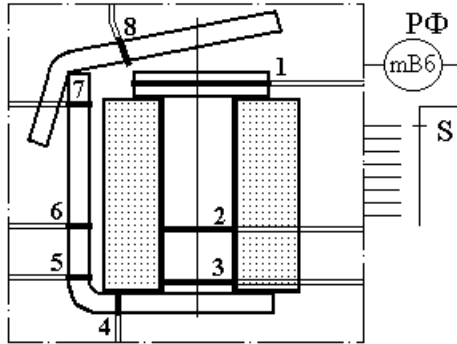


Рисунок 2.2 – Ескіз лабораторної установки.

Електрична схема живлення обмотки електромагніта надана на рис. 2.3., яке здійснюється від мережі змінного струму через автомат Q, автотрансформатор T та перетворювач VD1...VD4.

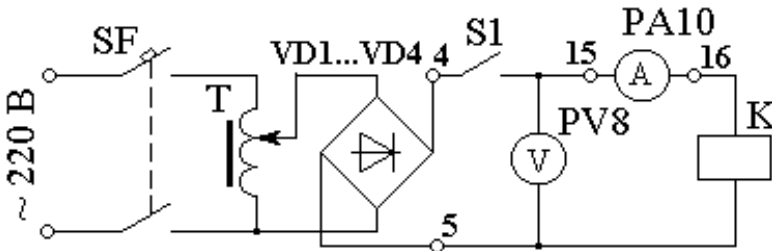


Рисунок 2.3 - Електрична схема живлення обмотки електромагніта.

2.4. Завдання

2.4.1. Експериментальним шляхом визначити розподіл магнітних потоків по довжині магнітопроводу при різних значеннях робочого повітряного зазору від 0 до 5 мм.

2.4.2. Зняти тягову характеристику електромагніту.

2.4.3. Розрахунковим шляхом визначити тягову силу характеристики електромагніту.

2.4.4. Побудувати одержані експериментальні та розрахункові залежності:

- розподіл магнітного потоку по довжині осердя;
- тягові характеристики електромагніту.

2.4.5. Зробити висновки з роботи

2.5. Методичні вказівки

2.5.1. За допомогою коротких провідників здійснити електричні з'єднання відповідно до рис.2.3., встановивши перемички на лабораторному стенді та панелі лабораторної роботи 4-4, 5-5, 15-15, 16-16 за допомогою електричних дротів.

2.5.1. За допомогою прокладок встановити потрібний робочий повітряний зазор.

2.5.2. Підключити до перемикача S мілівеберметр.

2.5.3. Увімкнути автомат SF і за допомогою автотрансформатора T встановити напругу 210 В, контролюючи її по приладу PV8.

2.5.4. Увімкнути тумблер S1.

2.5.5. Рукоятку перемикача S встановити на потрібну вимірювальну котушку відповідно до потрібного перерізу магнітопроводу.

2.5.6. Перемикач мілівеберметру встановити в положення "Коректор" і рукояткою "Коректор" вивести стрілку приладу до крайнього лівого положення. Покази приладу занести до таблиці 2.1.

2.5.7. Вимкнути тумблер S1 і помітивши відхилення стрілки мілівеберметру, занести його до таблиці 2.1.

2.5.8. Магнітний потік у відповідному перерізі визначити за формулою

$$\Phi_i = \frac{c \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)}{w_n}, \quad (2.5)$$

де i - номер вимірювальної котушки відповідно до положення перемикача S;

α_1, α_2 - відповідно кінцеве і початкове відхилення стрілки мілівеберметру у діленнях;

c - постійна мілівеберметру, яка дорівнює 10^{-4} Вб/діл;

w_n - кількість витків вимірювальної котушки, яке дорівнює 6.

Таблиця 2.1 - Розподіл магнітних потоків вздовж магнітопроводу

Повітряний зазор, мм	Показання мілівеберметра, магнітний потік	Номери вимірювальних котушок							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$\delta = 0$	α_1 , ділення α_2 , ділення Φ , Вб								
$\delta = 1$	α_1 , ділення α_2 , ділення Φ , Вб								
$\delta = 3$	α_1 , ділення α_2 , ділення Φ , Вб								
$\delta = 5$	α_1 , ділення α_2 , ділення Φ , Вб								

2.5.9. Повторити дослід, починаючи з п. 2.5.4, для інших вимірювальних котушок.

2.5.10. За допомогою прокладок встановити нове значення робочого повітряного зазору згідно таблиці 2.1 і знову виміряти магнітні потоки згідно пп 2.5.4-2.5.9.

2.5.11. Зняти тягову характеристику електромагніту при напрузі живлення котушки електромагніту 170 і 210 В.

2.5.12. Тягова сила електромагніта вимірюється за допомогою динамометра. Її значення фіксується в момент відриву якоря від осердя.

2.5.13. Для визначення тягових зусиль відносно осі електромагніта необхідно скласти кінематичну схему і знайти співвідношення плечей.

2.5.14. Розрахувати тягову силу по формулах, що приведені в літературних джерелах.

2.5.15. Експериментальні та розрахункові значення тягових сил занести до таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 - Дослідні та розрахункові значення тягових сил

Показники	$U_1 = 210 \text{ В}$				$U_2 = 170 \text{ В}$			
	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
Тягова сила (дослід), Н								
Тягова сила (розрахунок), Н								

2.5.16. Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- а) мету роботи;
- б) ескіз лабораторної установки;
- в) кінематична схема для приведення тягових зусиль до осі електромагніта;
- г) таблиці експериментальних і розрахункових даних і побудовані за ними криві розподілу магнітного потоку по довжині осердя котушки та тягові характеристики;
- д) висновки з роботи.

2.6. Питання для самоперевірки

- 2.6.1. Що являє собою коефіцієнт розсіювання?
- 2.6.2. Як буде змінюватися коефіцієнт розсіювання при зростанні робочого зазору?
- 2.6.3. При якому значенні робочого зазору коефіцієнт розсіювання буде прагнути до одиниці?
- 2.6.4. Вплив потоку розсіяння на ступінь насичення сталі.
- 2.6.5. Характер зміни тягової статичної сили електромагніта від робочого зазору.
- 2.6.6. Картина розподілу потоку і падіння магнітного потенціалу вздовж осердя електромагніта.
- 2.6.7. Основні закони для розрахунку електромагнітів постійного струму.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТА ЗМІННОГО СТРУМУ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години.

3.1. Мета роботи

Експериментальне та теоретичне визначення розподілу магнітного потоку впродовж магнітного кола, а також впливу площі яка обіймається короткозамкнутим витком, на пульсацію тягової сили електромагніту змінного струму.

3.2. Предмет дослідження

На відміну від магнітних систем постійного струму середнє значення амплітуди магнітного потоку в магнітній системі змінного струму практично не залежить від повітряних зазорів і може бути знайдено за формулою:

$$\Phi_{\text{мсер}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega \cdot w} = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w}, \quad (3.1)$$

де U – діюче значення напруги живлення обмотки електромагніту;

$\omega = 2\pi f$ - кутова частота джерела живлення обмотки електромагніту;

w - кількість витків обмотки електромагніту.

В робочому повітряному зазорі магнітний потік

$$\Phi_{\text{тд}} = \frac{\Phi_{\text{мсер}}}{\sigma_{\text{сер}}},$$

де $\sigma_{\text{сер}}$ - коефіцієнт розсіювання (враховує наявність потоків розсіювання), відповідний до середнього значення магнітного потоку в магнітопроводі.

Значення $\sigma_{\text{сер}}$ в електромагнітних механізмах, яке характеризується непостійністю повітряних зазорів, змінюється із зміною зазору.

Зі зменшенням зазорів $\sigma_{\text{сер}}$ зменшується, зі збільшенням - збільшується.

Таким чином, не дивлячись на постійне значення потоку $\Phi_{\text{м.сер}}$, потік Φ_{δ} змінюється із зміною зазору. За цієї ж причини будуть змінюватися потоки і на інших ділянках магнітопроводу. Однак, зміни потоків будуть менше, ніж в аналогічних магнітних системах постійного струму. Пояснюється це тим, що в магнітних системах постійного струму із зміною зазорів змінюється як величина потоку, так і відповідні коефіцієнти розсіювання.

Магніторушійну силу котушки як постійного, так і змінного струму з деяким наближенням знаходять за такою формулою:

$$(Iw) = \frac{\Phi_{\text{м.сер}}}{\sqrt{2}} \cdot Z_{\text{м}\Sigma}, \quad (3.2)$$

де $Z_{\text{м}\Sigma}$ - сумарний магнітний опір магнітного кола.

