

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

КОНТАКТИ ТА ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ЗУСИЛЛЯ В
ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни:
"Основи теорії електричних апаратів"

для студентів усіх форм навчання спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(освітня програма "Електричні та електронні апарати")

Контакти та електродинамічні зусилля в електричних апаратах:
Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Основи теорії
електричних апаратів" для студентів усіх форм навчання спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітня
програма "Електричні та електронні апарати")/ Укл.: О.В. Близняков,
Л.С. Скрупська, О.А. Сахно – Запоріжжя: НУЗП, 2023. – 27 с.

Укладачі: О.В. Близняков, доцент, к.т.н.,
Л.С. Скрупська, ст. викладач.
О.А. Сахно, доцент, к.т.н.

Рецензент: Л.Б. Жорняк, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск: Р.Е. Мохнач

Затверджено на засіданні кафедри
“Електричні та електронні апарати”.
Протокол № 15 від 22 червня 2023 р.

Рекомендовано до видання
на засіданні НМК ЕТФ
Протокол № 10 від 29 червня 2023 р.

З М І С Т

1 Лабораторна робота № 8. Дослідження перехідного контактного опору	4
1.1 Мета роботи	4
1.2 Предмет дослідження	4
1.3 Опис експериментальної установки	9
1.4 Завдання	11
1.5 Методичні вказівки	11
1.6 Питання для самоперевірки	14
2 Лабораторна робота № 11. Дослідження електродинамічних зусиль в електричних апаратах.....	14
2.1 Мета роботи	14
2.2 Предмет дослідження	14
2.3 Завдання	18
2.4 Методичні вказівки	18
2.5 Питання для самоперевірки	20
Перелік джерел посилання.....	22
Додаток А. Статистична обробка результатів експерименту.....	24
Додаток Б. Розрахунок взаємної індуктивності двох кругових контурів	26

1. Лабораторна робота № 8

Дослідження перехідного контактного опору

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

1.1. Мета роботи

Експериментально визначити залежність перехідного контактного опору контактів однакової форми (півсфера-півсфера), виконаних з різноманітних матеріалів (мідь-мідь, латунь-латунь, алюміній-алюміній, мідь-мідь із срібним гальванопокрытjem), від сили натиску й визначити похибку експерименту.

1.2. Предмет дослідження

Теорія електричного контакту є основоположною для розуміння фізичних явищ на контактах електричних апаратів. Електричним контактом називається місце переходу струму з одного провідника в інший. Наявність контакту завжди приводить до появи додаткового опору, який називається *перехідним контактним опором*. ГОСТ 14312-79 визначає перехідний контактний опір як електричний опір зони контактування, що визначається ефективною площею контактування та дорівнює відношенню падіння напруги на контактному переході до струму через цей перехід [13].

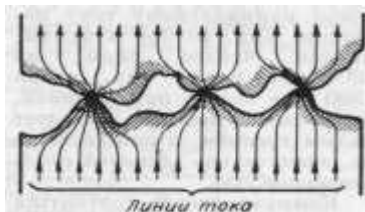


Рисунок 1.1 – Розподіл ліній струму поблизу контактних поверхонь

Основною причиною наявності перехідного контактного опору є нерівності контактних поверхонь. Реальні поверхні, як правило, мають нерівності трьох видів: мікронерівності, хвилястості й макронерівності. Отже, поверхні електричних контактів завжди контактують тільки в окремих точках, як показано на рис. 1.1.

В процесі утворення електричного контакту 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 (так звані *α -плями*). Поблизу контактних поверхонь лінії струму викривляються і стягуються до площ зіткнення, щільність струму в них

значно підвищується, що й є основною причиною наявності перехідного контактного опору. Окрім цього, опір контакту буде визначатись наявністю різного роду плівок, які є наслідком взаємодії матеріалу контакту з навколишнім середовищем.

Розрізняють *уявну* або *геометричну площу контакту* (*apparent contact area*), окреслену розмірами контактуючих тіл, контурну площу дотику, утворену об'ємним змінанням макронерівностей, і *ефективну* або *фактичну площу дотикання* (*real contact area*), яка представляє собою суму фактичних площ контактування й складає незначну долю від геометричної площі, рис. 1.2. [1–9].

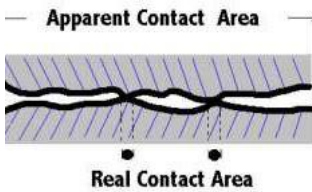


Рисунок 1.2

Отже, перехідний контактний опір у загальному випадку має дві складові:

$$R_k = R_c + R_{пл}, \quad (1.1)$$

де R_c – опір стягування, обумовлений викривленням (стягуванням) ліній

струму в області, що знаходиться поблизу контактної поверхні;

$R_{пл}$ – опір плівок, обумовлений наявністю забруднень та всіяних плівок на контактних поверхнях.

Для еліптичної моделі контакту опір стягування визначається за формулою Хольма [1–9].

$$R_c = \frac{\rho}{2an}, \quad (1.2)$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу контакту;

n – кількість контактних площадок

Рівняння (1.2) одержано Р. Хольмом при допущенні, що площадки розташовані далеко друг від друга (тобто за відсутності взаємного впливу на картину розтікання ліній струму), а також за відсутності поверхового ефекту та термоелектричних ефектів Томпсона, Пельтьє, і Колера.

Число контактуючих мікронерівностей залежить від контактного зусилля, а також форми контактних поверхонь. Як показують теоретичні та експериментальні дослідження, число контактних площадок є випадковою величиною, яка визначається імовірністю зустрічі мікронерівностей двох контактних поверхонь під дією контактного натиску. Тому, звичайно, величина опору стягування після кожного його замикання за такої ж величини контактного натиску буде приймати різні значення. Ро-

зкид цих значень характеризується параметром, який називається *статичною нестабільністю* опору стягування. Вона визначається як середньо-квадратичне відхилення значень опору стягування. При достатньо великих контактних натисненнях розподіл його значень для одній і тій же контактної пари визначається за нормальним законом.

Природа статистичної нестабільності пояснюється можливістю компенсації одного й того ж контактного зусилля при замиканні контакту реакцією різного числа деформованих мікронерівностей. При цьому мінімальне значення опору буде спостерігатись тоді, коли найбільше число мікронерівностей деформовано на величину, декілька більшу товщину плівки, й, навпаки, максимальне значення – коли найбільше число мікронерівностей деформовано на величину, декілька меншу товщину плівки.

Поряд з поняттям статичної нестабільності існує також поняття *динамічної нестабільності* опору контакту. Вона має місце при зовнішніх діях на апарат, головним чином, механічних (ударних, вібраційних) навантаженнях.

Друга причина появи перехідного контактного опору – наявність на контактних поверхнях різноманітних плівок. Це, у першу чергу, т.з. *плівки потемнення*, які, як правило, відносяться до діелектричних плівок. Існує два основні різновиду плівок потемнення: *окисні (оксидні)*, що утворюються в результаті з'єднання металу з киснем повітря, й *сульфідні* (з'єднання металу з сіркою). Плівки потемнення, як правило, мають нерівномірну товщину (порядку 10^{-6} см); їх питомий опір за звичаєм знаходиться у межах 10^4 – 10^9 Ом·см.

Інший різновид поверхневих плівок – це т.з. *адгезійні плівки*, що утворюються в результаті адсорбції та адгезії, тобто поглинання й осадження на контактних поверхнях речовин, які досить часто мають великий питомий опір [7, 8]. Плівки цього виду, як правило, мають відносно малу товщину (2,5–3 нм), проте витримують значні механічні навантаження і не руйнуються при замиканні контактів. Внаслідок дії тунельного ефекту вони не є ізоляторами кола електричного струму. Проте, якщо їх товщина стає більшою, тунельний ефект припиняється, й плівка стає діелектриком.

Існує ще один різновид поверхневих плівок – це т.з. *плівки насичення*. По провідності вони займають проміжне положення між плівками потемнення й адгезійними плівками. Ці плівки часто штучно утворюють на поверхні металу для усунення корозії. Їх товщина більш менш постійна й складає 1,0–1,5 нм, тому вони, також, як і адгезійні плівки,

не є ізоляторами, внаслідок тунельного ефекту.

Отже, контактна площадка або ефективна контактна поверхня у загальному випадку містить три різновиду ділянок: по-перше, це ділянки, де контакт здійснюється через органічні плівки та плівки потемнення (оксидні, сульфідні та ін.), які відносяться до ізолюючих (практично непровідних) плівок; по-друге, це ділянки, де контакт здійснюється через тонкі плівки (адгезійні та пасивації), що мають тунельну провідність (ділянки *квазіметалічного контакту*); по-третє, це ділянки чисто *металічного контакту*. Слід зазначити, що на ділянках чисто металічного контакту розвиваються великі сили міжмолекулярних і міжатомних зв'язків, тому він здійснюється лише на незначних площадках; у противному випадку такий контакт неможливо було б перервати тими зусиллями, які мають місце в реальних апаратах. Отже, наявність на поверхні металу плівки відіграє позитивну роль, не даючи розвиватись великим силам міжмолекулярного зчеплення. В процесі функціонування контактів ця картина постійно змінюється, оскільки зникають старі осередки провідності, створюються нові й т.д.