В магнітних системах змінного струму (Iw) буде змінюватися із зміною зазору. Якщо величину зворотну $Z_{\text{м}\Sigma}$ прийняти такою, що дорівнює лише магнітній провідності робочого повітряного зазору і виразити її без урахування випучування, то для магнітної системи змінного струму

$$(Iw) = \frac{\Phi_{\text{м.сер}} \cdot \delta}{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot S},$$

де μ_0 - магнітна проникність повітря, яке дорівнює $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;
 S - площа полюса робочого зазору, м^2 ;

δ - розмір зазору, м.

Тобто магніторушійна сила котушки пропорційна розміру зазору. Але в дійсності, в зв'язку з присутністю магнітного опору сталі та інших повітряних зазорів (крім робочого), прямої пропорційності не спостерігається, та все ж залежність (Iw) від δ значна.

В однофазних магнітних системах змінного струму магнітний потік, змінюючись по синусоїдальному закону, двічі за період проходить через нульове значення. Тягова ж сила також змінюється по синусоїдальному закону, але має дві складові - постійну та змінну і яка змінюється від нуля до максимальної величини. Очевидно, що будуть

існувати проміжки часу, коли тягова сила буде менше ніж протидіюча сила. В ці проміжки якорь під дією протидіючих сил буде відпадати від осердя, а при зростанні сили - притягуватися. Виникає явище вібрації якоря, яке негативним чином впливає на роботоздатність і характеристики електромагнітів змінного струму.

Щоб уникнути цього явища в однофазних електромагнітах змінного струму застосовують різні заходи - наприклад, збільшення маси рухомих частин електромагніту, збільшення сил тертя в осях обертання та ін. Одним з ефективних методів, що дозволяють уникнути вібрації якоря - це використання короткозамкнених витків, які обіймають частину поверхні полюсу робочого зазору електромагніта, рис. 3.1.

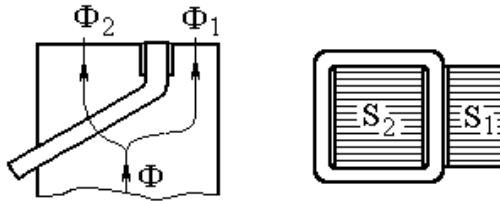


Рисунок 3.1 - Полюс електромагніта з к.з. витком.

За допомогою таких витків магнітний потік Φ розбивається на два потоки: Φ_1 , який проходить крізь площу S_1 і Φ_2 , який проходить крізь площу S_2 .

В короткозамкненому витку під дією змінного потоку Φ_{20} , який створюється обмоткою електромагніту, виникає ЕРС $E_{кз}$, під дією якої в ньому буде протікати струм, який створює магнітний потік $\Phi_{кз}$. Результуючий потік Φ_2 , який складається з геометричної суми потоків Φ_{20} , і $\Phi_{кз}$ буде здвигнутий відносно Φ_1 на кут Ψ , рис. 3.2. Тягові сили, що утворюються магнітними потоками Φ_1 і Φ_2 , будуть зсунуті відносно одна одній на кут 2Ψ , в результаті чого пульсація результуючої сили буде зменшена. Її практично не буде, якщо виконуються умови:

$$\frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{\Phi_2}{S_2} \quad \text{і} \quad \Psi = 90^\circ .$$

тотрансформатор Т. Напряга на котушці електромагніту вимірюється вольтметром PV, а струм в ній - амперметром PA7.

3.4. Завдання

3.4.1. Визначити магнітні потоки в місцях розташування вимірювальних котушок при різних значеннях робочого повітряного зазору і побудувати графік розподілу магнітного потоку впродовж обмотки електромагніту.

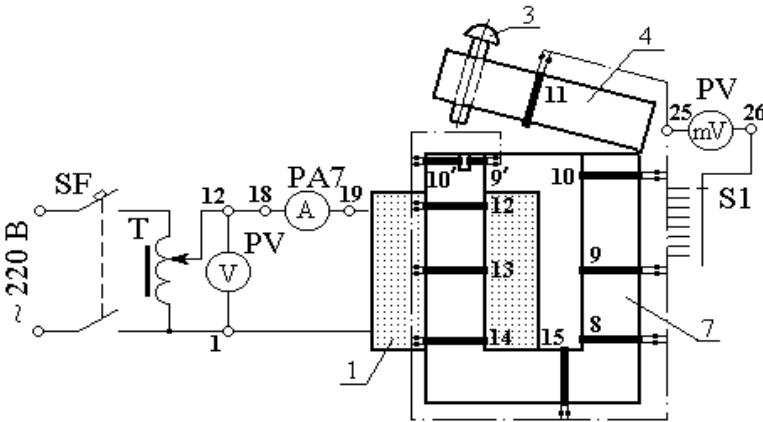


Рисунок 3.3 – Ескіз лабораторної установки та електрична схема з'єднань.

3.4.2. Експериментально одержати залежність струму в котушці електромагніта від величини робочого повітряного зазору і побудувати відповідний графік.

3.4.3. Визначити вплив площі, що обіймає к.з. виток, на мінімальну тягову силу електромагніту і побудувати графік $F_{\min} = f(S_2)$.

3.5. Методичні вказівки

3.5.1. Підключити установку до джерела живлення, а також до вимірювальних приладів, з'єднавши однакові клеми 1-1, 12-12, 18-18, 19-19, 25-25, 26-26 на лабораторному стенді та панелі лабораторної роботи за допомогою коротких провідників.

3.5.2. За допомогою немагнітних прокладок встановити визначений робочий повітряний зазор.

3.5.3. Увімкнути автомат SF; подати напругу не більше 140 В. За допомогою амперметра РА7 виміряти струм у котушці і по контрольним підключенням вимірювальних котушок за допомогою перемикача S1 по приладу PV виміряти напруги на вимірювальних котушках. Одержані дані занести до таблиці 3.1.

3.5.4. Магнітні потоки у відповідних перерізах магнітопроводу реле визначити по формулі

Таблиця 3.1 - Розподіл потоків впродовж магнітопроводу

Зазор, мм	Струм у ко- тушці, А	На- пруга, В	Номери вимірювальних котушок										
			8	9	10	11	12	13	14	15			
0		$U_{ki}, В$ $\Phi_i, Вб$											
2		$U_{ki}, В$ $\Phi_i, Вб$											
4		$U_{ki}, В$ $\Phi_i, Вб$											
5		$U_{ki}, В$ $\Phi_i, Вб$											

$$\Phi_i = \frac{U_i}{4,44 \cdot f \cdot w}, \quad (3.3)$$

де U_i - напруга на відповідній вимірювальній котушці, В;
 w - кількість витків вимірювальних котушок, яке дорівнює 20;
 f - частота змінного струму, яка дорівнює 50 Гц;
дані розрахунку також занести до таблиці 3.1.

3.5.5. Вимкнути автомат SF.

3.5.6. Встановити новий зазор і повторити операції, починаючи з п.5.3

3.5.7. Для виконання п. 4.3 завдання необхідно:

а) встановити короткозамкнутий виток таким чином, щоб він обіймав більшу площу ($S_2 = 2,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$);

б) увімкнути автомат SF і при повністю притягнутому якорі виміряти напругу на котушках 9' і 10' (див. рис.3.3); дані вимірів занести до таблиці 3.2;

в) вимкнути автомат SF, дати охолонути короткозамкнутому витку;

г) встановити короткозамкнутий виток так, щоб він обіймав меншу площу ($S_2 = 0,88 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) і повторити п. б);

3.5.8. Вимкнути автомат SF і відключити установку.

3.5.9. Розрахувати $F_{\text{мін}}$ для відповідного положення короткозамкнутого витка. Для цього необхідно:

а) по формулі (3.3) визначити потоки $\Phi_{9'}$ і $\Phi_{10'}$;

б) значення α , c та $\cos \psi$ визначити за такими формулами:

Таблиця 3.2 - Дослідні та розрахункові дані до визначення $F_{\text{мін}}$

$S_1, \text{ м}^2$	$S_2, \text{ м}^2$	$U_{9'}, \text{ В}$	$U_{10'}, \text{ В}$	$\Phi_{9'}, \text{ Вб}$	$\Phi_{10'}, \text{ Вб}$	α	c	$\cos 2\psi$	$F_1, \text{ Н}$	$F_2, \text{ Н}$	$F_{\text{мін}}, \text{ Н}$

$$\alpha = \frac{S_1}{S_2}; \quad c = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}; \quad \cos \Psi = \frac{\alpha}{c};$$

в) визначити кут 2ψ і $\cos 2\psi$ (його значення може бути від'ємним).