Вплив плівок на процес проходження струму суттєво впливає лише на функціонування слабкострумових контактів (до 5 А) при малих контактних тисках (до 0,1 Н). У зв'язку з цим слабонавантажені (слабкострумові) контакти виготовляються з благородних металів, які слабо піддаються окисленню і мають невеликий питомий електричний опір. У сильнострумових контактах плівки оксидів руйнуються чи завдяки великим натискам, чи самозачисткою при включенні за рахунок прослизання одного контакту відносно другого.

Велике різноманіття процесів, що приводять до утворення поверхневих плівок, а також достатньо складна структура контактної площадки не дозволяють з достатньою точністю аналітичним шляхом визначити перехідний контактний опір з урахуванням опору поверхневих плівок. Тому на практиці їх урахування здійснюється на основі експериментальних досліджень, методів математичної статистики і т.д. Для практичних розрахунків для визначення перехідного контактного опору є формула Хольма, яка за умови пластичної деформації має наступний вигляд:

$$R_c = \frac{\Phi}{2} \sqrt{\frac{\pi[\sigma_{3M}]}{nP_k}}, \quad (1.3)$$

де $[\sigma_{3m}]$ – тимчасовий опір зминання матеріалу при пластичній деформації, Н/м²;

P_k – сила контактного натиску, Н.

Досить часто для розрахунку перехідного контактного опору використовують емпіричну формулу [1–9]:

$$R_k = R_0 + \frac{\kappa}{(0,102P_k)^m}, \quad (1.4)$$

де R_0 , κ – константи, які залежать від матеріалів й стану контактних поверхонь;

m – показник ступеню, який залежить від кількості точок зіткнення (тобто форми контактних поверхонь) і змінюється в межах від 0,5 до 1.

Слід зазначити, що контактний опір залежить також від чистоти обробки поверхні. Наприклад, шліфування контактних поверхонь приводить до утворення більш пологих виступів великих розмірів. Їх зминання здійснюється тільки при великих силах натиску, а окисна плівка на них погано руйнується. Тому опір контактів утворених шліфованими поверхнями суттєво вищий, ніж контактів утворених поверхнями з більш грубою обробкою.

При розрахунках опорів по формулам (1.3) та (1.4) необхідно врахувати залежність питомого опору матеріалу контакту від температури. При цьому слід врахувати розподіл температури у межах області стягування контакту, але його визначення досить складна задача. При приблизних розрахунках вважається, що середня температура в області стягування приблизно дорівнює 2/3 від максимальної температури, тобто температури контактної площадки $\vartheta_{к.пл}$ [1]. Таким чином питомий електричного опір буде визначатись наступним виразом:

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \vartheta_{к.пл} \right), \quad (1.5)$$

де ρ_0 – питомий електричний опір матеріалу контакту при 0°C, Ом·м;

α – температурний коефіцієнт електричного опору матеріалу контакту, 1/K;

Аналогічно визначається опір стягування [1]:

$$R = R_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \vartheta_{\text{к.пл}} \right), \quad (1.6)$$

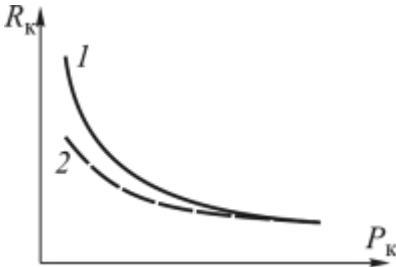


Рисунок 1.3 – Залежність перехідного контактного опору від сили контактного натиску

Залежність перехідного контактного опору від механічного зусилля (натиску) носить, як правило, гіперболічний характер, рис. 1.5 [1]. В області невеликих натисків (десяті долі Ньютонів), які викликають тільки пружні деформації, електрична провідність контакту здійснюється лише за рахунок тунельного ефекту, тому перехідний опір значний. При підвищенні контактного натиску контактний опір суттєво знижується за рахунок пластичної деформації, яка супроводжується руйнуванням ізолюючих плівок і утворенням великого числа осередків провідності (крива 1). З підвищенням числа точок контактування питомі тиски зменшуються, і при подальшому збільшенні сили натиску перехідний опір мало залежить від сили натиску. При зниженні контактного натиску перехідний опір підвищується відповідно до кривої 2, оскільки при пластичній деформації відбувається руйнування мікроступів.

1.3. Опис експериментальної установки

Зняття залежності перехідного контактного опору від сили натиску при незмінному струмі через контакти виконується на установці, яка показана на рис. 1.4. Електрична схема показана на рис. 1.5.

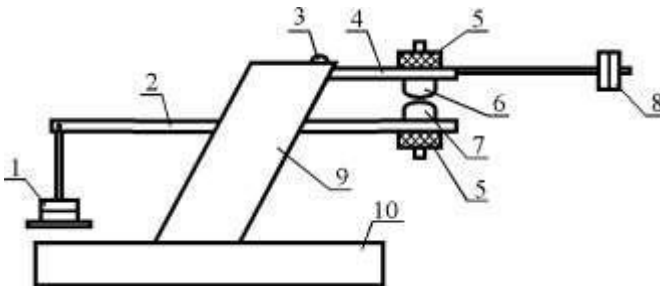


Рисунок 1.4 – Ескіз експериментальної установки.

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. Співвідношення пліч в установці 1:5. Нерухомий контакт замінюють таким чином: відвертають гвинт 3, роз'єднують гнучкий зв'язок контакту 6 (обережно, не гублячи ізоляційної шайби 5), виймають пластину 4, вивертають контакт 6. Рухомий контакт 7 роз'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.

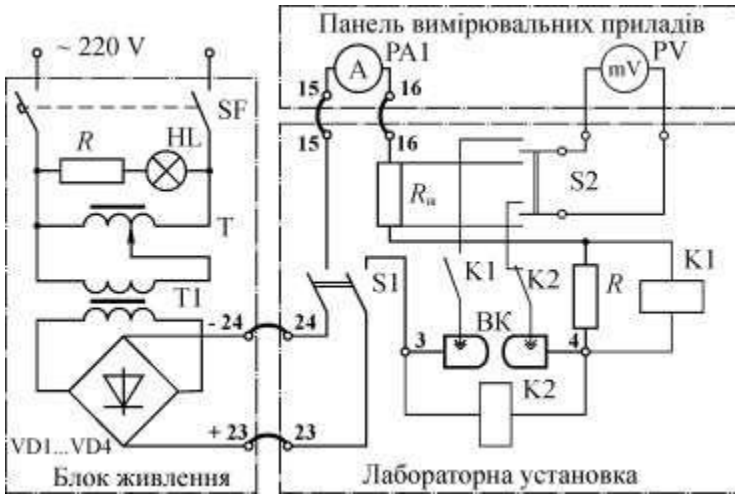


Рисунок 1.5 – Електрична схема установки.

Перехідний опір вимірюється методом порівняння падіння напруги на перехідному опорі випробуваних контактів BK і на сталонному опорі (шунті) $R_{ш}$ при протіканні по ним рівного за значенням струму. Падіння напруги вимірюється мілівольтметром PV. Реле K1 і K2 забезпечують захист мілівольтметра від раптового підвищення напруги на контактах при їх розмиканні. Установка підключається до джерела живлення вимикачем SF, амперметром PA1 контролюється

струм у досліджуваних контактах або у шунті $R_{ш}$, в залежності від положення перемикача S2. Резистор R призначений для обмеження струму через випробувані контакти.

1.4. Завдання

1.4.1. Зняти експериментальну залежність перехідного контактного опору від сили контактного натиску для декількох пар контактів з різних матеріалів (мідь-мідь, алюміній-алюміній, латунь-латунь, срібло-срібло і т. д.).

1.4.2. Обчислити перехідні контакти опори за формулою (1.3) та за емпіричною формулою (1.4).

1.4.3. Побудувати на одному графіку експериментальні й обчислювальні залежності перехідного контактного опору від контактного натиску і порівняти їх.

1.4.4. Виконати статистичну обробку даних експерименту.

1.4.5. Зробити висновки з роботи

1.5. Методичні вказівки

1.5.1. Експериментальна частина роботи виконується у такому порядку:

а) встановити одну з контактних пар відповідно до п 1.4.1 завдання (див. підрозділ 1.2);

б) зібрати схему випробування згідно рис. 1.5;

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 SF і за допомогою автотрансформатора Т встановити за показаннями приладу РА1 струм за вказівкою викладача;

е) при знятих важелях 1 (див. рис. 1.4) за допомогою противаг 8 відрегулювати нульове натиснення, визначаючи по приладу РА1 наявність струму у колі контактів;

ж), встановити вантаж (методом підбору), який відповідає максимальному падінню напруги на ВК для даного мілівольтметра (показання мілівольтметра визначити при короткочасному включенні S2 у положення ВК);

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 табл. 1.1;

Таблиця 1.1 – Експериментальні значення параметрів

P_k, H	№№ дослідів	Матеріал контактів							
		Cu-Cu		Al-Al		Ag-Ag		Латунь-Латунь	
		$U_k, \text{мВ}$	$U_{\text{ш}}, \text{мВ}$	$U_k, \text{мВ}$	$U_{\text{ш}}, \text{мВ}$	$U_k, \text{мВ}$	$U_{\text{ш}}, \text{мВ}$	$U_k, \text{мВ}$	$U_{\text{ш}}, \text{мВ}$
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
...									
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

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

к) вимкнути вимикач S1 і автомат SF;

л) виконати завдання в описаній послідовності.