г) F_1 і F_2 підрахувати за формулами:

$$F_1 = \frac{\Phi_{9'}^2}{4\mu_0 S_1}; \quad F_2 = \frac{\Phi_{10'}^2}{4\mu_0 S_2};$$

якщо к.з. виток обіймає більшу площу ($S_2 = 2,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) і

$$F_1 = \frac{\Phi_{10'}^2}{4\mu_0 S_1}; \quad F_2 = \frac{\Phi_{9'}^2}{4\mu_0 S_2};$$

якщо к.з. виток обіймає меншу площу ($S_2 = 0,88 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$);

д) F_{\min} визначити за такою формулою:

$$F_{\min} = F_1 + F_2 - \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos 2\Psi}$$

і дані занести до таблицю 3.2.

3.5.10. По даним таблиці 3.2 побудувати залежність $F_{\min} = f(S_2)$, взявши до уваги, що при $S_2 = 0$ (к.з. виток відсутній), а також при $S_2 = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (к.з. виток обіймає весь полюс) $F_{\min} = 0$.

3.5.11. Звіт до лабораторної роботи повинен містити:

- а) найменування та мету роботи;
- б) ескіз лабораторної установки і електрична схема з'єднань;
- в) таблиці 3.1 і 3.2 і побудовані за цими даними залежності

$F_{\min}(S_2)$, розподілу магнітних потоків по висоті обмотки електромагніта і величини струму від робочого повітряного зазору;

- г) висновки по роботі.

3.6. Питання для самоперевірки

3.6.1. Закон Ома і закони Кірхгоффа для магнітного кола змінного струму.

3.6.2. Як змінюється магніторушійна сила обмоток і потік при зміні повітряного зазору в електромагнітах змінного струму?

3.6.3. Складові струму в обмотці електромагніта змінного струму, його залежність від розміру повітряного зазору.

3.6.4. Способи зменшення пульсації тягової сили і усунення вібрації якоря в електромагнітах змінного струму.

3.6.5. Векторна діаграма потоків в електромагніті змінного струму з короткозамкнутим витком.

3.6.6. Показати графік зміни тягової сили електромагніта змінного струму в функції часу.

3.6.7. Яку частину полюса електромагніта змінного струму повинен обіймати короткозамкнутий виток?

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ СПРАЦЬОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТУ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години.

4.1. Мета роботи

Ознайомитись з принципами впливу на час спрацьовування електромагнітів, а також практичними методами здійснення регулювання витримки часу електромагнітного реле часу.

4.2. Предмет дослідження

Час спрацьовування електромагніту як при включенні, так і при виключенні складається з двох складових :

$$t_{\text{спр}} = t_{\text{зр}} + t_{\text{р}} ,$$

де $t_{\text{зр}}$ - час зрушення, який являє собою час з моменту подачі сигналу на спрацьовування електромагніту до начала руху його рухомих частин;

$t_{\text{р}}$ - час руху.

Сповільнення спрацьовування електромагніту як при його вмиканні, так і при вимиканні від мережі здійснюється збільшенням чи $t_{\text{зр}}$, чи $t_{\text{р}}$. Збільшення $t_{\text{зр}}$ може досягатися за допомогою магнітного демпфування , $t_{\text{р}}$ - за допомогою механічного демпфування.

Магнітним демпфуванням називаються явище впливу на швидкість зміни основного магнітного потоку в магнітопроводі електромагніту при його вмиканні чи при вимиканні. Магнітне демпфування виникає внаслідок утворення вихрових струмів в елементах електромагніту. Магнітні потоки вихрових струмів завжди так спрямовані по відношенню до основного магнітного потоку, щоб підтримати колишній стан магнітної системи. При вмиканні вони зменшують швидкість зростання потоку в магнітопроводі , а при вимиканні - зменшують швидкість спадання потоку.

Ефективність магнітного демпфування тим більше, чим більша абсолютна величина основного потоку. Тому воно забезпечує помітне сповільнення при вимиканні електромагніту, коли індуктивність маг-

нітної системи максимальна. При притягненні якоря, внаслідок великих зазорів, індуктивність системи значно менше і такий метод менш ефективний. Для підсилення магнітного демпфування електромагніти, що призначені для одержання витримки часу, доповнюються спеціальними короткозамкнутими котушками, які обіймають магнітопровід. Короткозамкнута котушка, яка називається демпфуючою, виконується у вигляді масивної гільзи (мідної чи алюмінієвої) чи окремих коротких втулок, які насаджуються на магнітопровід. Наявність масивних гільз чи втулок збільшує вихрові струми, а також, їх магнітні потоки. Найбільший ефект при найменшій витраті матеріалу досягається при довжині гільзи, що дорівнює довжині осердя.

Використання коротких втулок дозволяє одержати різні витримки часу при вмиканні електромагніту в залежності від їх місця розташування на осерді. При розміщенні демпфуючих втулок біля торців осердя (поблизу робочого повітряного зазору) витримка часу при вмиканні буде більшою, ніж при їх розміщенні у основи осердя. Це пояснюється тим, що в першому випадку у початкові моменти часу після вмикання електромагніта, втулки будуть обійматися практично повним магнітним потоком, і в них будуть наводитись значні вихрові струми. У другому випадку на початку після вмикання магнітний потік буде замикатися через якір по повітрю від корпусу до осердя, минаючи втулку, вихрові струми і витримки часу будуть малі. При вмиканні електромагніта місцезнаходження втулок не має великого значення, бо як і в першому так і в другому випадках втулки обіймаються однаковими магнітними потоками.

4.3 Опис лабораторної установки

Об'єктом дослідження в лабораторній роботі є магнітна система реле часу типу РЭВ-800. Електрична схема дослідження показана на рис. 4.1.

У початковому положенні котушка електросекундоміра РТ зашунтована контактом розмикання реле, що випробується. Це необхідно для того, щоб він не працював. При вмиканні тумблера S2 перша пара його контактів підключає котушку реле до джерела постійного струму. Друга пара контактів тумблера S2 шунтує котушку електросе-

кундоміра. При вимиканні тумблера S2 вимикається котушка реле, що випробується, і запускається електросекундомір.

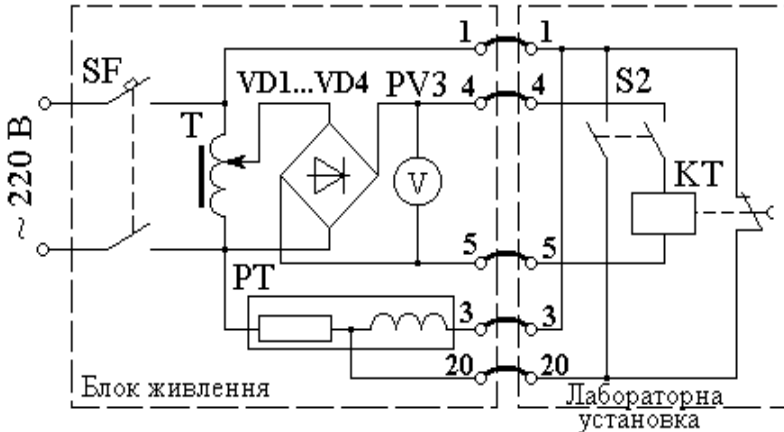


Рисунок 4.1 - Принципова електрична схема дослідження.

4.4 Завдання

4.1. Вивчити конструкцію і способи створення витримки часу, що використовуються в реле часу РЭВ-800 [4].

4.2. Експериментально визначити залежність витримки часу реле від натягу зворотної пружини, величини робочого повітряного зазору і напруги на котушці.

4.3. Побудувати графіки одержаних залежностей і пояснити їх характер.

4.4. Зробити висновки по роботі.

4.5 Методичні вказівки

4.5.1. Для виконання експериментальної частини роботи потрібно здійснити електричні з'єднання у відповідності до рис. 4.1, встановивши короткі перемички 1-1, 3-3, 4-4, 5-5, 20-20 між блоком живлення та лабораторною установкою.

4.5.2. Для виконання п. 4.2 завдання необхідно:

а) встановити заданий натяг зворотної пружини реле, який регулюється ступенево за допомогою фігурних пластин товщиною 1,5 мм; вони закладаються поміж фігурної гайки і шайби; натяг пружини вимірюється кількістю встановлених пластин n ;

б) встановити задану величину робочого повітряного зазору, яка регулюється за допомогою немагнітних (латунних чи мідних) прокладок товщиною 0,1; 0,2; 0,4 і 0,6 мм, що закладаються у карман, закріплений на якорі електромагніту;

в) увімкнути автоматичний вимикач SF, при цьому повинна загорітися лампочка HL;

г) увімкнути S2 і за допомогою автотрансформатора Т, збільшуючи напругу, домогтися спрацьовування реле, а потім встановити задану напругу живлення;

д) встановити стрілку електросекундоміра на нуль;

е) вимкнути S2 і зняти показання електросекундоміра;

ж) вимкнути автомат SF;

з) виконуючи послідовно пункти а-ж, зняти залежності у відповідності до п. 4.2 завдання, заносючи показання електросекундоміра до таблиць 4.1, 4.2, 4.3.