1.5.2. Дані експерименту обробити за методикою, що надана у додатку А. Отримані дані занести до табл. 1.2.

1.5.3. Одержані значення U_k (див. табл. 1.1) підставити у формулу

$$R_k = R_{\text{ш}} \frac{U_k}{U_{\text{ш}}}, \quad (1.6)$$

де $U_{\text{ш}}$ – падіння напруги на шунті (див. табл.1.1), мВ;

$R_{\text{ш}}$ – опір шунта.

1.5.4. Обчислене значення R_k записати у таблицю 1.3.

1.5.5. Обчислити перехідний контактний опір за формулою (1.4), підставляючи значення P_k з табл. 1.1. Значення k для контактів з різних матеріалів надані у табл. 1.4. Обчислені по формулі (1.4) значення R_k записати у табл. 1.3.

Таблиця 1.2 – Розрахункові значення.

Значення	$P_K =$					$P_K =$						$P_K =$				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
U_{ki}											...					
$\bar{U}_K$																
$U_{ki} - \bar{U}_K$																
$(U_{ki} - \bar{U}_K)^2$																
S^2																
S																
t_α																
ε_0																
U_K																

Таблиця 1.3 – Розрахункові значення перехідного контактного опору

P_K, H	Матеріал контактів							
	Cu-Cu		Al-Al		Ag-Ag		Латунь-Латунь	
	$R_{к.е},$ МОм	$R_{к.р},$ МОм	$R_{к.е},$ МОм	$R_{к.р},$ МОм	$R_{к.е},$ МОм	$R_{к.р},$ МОм	$R_{к.е},$ МОм	$R_{к.р},$ МОм

1.5.6. Експериментальну та розрахункову залежності побудувати на одному графіку.

Таблиця 1.4 – Значення коефіцієнта k для торцевих та площинних контактів, $\text{H}^{1/2} \cdot \text{Ом}$.

Матеріал контактів				
Al-Al	Cu-Cu	Ag-Ag	Латунь-латунь	Сталь-сталь
$3 \cdot 10^{-4}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$	$1,58 \cdot 10^{-4}$	$21,2 \cdot 10^{-4}$	$24 \cdot 10^{-4}$

1.5.7. Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- електричну схему дослідження;
- таблиці з результатами експериментів та розрахунків;

- в) експериментальні та розрахункові графіки залежностей перехідного контактного опору від сили контактного натиснення;
- г) висновки з роботи.

1.6 Питання для самоперевірки

- 1.6.1 Причина виникнення перехідного контактного опору.
- 1.6.2 Що таке уявна (геометрична) площа контакту?
- 1.6.3 Що таке ефективна (фактична) площа дотикання контактів?
- 1.6.4 Які складові має величина перехідного контактного опору?
- 1.6.5 Залежність перехідного контактного опору від різних факторів (контактного тиску, властивостей матеріалу, площі контакту, форми контакту, технології виготовлення контакту, температури і т.д.).
- 1.6.6 Що таке статична та динамічна нестабільність перехідного контактного опору.
- 1.6.7 Як впливає чистота обробки контактної поверхні на перехідний контактний опір?
- 1.6.8 Які типи плівок утворюються на контактній поверхні і як вони впливають на величину перехідного контактного опору?

2. Лабораторна робота №11

Дослідження електродинамічних зусиль в електричних апаратах

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

2.1 Мета роботи

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

2.2. Предмет дослідження.

Електродинамічні зусилля (ЕДЗ) є результатом електромагнітної взаємодії провідників зі струмами. Ці зусилля обумовлені дією сили Лоренца. Звісно, що на заряд, що рухається зі швидкістю $\vec{V}$ у магнітному полі з індукцією $\vec{B}$, діє сила, яка визначається наступним виразом:

$$\vec{F} = q[\vec{V} \times \vec{B}], \quad (2.1)$$

де $[\vec{V} \times \vec{B}]$ – це векторний добуток швидкості $\vec{V}$ та індукції $\vec{B}$.

Елементарний провідник dl зі струмом I містить заряд:

$$dq = Idt \text{ або } dq = I \frac{dl}{V}. \quad (2.2)$$

Отже, буде справедлива наступна рівність:

$$dq \cdot V = I \cdot dl \quad (2.3)$$

Таким чином, зусилля, що діє на елементарний провідник буде визначатись наступним виразом:

$$dF = I \cdot \overline{dl} \times \overline{B}. \quad (2.4)$$

Елементарний провідник є у даному випадку вектор $\overline{dl}$, напрям якого співпадає з напрямом струму у ньому. Отже, у найпростішому випадку на прямолінійний провідник l , який знаходиться в однорідному магнітному полі, діє сила:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (2.5)$$

де α – кут між напрямом струму у провіднику і напрямом вектору магнітної індукції.