Таблиця 4.1 - Експериментальні дані залежності часу спрацьовування реле від натягу зворотної пружини.

$\delta =$ ___ мм; $U =$ ___ В (задаються викладачем)

Натяг пружини, n	0	1	2	3	4	5
$t_{\text{спр}}, \text{с}$						

Таблиця 4.2 - Експериментальні дані залежності часу спрацьовування реле від величини робочого повітряного зазору.

$n =$ ___; $U =$ ___ В (задаються викладачем)

$\delta, \text{мм}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$t_{\text{спр}}, \text{с}$						

Таблиця 4.3 - Експериментальні дані залежності часу спрацювання реле від величини напруги живлення.

$n =$ _____ ; $\delta =$ _____ мм (задаються викладачем)

U, В	50	80	120	150	200	220
$t_{\text{спр}}, \text{с}$						

4.5.3. Після зняття всіх необхідних залежностей вимкнути автомат SF і встановити автотрансформатор Т у нульове положення.

4.5.4. Звіт до лабораторної роботи повинен містити:

- а) найменування та мета роботи;
- б) електрична схема дослідження;
- в) таблиці з експериментальними даними та побудовані по ним залежності;
- г) висновки по роботі.

4.6 Питання для самоперевірки

4.6.1. Суттєвість принципу магнітного демпфування.

4.6.2. Способи впливу на час руху електромагніта.

4.6.3. Способи впливу на час руху електромагніта.

4.6.4. Схемні методи зміни часу спрацювання електромагніта.

4.6.5. Вплив місця розташування гільзи на магнітопроводі на час спрацювання при вмиканні і вимиканні електромагніту.

4.6.6. Вплив властивостей матеріалу магнітопроводу на час спрацювання електромагніта.

4.6.7. Чому дорівнює час зрушення якоря електромагніту, якщо коефіцієнт запасу дорівнює 1?

Однак при цьому необхідно, щоб стале значення струму в обмотці або падіння напруги на ній було постійним, тобто

$$I_{-\square} = \frac{U}{R_h + R} = \text{const, або } U_K = \text{const.}$$

В схемі, що надана на рис. 5.1 б) прискорення спрацьовування здійснюється таким чином. Незаряджена у початковий момент часу ємність C , яка шунтує додатковий опір R , утворює додатковий шлях струму. За рахунок заряду ємності C струм в обмотці електромагніту зростає швидше.

В схемі (див. рис. 5.1 в) додатковий опір шунтується контактом розмикання K , при цьому стале значення струму в обмотці зменшується.

Недоліком використання наданих вище схемних методів прискорення спрацьовування електромагнітів є додаткові втрати потужності у додатковому резисторі.

Для уповільнення спрацьовування електромагнітів при вмиканні можна використати схему, що наведена на рис. 5.1 а), однак напруга U при цьому постійна, що означає те ж саме, що й включення обмотки на знижену напругу.

Для уповільнення спрацьовування електромагнітів при вимиканні використовують схеми наведені на рис. 5.2.

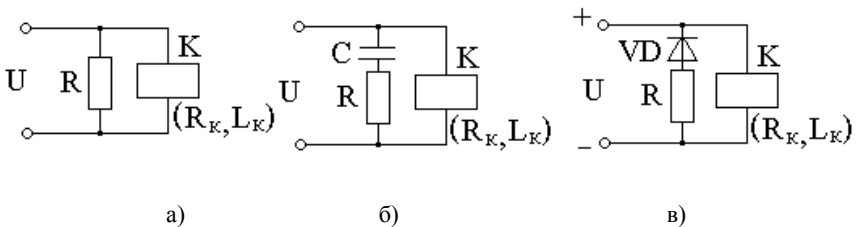


Рисунок 5.2 - Схеми для уповільнення спрацьовування електромагнітів при вимиканні.

В схемі рис. 5.2 а) паралельно з обмоткою електромагніта підключено резистор R , який при вимиканні живлення утворює з обмоткою замкнений контур зі сталою часу

$$T = \frac{L_h}{R_h + R}.$$

В схемі рис. 5.2 б) послідовно з резистором R включено напівпровідниковий діод VD . Це зроблено з метою усунення втрат потужності у резисторі R при тривалій роботі електромагніта.

В схемі рис 5.2 в) паралельно з обмоткою включається R - C ланцюжок. При вимиканні кола конденсатор C розряджається через обмотку електромагніта і уповільнює спадання струму в ній.

5.3 Завдання

5.3.1. Визначити, як змінюється залежність часу спрацьовування електромагніту при вимиканні від величин R , C , K , VD в різних схемах уповільнення та прискорення спрацьовування електромагніту.

5.3.2 Визначити, як змінюється залежність часу спрацьовування електромагніту при вимиканні від величин R , C , K , VD в різних схемах уповільнення та прискорення спрацьовування електромагніту.

5.4 Питання для самоперевірки

5.4.1. В яких випадках використовують схемні методи прискорення або уповільнення спрацьовування електромагнітів?

5.4.2. В чому полягає сутність схемних методів прискорення та уповільнення спрацьовування електромагніта?

5.4.3. Які складові часу спрацьовування змінюються за рахунок схемних методів?

5.4.4. За рахунок чого змінюється час спрацьовування в схемах, наданих на рис. 5.1 та 5.2

5.4.5. Яку схему необхідно використовувати для збільшення (зменшення) часу спрацьовування при вимиканні (вимиканні)?

5.4.6. Переваги та недоліки схемних методів прискорення та уповільнення спрацьовування електромагнітів?

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО КОНТАКТНОГО ОПОРУ

Тривалість лабораторного заняття - 6 годин.

6.1. Мета роботи

Експериментально визначити залежність перехідного контакт-ного опору контактів однакової форми (півсфера-півсфера), викона-них з різноманітних матеріалів (мідь-мідь, латунь-латунь, алюміній-алюміній, мідь-мідь із срібним гальванопокрыттям), від сили натиску й визначити похибку експерименту.

6.2. Предмет дослідження

Теорія електричного контакту є основоположною для розуміння фізичних явищ на контактах електричних апаратів. Електричним кон-тактом називається місце переходу струму з одного провідника в ін-ший. Наявність контакту завжди приводить до появи додаткового опору, який називається перехідним контактним опором.

Працездатність, а отже, надійність й довговічність контактів у значній мірі визначаються якістю їх поверхні. Реальні поверхні, зазвичай, мають нерівності трьох видів: мікронерівності, хвилясті та мак-ронерівності, рис. 6.1.



Рисунок 6.1 – Реальна поверхня контакту

Поверхні електричних контактів завжди мають шорсткість, наявність якої приводить до того, що дві поверхні завжди контактують тільки в окремих точках. Механізм контактування при цьому такий: при застосуванні зусиль дві поверхні спочатку стикаються у місцях

великих виступів, які деформуються; при збільшенні зусилля в контакт входить все більше число мікронерівностей. Цей процес закінчується, коли сума реакцій деформованих мікронерівностей стає рівною контактному зусиллю. В результаті деформації мікронерівностей утворюються невеликі поверхні - осередки проведення струму. При цьому різко змінюється картина протікання струму, лінії струму стягуються до площі зіткнення, рис. 6.2, густина струму в них підвищується, опір протікання струму зростає.

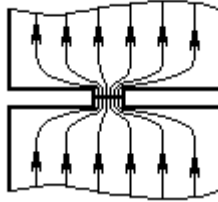


Рисунок 6.2 – Картина протікання струму через точку контактування

Розрізняють уявну (геометричну) площу контакту, окреслену розмірами контактуючих тіл, контурну площу дотику, утворену об'ємним зминанням макронерівностей, та ефективну (фактичну) площу дотикання, яка представляє собою суму фактичних площ контактування й складає незначну долю від геометричної площі [7].

Ефективна (фактична) контактна поверхня для еліптичної моделі мікронерівностей [7].

$$S_{H_{\text{TM, TM}}} = \sum_{i=1}^{n_h} \pi \alpha_i \beta_i \quad (6.1)$$

де n_k - кількість мікронерівностей, що контактують (число контактних плям);

α_i, β_i - півосі i -ї контактної плями.

Число контактуючих мікронерівностей залежить від контактного зусилля. Для установки залежності числа контактуючих мікронерівностей від контактного зусилля необхідно знати характер деформації мікронерівностей, характеристики властивостей матеріалу, деформацію. Складні рівняння, які зв'язують всі вказані параметри, аналітич-

ними методами вирішити неможливо, тому використовують приблизні методи їх вирішення за допомогою комп'ютера.