Як показує досвід та розрахунки, якщо апарат функціонує у номінальному режимі, тобто при номінальному стумі, ЕДЗ дуже малі. Але при виникненні аварійної ситуації, а саме короткого замикання, коли у струмоведучих елементах апарата течуть струми порядку десятків кілоампер, величини ЕДЗ зростають настільки, що можуть зруйнувати елементи конструкції апарата. Отже, електричний апарат повинен мати відповідну *електродинамічну стійкість*, тобто здатність витримувати дію ЕДЗ при короткому замиканні. Таким чином, розрахунок ЕДЗ є дуже важливою практичною задачею.

Існує два основних методи визначення ЕДЗ: перший – це використання *закону Біо-Савара-Лапласа*, другий – по зміненню запасу електромагнітної енергії.

Використання закону розглянемо на прикладі електромагнітної взаємодії двох провідників l_1 і l_2 довільної форми зі струмами i_1 та i_2 безкінечно малого перерізу. При цьому провідники розташовані довільним чином відносно один одного. Задачею у даному випадку є визначити $F_{1/2}$, тобто зусилля, що діє на провідник l_1 з боку провідника l_2 , що утворює магнітне поле.

Відповідно до закону Біо-Савара-Лапласа (формула 2.4) на елементарний провідник dl_1 буде діяти сила:

$$dF_{1/2} = B_2 \cdot dl_1 \cdot i_1 \cdot \sin \alpha, \quad (2.6)$$

де B_2 – індукція магнітного поля утвореного провідником l_2 , що

діє на елементарний провідник dl_1 .

Для визначення індукції B_2 спочатку треба визначити елементарну індукцію dB_2 , що утворюється елементарним провідником dl_2 . Вона буде визначатись наступним виразом:

$$dB_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i_2 \cdot dl_2 \cdot \sin \beta}{r^2}, \quad (2.7)$$

де β – кут між напрямом струму в елементарному провіднику dl_2 і променем r , що визначає відстань між елементарними провідниками dl_1 та dl_2 .

Індукція B_2 буде визначатись криволінійним інтегралом:

$$B_2 = \frac{\mu_0 \cdot i_2}{4\pi} \cdot \int_{l_2} \frac{dl_2 \cdot \sin \beta}{r^2}. \quad (2.8)$$

Отже, ЕДЗ, що діє на весь провідник l_1 буде визначатись наступним виразом:

$$F_{1/2} = \frac{\mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2}{4\pi} \cdot \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{dl_1 \cdot dl_2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{r^2}. \quad (2.9)$$

Як видно з цього виразу, величина ЕДЗ визначається добутком струмів взаємодіючих провідників і подвійним криволінійним інтегралом, який визначається геометричними параметрами: тобто розмірами, формою і взаємним розташуванням провідників. Цей інтеграл називається *коефіцієнтом контуру ЕДЗ*:

$$k_C = \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{dl_1 \cdot dl_2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{r^2} \quad (2.10)$$

Отже, формула для визначення ЕДЗ матиме такий вигляд:

$$F_{1/2} = \frac{\mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2}{4\pi} \cdot k_C = 10^{-7} i_1 \cdot i_2 \cdot k_C \quad (2.11)$$

При використанні даного методу (закону Біо-Савара-Лапласа) напрям дії ЕДЗ визначається за правилом лівої руки, при цьому напрям вектору індукції визначається за правилом правого гвинта. Досить часто для визначення напрямку ЕДЗ користуються т.з. *правилом Мінкевича*, сутність якого полягає у тому, що ЕДЗ завжди діють в сторону ослабленого магнітного поля.

Другий метод визначення ЕДЗ заснований на використанні *рівняння енергетичного балансу* провідника або контуру (системи провідників) зі струмом.

Якщо знехтувати електростатичною енергією контуру і прийняти, що при його деформації або переміщенні його окремих елементів (під дією ЕДЗ), струми залишаються незмінними, то величина ЕДЗ буде визначатися частинною похідною електромагнітної енергії даного контуру (системи провідників) по координаті у напрямку її дії:

$$F = \frac{\partial W}{\partial x}, \quad (2.12)$$

де W – електромагнітна енергія контуру (системи провідників);
 x – можливе переміщення у напрямку дії ЕДЗ.

Електромагнітна енергія контуру складається з суми власних електромагнітних енергій провідників, відповідного контуру і електромагнітних енергій, обумовлених магнітним зв'язком окремих провідників між собою. Наприклад, для контуру, що складається з трьох магнітно-пов'язаних провідників зі струмами i_1 , i_2 , і i_3 електромагнітна енергія буде визначатися таким виразом:

$$W = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + \frac{1}{2} L_3 i_3^2 + M_{12} i_1 i_2 + M_{13} i_1 i_3 + M_{23} i_2 i_3, \quad (2.13)$$

де L_1, L_2, L_3 , – власні індуктивності провідників;

M_{12}, M_{13}, M_{23} – взаємні індуктивності між відповідними провідниками.