Таким чином, перша причина появи перехідного контактного опору "стягування" ниток струму до контактних площ внаслідок мікронерівностей (шорсткості) поверхні контактування. Для еліптичної моделі контакту опір стягування визначається залежністю [7].

$$R_{-\square} = \frac{\rho}{4a_i} f_i \left(\frac{\alpha_i}{\beta_i} \right), \quad (6.2)$$

де ρ - питомий електричний опір матеріалу контакту, Ом·см;

a_i - ефективний радіус i -ї контактної площадки, який для еліптичної форми контактної площадки дорівнює $\sqrt{\alpha_i \cdot \beta_i}$;

$f_i(\alpha_i, \beta_i)$ - коефіцієнт, що характеризує вплив еліптичності контактної площадки на опір "стягування".

Для одноточечного контакту з площадкою зіткнення у вигляді кола (сферична модель контакту) опору стягування

$$R_{-\square} = \frac{\rho}{2a_i} \quad (6.3)$$

Рівняння (6.3) одержано Р.Хольмом при таких допущеннях:

- відсутні поверхові плівки;
- в контакті не виділяється джоулева теплота;
- лінії струму не впливають одна на одну;
- контакти абсолютно жорсткі;
- відсутній поверховий ефект;
- відсутні термоелектричні явища (ефекти Томпсона, Пельтьє, Колера).

Друга причина появи перехідного контактного опору - наявність на контактних поверхнях різноманітних плівок, наприклад адгезійних, які мають певний опір [5,6].

Опір поверхневої плівки характеризується залежністю

$$R_{\cdot} = \frac{\rho_{\text{пл}} \cdot \Delta}{S} = \frac{\sigma_{\square}}{\pi \cdot a_i^2} \quad (6.4)$$

де $\rho_{\text{пл}}$ - питомий поверхневий опір плівки, Ом·см;

Δ - товщина плівки, см;

S - площа поверхні зіткнення плівки, см^2 ;

$\sigma_T = \rho_{\text{пл}} \Delta$ - питомий тунельний опір плівки, Ом см^2 .

У загальному випадку перехідний контактний опір може бути представлений сумою:

$$R_{\text{б}} = R_{-\square} + R_{\cdot} = \frac{\rho}{2a_i} + \frac{\sigma_{\square}}{\pi a_i^2} \quad (6.5)$$

Поверхню зіткнення контактів звичайно представляють поділену на такі зони: повної провідності, неповної провідності й непровідності, рис .6.3. Зона повної провідності - це зона чисто металічного контакту. Зона не повної провідності складається із поверхні з дуже тонкими плівками (товщиною в один чи в декілька атомів, молекул), які володіють тунельним опором. Зона непровідності спостерігається при значній товщі плівки, де тунельний ефект неможливий. Ця картина постійно змінюється, оскільки зникають старі осередки провідності, створюються нові й т.д. - контактні поверхні "дихають" [8]. Число контактуючих мікронерівностей є величина, яка визначається поверхнею зустрічі мікронерівностей двох контактних поверхонь під дією контактного зусилля й наявності на контактних поверхнях визначеного виду плівок.



Рисунок 6.3 – Картина контактування із зонами провідності та непровідності

Тому перехідний опір контакту після кожного його замикання буде приймати різне значення. Розклад значень перехідного опору характеризується статистичною нестабільністю перехідного опору, яка визначається як середнє квадратичне відхилення значень перехідного опору. Природа статистичної нестабільності пояснюється можливістю компенсації одного й того ж контактного зусилля при замиканні кон-

такту реакцією різного числа деформованих мікронерівностей. При цьому мінімальне значення опору буде спостерігатись тоді, коли найбільше число мікронерівностей деформовано на величину, декілька більшу товщину плівки (Δ плівки), й, навпаки, максимальне значення - коли найбільше число мікронерівностей деформовано на величину, декілька меншу Δ плівки.

Вплив плівок на процес проходження струму може сказатися лише у слабкострумових контактах (до 5А). При малих струмах й малих контактних тисках (до 1А і 0,1 Н) другий член формули (6.5) може значно перевищити перший. У зв'язку з цим малонавантажені (мало-струмові) контакти виготовляються з благородних металів, які слабо піддаються окисленню і мають невеликий питомий електричний опір.

У багатострумових контактах плівки оксидів руйнуються завдяки сильному натисканню, чи самозачисткою при включенні за рахунок прослизання одного контакту відносно другого.

Для одноточкового контакту перехідний опір, обумовлений стягуванням ліній струму [2,9], Ом:

$$R_h = 0,5\rho \sqrt{\frac{\pi\sigma_{zm} k''}{F_h}}, \quad (6.6)$$

де σ_{zm} - тимчасовий опір зминання матеріалу при пластичній деформації, Н/м²;

F_k - сила контактного натиску, Н.

Для багатоточкового контакту перехідний опір виражається рівнянням [5].

$$R_h = \frac{K}{F_h^n} = \frac{\varepsilon}{F_h}, \quad (6.7)$$

де K , ε - коефіцієнти, які залежать від матеріалу контакту й стану контактних поверхонь;

n – показник ступеню, який залежить від кількості точок зіткнення, форми контактів, змінюються в межах 0,5...1.

Контактний опір залежить також від частоти обробки поверхні. Шліфування, наприклад, приводить до того, що на поверхні залишаються більш пологі виступи з великим перерізом. Зминання таких виступів можливе тільки при великих силах натиску; окисна плівка на

пологих виступах погано руйнується. Тому опір шліфованих контактів вищий, ніж контактів з більш грубою обробкою.

При розрахунках опорів по формулам (6.6), (6.7) необхідно врахувати залежність питомого опору матеріалу контакту від температури. В контактї температура по перерізу неоднакова. При протіканні через площу великих за значенням й таких, що змінюються за часом струмів КЗ, спостерігається витиснення ліній струму на периферію контактної площини, де й спостерігається максимальна температура [6]. Тому при суворому визначенні залежності питомого електричного опору необхідно врахувати закономірність розподілу температури за коефіцієнтами. При приблизних розрахунках опір визначається для середньої температури в зоні звуження (стягування). Вважається, що середня температура приблизно дорівнює 2/3 максимальної температури θ_{\max} , яка відноситься до площадки дотику. Тому для контактів зміна питомого електричного опору від температури [9].

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \theta_{\max} \right), \quad (6.8)$$

де ρ_0 - питомий електричний опір матеріалу контакту при температурі навколишнього середовища, Ом·м;

α - температурний коефіцієнт електричного опору матеріалу, 1/град;

θ_{\max} - максимальна температура площадки дотику.

Аналогічний запис застосовують для опору стягування [2]:

$$R_{\text{ж}} = R_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot \theta_{\max} \right). \quad (6.9)$$

Для звичайних контактних матеріалів залежність (6.9) справедлива до температури рекристалізації ($\theta_{\text{рк}} = 200 \dots 300^\circ\text{C}$) й відповідає ділянці *ав* кривої, рис. 6.4.

При досягненні контактом цієї температури відбувається розм'якшення матеріалу, зменшується (ділянка *вс*). На ділянці *cd* (рис. 6.4) опір зростає відповідно росту питомого опору за законом

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{1}{5} \alpha \theta_{\max} \right). \quad (6.10)$$

Коли досягається температура плавлення $\theta_{\text{пл}}$, матеріал переходить у рідку фазу, і значення R_k зменшується до опору рідкого металу (точка d).

Залежність перехідного контактного опору від механічного зусилля (натиску) носить гіперболічний характер. При невеликому механічному натиску (десяті долі Ньютона), який викликає тільки пружні деформації, з'являється електрична провідність за рахунок тунельного ефекту [8], перехідний опір значний.

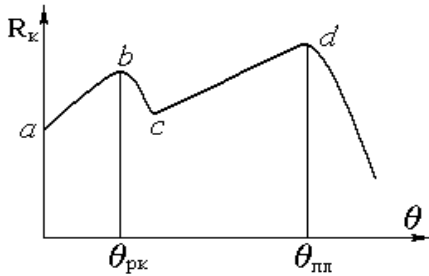


Рисунок 6.4 – Залежність перехідного контактного опору від температури

При середніх натисках діється пластична деформація, яка супроводжується роздавлюванням плівок і утворенням великого числа осередків провідності, й опір різко падає.

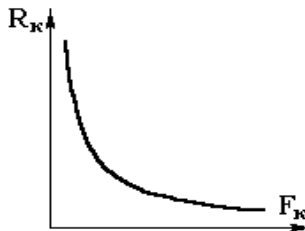


Рисунок 6.5 – Залежність перехідного контактного опору від сили натискування на контакти

При натисканні на контакти силою $1 \dots 10\text{Н}$ внаслідок великих питомих тисків руйнуються крихкі поверхні плівки та металеві виступи (шорсткостей), що приводить до утворення великого числа нових осередків провідності, опір продовжує зменшуватися. З підвищенням числа точок контактування питомі тиски зменшуються, і при подальшому збільшенні сили натиску можна вважати, що перехідний опір не залежить від сили натиску (див. рис. 6.5).

Характер деформації поверхні контактів, кількість і швидкість утворення осередків провідності залежить від геометричної форми контактів, матеріалу, ступеню чистоти обробки поверхні контактування і від сили натиску.

Таким чином, для контактів визначеної форми є певне оптимальне значення сили натискання, яке забезпечує мінімальне значення перехідного опору. Внаслідок зміни стану поверхонь контактування кількісна сторона процесу буде неоднозначною, тобто при багаторазовому знятті залежності $R_k = f(F_k)$ для одних і тих самих контактів і значень контактного тиску значення R_k будуть відрізнятись. Тому для оцінки розброду точок цієї залежності користуються статистичними методами обробки експерименту.

Згідно з теорією інженерного експерименту [9] залежність $R_k = f(F_k)$ є однофакторною, яка залежить від великого числа випадкових причин (стану контактних поверхонь, обробки поверхонь, впливу навколишнього середовища).

Будь-які виміри завжди утворюються з певними похибками (помилками), які підрозділяються на систематичні та випадкові. Систематична помилка спостерігається у тих випадках, коли середнє значення послідовних відліків відхиляється від відомого точного значення. Звичайно ці похибки пов'язані з похибкою приладу, неправильною його установкою, неправильним вибором методів вимірів. В зв'язку з тим, що причина систематичних помилок в більшості випадків відомі, вони в принципі можуть бути виключені. Випадкові помилки викликаються великим числом випадкових причин, дія яких на кожній вимір різна і не може бути раніше врахованою. Хоча виключити випадкові похибки окремих вимірів неможливо, математична теорія випадкових явищ цих похибок на кінцевий результат вимірів і встановити розумне значення похибок.

Деякі визначення й поняття, які використовуються у лабораторній роботі для статистичної обробки результатів експерименту, надані у додатку Д8 [9].

6.3. Опис експериментальної установки

Зняття залежності перехідного контактного опору від сили натиску при незмінному струмі через контакти виконується на установці, яка показана на рис. 6.6. Електрична схема установки показана на рис. 6.7.

На ізоляційній основі 10 закріплені щоки 9, між якими закріплені пластина 4 з нерухомим контактом 6 і коромисло 2 з рухомих контактом 7. Противаги 8 служать для компенсації власної ваги контактів. За допомогою набору важелів 1 створюється необхідний тиск на контакти.

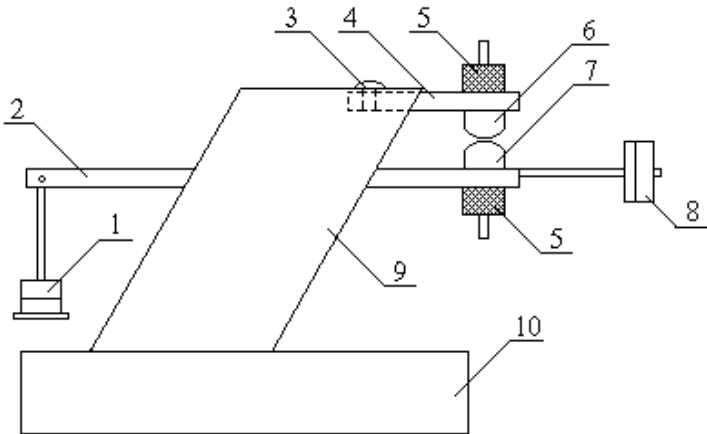


Рисунок 6.6 – Ескіз експериментальної установки

Співвідношення пліч в установці, що зображена на рис.6.6, складає величину 1:5. Нерухомий контакт змінюють таким чином: відвертають гвинт 3, роз'єднують гнучкий дріт контакту 6 (обережно, не гублячи ізоляційну шайбу 5), виймають пластину 4, відвертають контакт 6. Рухомий контакт 7 від'єднують від провідника, що підводить струм, й при важелях 1 і опущеному вниз коромислі 2 замінюють контакт. Після заміну контакту 6 пластина 4 закріплюється гвинтом 3 між щоками 9. При приєднанні провідників, що підводять струм, спочатку встановлюються ізоляційні шайби 5.

Перехідний опір вимірюється методом порівняння падіння напруги на перехідному опорі випробуваних контактів НК і на еталон-

6.4.4. Побудувати на одному графіку залежності $R_k(F_k)$, експериментальні й обчислювальні, порівняти їх.

6.4.5. Зробити висновки з роботи

6.5. Методичні вказівки

6.5.1. Експериментальна частина роботи виконується у такому порядку:

а) встановити контакти з одного матеріалу (див. підрозділ 6.1.);

б) зібрати схему випробування згідно рис. 6.7.;

в) зачистити наждачним папером поверхні контактів і витерти їх після зачистки;

г) перевірити і при необхідності переключити на задану межу струму шунт;

д) увімкнути автомат Q і за допомогою автотрансформатора T встановити за показаннями приладу PA1 струм за вказівкою викладача;

е) при знятих важелях 1 (див. рис. 6.6) за допомогою противаг 8 відрегулювати нульове натиснення;

ж) визначаючи по приладу PA1 наявність струму у колі контактів, встановити вантаж (методом підбору), який відповідає максимальному падінню напруги на НК для даного мілівольтметра (показання мілівольтметра визначити при короткочасному включенні S2 і положенні НК);

з) послідовно збільшити вантаж за допомогою каліброваних важелів 1; для кожного значення сили натиснення провести не менше 5 замірів падіння напруги з інтервалом в одну-дві секунди, знімаючи і знову встановлюючи дану напругу (виключаючи вантаж, який відповідає максимальному U_k); дані вимірів занести до таблицю 6.1;

і) При необхідності перейти на іншу межу вимірів, перемикач S2 встановити в нейтральне положення;

к) вимкнути вимикач S1 і автомат Q;

л) виконати завдання в описаній послідовності.

6.5.2. Дані експерименту обробити за методикою, що надана у додатку Д8. Отримані дані занести до таблицю 6.2.

6.5.3. Одержані значення U_k (див. таблицю 6.1) підставити у формулу

$$R_{\text{ш}} = R \frac{U_{\text{ш}}}{U},$$

де U - падіння напруги на шунті (див. таблицю 6.4), мВ;
 R - опір шунта.

6.5.4. Обчислене значення $R_{\text{к}}$ записати в таблицю 6.3.

6.5.5. Обчислити перехідний контактний опір за формулою (6.7), підставляючи значення F з таблицю 6.1. Значення $\kappa(\epsilon)$ для контактів з різних матеріалів приведені в таблицю 6.4. Обчислені по формулі (6.7) значення $R_{\text{к}}$ записати у таблицю 6.3.

Таблиця 6.1- Експериментальні значення

$F_{\text{к}}$	№ досл.	Матеріал контактів							
		Cu-Cu		Al-Al		Ag-Ag		Латунь-Латунь	
		$U_{\text{к}},$ мВ	$U_{\text{ш}},$ мВ	$U_{\text{к}},$ мВ	$U_{\text{ш}},$ мВ	$U_{\text{к}},$ мВ	$U_{\text{ш}},$ мВ	$U_{\text{к}},$ мВ	$U_{\text{ш}},$ мВ
	1								
	2								
	3								

Таблиця 6.2 – Розрахункові значення

Значення	$F_{\text{к}} =$					$F_{\text{к}} =$...	$F_{\text{к}} =$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
$U_{\text{кі}} - U_{\text{ко}}$																
$(U_{\text{кі}} - U_{\text{ко}})^2$																
$U_{\text{ко}}$																
$U_{\text{к}}$																
$U_{\text{к}} - U_{\text{ко}}$																
$(U_{\text{к}} - U_{\text{ко}})^2$																
$\Delta S_{U_{\text{к}}}^2$																
$\Delta S_{U_{\text{к}}}^*$																
$\Delta U_{U_{\text{к}}}$																
$U_{\text{к}}$																

6.5.6. Експериментальну та розрахункову залежності побудувати на одному графіку.

Таблиця 6.3 – Розрахункові значення

F _к , Н	№ досл.	Матеріал контактів							
		Cu-Cu		Al-Al		Ag-Ag		Латунь-Латунь	
		R _{к.е} , мВ	R _{к.р} , мВ	R _{к.е} , мВ	R _{к.р} , мВ	R _{к.е} , мВ	R _{к.р} , мВ	R _{к.е} , мВ	R _{к.р} , мВ
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

Таблиця 6.4 – Значення коефіцієнта k(ε) для торцевих та площинних контактів, Н^{1/2}·Ом

Матеріал контактів				
Al-Al	Cu-Cu	Ag-Ag	Латунь-латунь	Сталь-сталь
3·10 ⁻⁴	3,16·10 ⁻⁴	1,58·10 ⁻⁴	21,2·10 ⁻⁴	24·10 ⁻⁴

6.5.7. Звіт з лабораторної роботи повинен містити

- електричну схему дослідження;
- таблиці з результатами експериментів
- графіки залежностей $R_k = f(F_k)$.
- висновки з роботи.