Перші три члени визначають власну електромагнітну енергію провідників, другі – електромагнітну енергію, що обумовлена їх магнітним зв'язком.

Надане рівняння дозволяє розрахувати, як сили взаємодії між провідників, так і сили, що діють в самому провіднику (тобто сили взаємодії між окремими його ділянками). Оскільки величина струму залишається незмінною, то ЕДЗ, що діє на будь-який провідник, буде визначатися похідною індуктивності і взаємної індуктивності за відповідною координатою. Наприклад, для розглянутого вище контуру з трьох провідників ЕДЗ, що діє на 1-й провідник буде визначатися таким виразом:

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{dx} + i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{dx} + i_1 i_3 \frac{dM_{13}}{dx} \quad (2.14)$$

Для усамітненого провідника, тобто провідника магнітно не зв'язаного з іншими провідниками, ЕДЗ буде визначатись лише похідною власної індуктивності:

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{dx}. \quad (2.15)$$

Цим методом зручно користуватись у тих випадках, коли відома аналітична залежність індуктивності і взаємної індуктивності від геометричних параметрів контуру, що розглядається.

2.3. Завдання

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

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

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

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

2.4. Методичні вказівки

2.4.1. Зібрати схему у відповідності до рис. 2.1.

2.4.2. Увімкнути автомат SF та регулюючі напругу за допомогою T1 (РНО) зняти залежність ЕДЗ (визначається за величиною деформації пружини) і відстані між осями шин a від величини струмового навантаження I . Початкова відстань між шинами задається викладачем. Отримані дані занести до таблиці 2.1

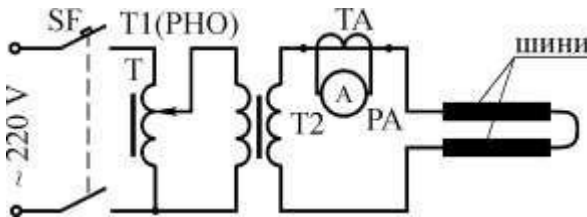


Рисунок 2.1 – Схема дослідження ЕДЗ плоских шин.

2.4.3. Експериментальне значення коефіцієнта контуру визначається за наступною формулою:

$$\kappa_k = 10^7 F_{\text{ед}} \left[(Iw)^2 \right],$$

де w – кількість витків катушок, яке становить 3500.

Таблиця 2.1 – Залежність коефіцієнту контуру від відстані між шинами.

I, A						
$F_{\text{ед}}, H$						
a, m						
κ_k (експер.)						
κ_k (розрах.)						

2.4.4. Розрахункове значення коефіцієнта контуру визначається за наступною формулою [1–4]:

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

де a – відстань між осями шин;

l – довжина шин, яка становить 1025 мм;

b – ширина шин, яка становить 80 мм.

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

2.4.6. Скласти схему у відповідності до рис. 2.2. З'єднати паралельно між собою котушки та підключити їх до джерела постійної напруги (клеми 4 і 5 лабораторного столу).

2.4.7. Увімкнути автомат SF і підвищуючи напругу трансформатором Т зняти залежність ЕДЗ (визначається за величиною деформації системи пружин) і відстані між осями шин a від величини струмового навантаження котушок. Отримані дані занести до табл. 2.2. Жорсткість пружини складає $0,5 \text{ Н/мм}^2$

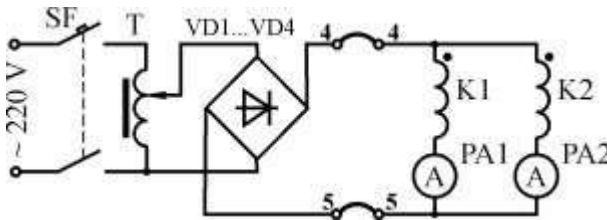


Рисунок 2.2 – Схема дослідження ЕДЗ кругових кілець (котушок)

2.4.8. Експериментальне значення коефіцієнту контуру взаємодії котушок визначити за такою формулою:

$$\kappa_k = 10^7 \frac{F_{e/d}}{(I_1 w_1) (I_2 w_2)},$$

де w_1, w_2 – кількість витків котушок, яке становить 3500

Таблиця 2.2 – 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 κ_k (еспер.)				
Коефіцієнт контуру κ_k (розрах.)				

2.4.9. Розрахункове значення коефіцієнта контуру визначити за такою формулою:

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

де M_{12} – взаємна індуктивність котушок, яка визначається за методикою, яка надана у додатку Б.