6.6. Питання для самоперевірки

6.6.1. Причина виникнення перехідного контактного опору.

6.6.2. Залежність перехідного контактного опору від різних факторів (контактного тиску, властивостей матеріалу, площі контакту, форми контакту, технології виготовлення контакту, температури і т.д.).

6.6.3. Вплив перехідного контактного опору на ресурс контактів (працездатність).

6.6.4. Заходи по зменшенню впливу перехідного контактного опору на працездатність контактів.

6.6.5. Металокерамічні контакти, їх призначення і область використання.

7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ЗУСИЛЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

Тривалість лабораторного заняття - 4 години.

7.1. Мета роботи

Оволодіти методами експериментального і теоретичного дослідження електродинамічних зусиль, що виникають між двома паралельними шинами і двома круговими контурами.

7.2. Предмет дослідження

При проходженні електричного струму через струмоведучі елементи електричних апаратів на окремі їх ділянки діють механічні сили, які називаються електродинамічними зусиллями. Їх виникнення пояснюється з'явленням електромагнітного поля, зв'язаного з протіканням струму у контурі.

При номінальних струмах (десятки, сотні ампер) величина е.д.з. дуже мала, але при струмах короткого замикання, які вимірюються десятками та навіть сотнями кілоампер, вони значно зростають і досить часто визначають потрібну механічну міцність елементів електричних апаратів.

Для визначення е.д.з. використовуються два основних метода. В першому використовується закон Біо-Савара-Лапласа, сутність якого полягає у такому: якщо елементарний провідник dl зі струмом I зна-

ходиться у магнітному полі з індукцією B , яка утворюється іншими провідниками, то сила dF , що діє на елементарний провідник визначається за такою формулою:

$$dF = i \cdot B \cdot dl \cdot \sin \alpha,$$

де α - кут між вектором dl (за направлення приймається напрямок струму) і вектором магнітної індукції.

Другий метод визначення е.д.з. заснований на використанні енергетичного балансу системи провідників зі струмом

$$F_1 = \frac{dA}{dx},$$

де A - електромагнітна енергія;

x - можливе переміщення у напрямку дії сили.

Для системи двох взаємозв'язаних контурів електромагнітна енергія

$$A = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M_{12} i_1 i_2,$$

де L_1 та L_2 - індуктивності контурів;

i_1 та i_2 - струми у контурах;

M_{12} - взаємна індуктивність між контурами.

Енергетичним методом дуже зручно користуватись тоді, коли відома аналітична залежність індуктивності або взаємної індуктивності від геометричних параметрів. При розрахунку е.д.з., що діє між контурами, вважається, що його власна індуктивність не змінюється

$$F = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dx}.$$

Величина е.д.з., що виникає між двома контурами, залежить від добутку струмів, що протікають у них і взаємного їх розташування, яке враховується коефіцієнтом контуру

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 k_k,$$

де k_k - коефіцієнт контуру системи.

Задача по розрахунку е.д.з., як правило, зводиться до визначення коефіцієнта контуру.

7.3. Завдання

7.3.1. Експериментально визначити залежність коефіцієнта контуру двох паралельних шин прямокутного перерізу від відстані між ними і побудувати її графік.

7.3.2. Розрахувати залежність коефіцієнта контуру для випадку, вказаного у попередньому пункті.

7.3.3. Експериментально визначити залежність коефіцієнта контуру двох кругових кілець (катушок) прямокутного перерізу від відстані між ними і побудувати її графік.

7.3.4. Розрахувати залежність коефіцієнта контуру для випадку, вказаного у попередньому пункті.

7.4. Методичні вказівки

7.4.1. Зібрати схему у відповідності до рис. 7.1.

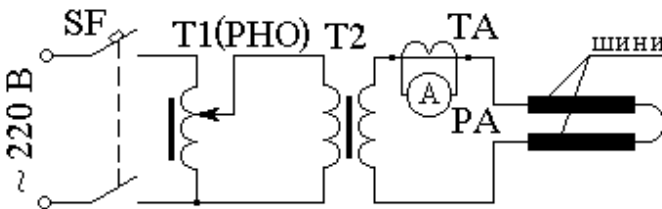


Рисунок 7.1 - Схема дослідження е.д.з. плоских шин.

7.4.2. Увімкнути автомат SF та регулюючи напругу за допомогою T1 (PHO) зняти залежність е.д.з. (визначається за величиною деформації пружини), а також відстань між відстанню між шинами в залежності від величини струмового навантаження. Початкова відстань між шинами задається викладачем. Отримані дані занести до таблиці 7.1

7.4.3. Визначити експериментальну залежність коефіцієнта контуру від відстані між осями шин за формулою

$$\kappa_{\kappa} = 10^7 F_{e/d} (Iw)^2; w = 3500.$$

Таблиця 7.1 - Залежність коефіцієнту контуру від відстані між шинами

I, А						
$F_{e/d}$, Н						
a, м						
κ_{κ} (експер.)						
κ_{κ} (розрах.)						

7.4.4. Розрахувати залежність коефіцієнта контуру від відстані між осями шин за формулою

$$\kappa_{\kappa} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{a \cdot l}{h^2} \left[2 \frac{h}{a} \operatorname{arctg} \frac{h}{a} - \ln \left(1 + \frac{h^2}{a^2} \right) \right],$$

де a - відстань між осями шин;

l - довжина шин ($l = 1025$ мм);

b - ширина шин ($b = 80$ мм).

7.4.5. Побудувати експериментальну та розрахункову залежності коефіцієнта контуру від відстані між осями шин на одному графіку, порівняти їх.

7.4.6. Скласти схему у відповідності до рис. 7.2. З'єднати паралельно між собою котушки та підключити їх до джерела постійної напруги (клеми 4 і 5 лабораторного столу).

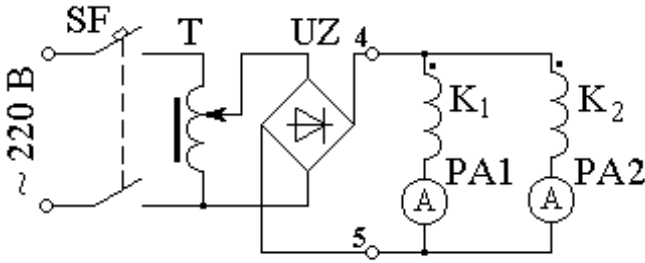


Рисунок 7.2 – Схема дослідження е.д.з. кругових колець (котушок)

7.4.7. Увімкнати автомат SF і підвищуючи напругу трансформатором Т зняти залежність е.д.з. $F_{e/d}$ (визначається за величиною деформації системи пружин). Отримані дані занести до таблицю 7.2. Жорсткість пружини - $0,5 \text{ Н/мм}^2$

Таблиця 7.2 - Залежність коефіцієнту контуру від відстані між котушками

Струм у 1-й котушці I_1 , А				
Струм у 2-й котушці I_2 , А				
Електродинамічне зусилля $F_{e/d}$, Н				
Відстань між котушками x , м				
Коефіцієнт контуру k_k (еспер.)				
Коефіцієнт контуру k_k (розрах.)				

7.4.8. Експериментальне значення коефіцієнту контуру взаємодії котушок визначити за такою формулою

$$k_k = 10^7 \frac{F_{e/d}}{(I_1 w_1)(I_2 w_2)}, \quad \text{де } w_1 = w_2 = 3500$$

7.4.9. Залежність коефіцієнта контуру від відстані між котушками розрахувати за методикою, яка надана у додатку. Використовуючи графічне диференціювання, визначити залежність коефіцієнту контуру від відстані між котушками за такою формулою

$$\kappa_k = 10^7 \frac{dM_{12}}{dx} \cdot \frac{1}{w^2}.$$

7.4.10. Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- а) найменування та мету роботи;
- б) завдання та вихідні дані для розрахунку;
- в) принципові схеми випробувань;
- г) розрахунки й розрахункові формули;
- в) графіки експериментальних та розрахункових залежностей (на одному графіку);
- д) аналіз залежностей та висновки з роботи.

7.5. Питання для самоперевірки

7.5.1. Які існують методи розрахунку електродинамічних зусиль?

7.5.2. Закон Біо-Савара-Лапаласа. Його використання при розрахунку е.д.з.

7.5.3. Рівняння енергетичного балансу. Його використання при розрахунку е.д.з.

7.5.4. Що таке коефіцієнт контуру е.д.з. і від чого він залежить?

7.5.5. В яких випадках використовується той чи інший метод розрахунку е.д.з.?

7.5.6. Як зміниться середнє значення е.д.з. якщо джерело постійного струму замінити на джерело змінного струму?

7.5.7. Для чого розраховують е.д.з. в електричних апаратах?

7.5.8. Поняття електродинамічної стійкості апарата.

8 КОНТРОЛЬНА РОБОТА №1 ДУГОГАСНА КАМЕРА КОНТАКТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

8.1 Мета роботи

Розрахувати геометричні розміри та накреслити ескіз дугогасної системи з щільовою дугогасною камерою контактора постійного струму з системою послідовного магнітного дуття.

8.2 Завдання

За початковими даними, наведеними в таблиці 8.1, за власним варіантом студента, визначеним викладачем, розрахувати критичну довжину дуги ($l_{кр}$), стрілу вильоту дуги (h_0), час гасіння дуги (t_T), а

також параметри системи магнітного дуття. По розрахованим параметрам накреслити ескіз щільової дугогасної камери за умовою того, щоб дуга не виходила за межі дугогасної камери. Перевірити розраховану дугогасну камеру на нагрів.

8.3 Методичні вказівки

Число витків системи послідовного магнітного дуття визначити за умови того, що магнітна система ненасичена, а задана напруженість магнітного поля H визначена для номінального струму I_0 . Геометричні розміри дугогасної камери визначаються критичною довжиною дуги $l_{кр}$ та стрілою вильоту дуги h_0 . Дуга не має виходити за межі

дугогасної камери. Форму дуги на контактах важільного типу можна уявити як частину окружності, побудованої на хорді з розхилу контактів β . Тоді довжина дуги визначається, як:

$$l_0 = \sqrt{\beta^2 + 9V_0^2 \cdot t_e^2}.$$

З цього виразу можна визначити час гасіння дуги t_{Γ} , який відповідає досягненню дуги критичної довжини $l_{кр}$.

$$t_{\Gamma} = \frac{\sqrt{l_{кр}^2 - \beta^2}}{3V_{\delta}}.$$

Стріла вильоту дуги h_{δ} визначається із виразу:

$$h_{\delta} = V_{\delta} \cdot t_{\Gamma}.$$

Критична довжина дуги $l_{кр}$ визначається графоаналітичним методом послідовних наближень, що викладений в [2]. Там же наведений приклад розрахунку дугогасної системи для відкритої дуги постійного струму. Швидкість дуги в магнітному полі напруженістю H (А/см) визначається емпіричною залежністю.

$$V_{\delta} = (6 + \delta_{щ}) \sqrt{\frac{12,5 \cdot I \cdot H_{ВН}}{\delta_{щ}}}.$$

Для побудови вольт-амперних характеристик дуги $U_{\delta} = f(i_{\delta})$ необхідно використовувати емпіричні залежності градієнту напруги дуги $E_{\delta} = f(i_{\delta})$ для щільових дугогасних камер. Для камер з широкою щілиною, коли діаметр дуги $d < \delta_{щ}$, градієнт розраховується за формулою:

$$E_{\delta} \approx \frac{92}{\sqrt{i_{\delta}}} + \frac{0,312 \sqrt{i_{\delta}}}{\delta_{щ}^{2/3}} + 0,37 \cdot 3 \sqrt[3]{\frac{V_{\delta}^2}{i_{\delta}}}, \text{ В/см.}$$

Для камер з вузькою щілиною ($d > \delta_{щ}$):

$$E_{\delta} \approx \frac{92}{\sqrt{i_{\delta}}} + \frac{0,312\sqrt{i_{\delta}}}{\delta_{\text{ц}}^{2/3}} + 7 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{\frac{V_{\delta}^2 \cdot i_{\delta}}{\delta_{\text{ц}}^2}}, \text{ В/см.}$$

Таблиця 8.1 – Вихідні дані для розрахунку дугогасної системи

№ варіа нту	$U_0,$	$I_0,$	$\delta_0,$	$\beta,$	$b,$	τ_{δ}	$Z,$	$T,$	$H,$
	B	A	$мм$	$см$	$см$	$с$	$\frac{1}{\omega \phi}$	$^{\circ}C$	$\frac{A}{см}$
1	1140	40	3	2	1	0.009	600	300	50
2	660	63	2	1.5	1.2	0.01	600	250	60
3	500	80	2	1.6	1.3	0.014	1200	200	80
4	440	100	3	2.0	2.0	0.01	60	230	100
5	360	120	4	2.5	1.5	0.007	1200	400	90
6	320	160	2.5	2.0	1.8	0.01	300	350	120
7	220	180	2.7	3.0	1.9	0.01	2400	450	110
8	110	200	4	2.8	1.8	0.01	600	500	130
9	150	250	6	3.0	1.7	0.008	600	300	160
10	440	320	8	3.2	2.5	0.01	60	400	180
11	60	630	10	4.0	3.0	0.01	1200	400	80
12	1140	63	2	4.8	1.0	0.009	1200	350	60
13	660	80	4	1.5	1.5	0.01	2400	350	80
14	440	160	8	2.0	1.8	0.01	600	400	100
15	220	63	1	1.2	1.2	0.01	60	400	80
16	110	100	4	2.2	2.0	0.007	1200	300	60
17	48	320	6	3.0	2.5	0.001	60	250	100
18	800	80	4	4.5	1.5	0.01	600	300	160
19	220	160	8	3.0	2.0	0.01	1200	400	120
20	440	630	8	4.0	3.0	0.01	600	350	80
21	660	120	2	2.5	2	0.007	600	250	100
22	220	40	3	1.5	1	0.01	1200	300	60
23	110	630	4	3.0	3.5	0.01	600	320	100

Діаметр дуги d визначається за виразом:

$$d = 1.12 \sqrt{\frac{I_{\delta}}{20 + V_{\delta}}}$$

Для декількох значень струму, що вимикає, в діапазоні від 0 до I_0 розраховується $E_{\delta} = f(I_0)$, будується залежність $U_{\delta} = f(I_0)$, де $U_{\delta} = E_{\delta} \cdot l_{\delta}$, використовуючи метод послідовних наближень [2]. Довжина дуги буде дорівнювати критичній $l_{кр}$ в тому випадку, якщо підбором l_{δ} добитися, щоб побудована вольт-амперна характеристика $U_{\delta} = f(I_0)$ лягла трохи вище реостатної або торкнулася її в межах однієї точки. Бокову поверхню охолодження дугогасної камери S_b знаходять з виразу для температури нагріву стінок камери в режимі що встановився:

$$T = T_{окр} + \frac{Z \cdot W_{\delta}}{3600 \cdot K_T \cdot S_{\delta}},$$

де W_{δ} - енергія дуги, що виділяється при одному циклі гасіння;

K_T - коефіцієнт теплопередачі зі стінок камери, приймаючи $15 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}$.

Допустима температура нагріву матеріалу дугогасної камери $^{\circ}\text{T}$ вибирається з таблиці 8.1.

$$W_{\delta} = U_0 \cdot I_0 \cdot \left(\frac{t_{\Gamma}}{6} + \frac{\tau_{\Delta}}{2} \right),$$

де τ_{Δ} - стала часу кола обирається з таблиці 8.1;

Z - частота включень за годину (таблиця 8.1)

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Таев И.С. Электрические аппараты: Общая теория. - М.: Энергия, 1977. - 272 с.
2. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов/ Под ред. И.С. Таева.- М.: Высшая школа, 1987.- 496 с.
3. Новиков Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов. - Л.: Энергия, 1970. - 328 с.
4. Теория электрических аппаратов/ Г.Н Александров, В.В. Борисов, В.Л. Иванов и др.; п/ред. проф. Г.Н. Александрова. - М.: Высшая школа, 1985. - 354 с.
5. Буткевич Г.В., Дегтярь В.Г., Сливинская А.Г. Задачник по электрическим аппаратам. - М.: Высшая школа, 1987. - 232 с.
6. Буль Б.К., Буткевич Г.В., Годжелло А.Г. и др. Основы теории электрических аппаратов/ Под ред. Г.В. Буткевича. - М.: Высшая школа, 1970.- 600 с.
7. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. - М.-Л.: ГЭИ, 1969. - 370 с.
8. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты переменного тока. - М.: Энергия, 1968. - 138 с.
9. Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс. - М.: Энергоатомиздат, 1988 - 720 с.
10. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения/ Н.М. Адоньев, В.В Афанасьев, И.М. Бортник и др. Под ред. В.В. Афанасьева. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 544 с.
11. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей.- М.: Высшая школа, 1967. - 195 с.
12. Акодис М.М., Корзун П.А. Определение восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя. - М.: Энергия, 1968. - 192 с.
13. Электрическая часть станций и подстанций/ А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова и др.; под ред. А.А. Васильева.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 576 с.