Похідну взаємної індуктивності котушок по відстані між ними визначити використовуючи графічне диференціювання.

2.4.10. Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- найменування та мету роботи;
- завдання та вихідні дані для розрахунку;
- принципові схеми випробувань;
- розрахунки й розрахункові формули;
- графіки експериментальних та розрахункових залежностей;
- аналіз залежностей та висновки з роботи.

2.5. Питання для самоперевірки

2.5.1. Які існують методи розрахунку електродинамічних зусиль?

2.5.2. Закон Біо-Савара-Лапаласа. Його використання при розрахунку ЕДЗ

2.5.3. Рівняння енергетичного балансу. Його використання при розрахунку ЕДЗ

2.5.4. Що таке коефіцієнт контуру ЕДЗ і від чого він залежить?

2.5.5. В яких випадках використовується той чи інший метод розрахунку ЕДЗ?

- 2.5.6. Як зміниться середнє значення ЕДЗ якщо джерело постійного струму замінити на джерело змінного струму?
- 2.5.7. Для чого розраховують ЕДЗ в електричних апаратах?
- 2.5.8. Поняття електродинамічної стійкості апарата.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Andrienko, P.D. Switching Transients in Electrical and Electronic Apparatus / P.D. Andrienko, O. V. Blyzniakov, M.I. Kotsur – Zaporizhzhia: NU «Zaporizhzhia polytechnic», 2021. – 128 p.

2. Electromagnets Calculations: Methodical Instructions to Perform the course work: "Fundamentals of Electrical Apparatuses Theory" for the students studying on the direction 141– Electromechanics / comp.: O. V. Blyzniakov, L. S. Skrupskaya. – Zaporizhzhia : ZNTU, 2017. – 18 p.

3. Methodical instructions to the calculation and graphic task in the discipline "Fundamentals of the theory of electrical devices" for students of all educational forms of the first (bachelor) higher education level of specialty 141 – Electric power, electrical and electromechanical engineering (educational program "Electrical and electronic devices") / Compiled by O.V. Blyzniakov. – Zaporizhzhia: Zaporizhzhia Polytechnic NU, 2021. – 18 p.

4. Близняков, О. В. Дослідження та випробування електричних апаратів: Навчальний посібник [Текст] / О. В. Близняков. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 94 с.

5. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – К.: ДП «УкрНД-НЦ», 2016. – 31 с.

6. ДСТУ ГОСТ 2.307:2013 Единая система конструкторской документации. Нанесение размеров и предельных отклонений (ГОСТ 2.307-2011.IDT).

7. ДСТУ 3440-96. Системи енергетичні. Терміни та визначення [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://online.budstandart.com>

8. Клименко, Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник [Текст] / Б. В. Клименко. – Харків: Точка, 2012. – 340 с.

9. Клименко, Б. В. Електричні та магнітні пристрої, електричні аксесуари, електричні установки. Терміни, тлумачення, коментарі: навчальний посібник [Текст] / Б. В. Клименко. – Харків: Точка, 2009. – 272 с

10. Клименко, Б. В. Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі: навчальний посібник [Текст] / Б. В. Клименко. – Харків: Талант, 2008. – 208 с.

11. Методичні вказівки до розрахунково-графічного завдання з дисципліни «Основи теорії електричних апаратів» для студентів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітня програма "Електричні та електронні апарати") / Укл.: О. В.

Близняков. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 18 с.

12. Осташевський, М. О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник [Текст] / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.

13. Родзевич, В. Е. Загальна електротехніка: Навч. Посібник [Текст] / В. Е. Родзевич. – К.: Вища шк., 1993. – 183 с.

14. Розрахунок теплових режимів електричних апаратів: Методичні вказівки до розрахунково-графічного завдання з дисципліни: «Основи теорії електричних апаратів» для студентів спеціальності 141– Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка усіх форм навчання / уклад.: О. В. Близняков, Л. С. Скрупська – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. – 14 с.

Додаток А.

Статистична обробка результатів експерименту

Як зазначалось, перехідний контактний опір є випадковою величиною. Тому кожне вимірювання при ідентичних умовах дає різний результат, тобто дає похибку, яка у даному випадку пов'язана не тільки з похибками вимірювальних приладів, але й з фізичними явищами, що відбуваються у самому контакті. Похибкою вимірювання вважають відхилення результатів i -го вимірювання a_i від істинного значення вимірюваної величини a , тобто:

$$\Delta a_i^* = a - a_i. \quad (\text{A.1})$$

Слід зазначити, що похибка вимірювання, як правило, невідома бо невідоме істинне значення вимірюваної величини. Отже, однією з задач математичної (статистичної) обробки результатів експерименту є визначення похибки окремих вимірювань (дослідів) та оцінка істинного значення вимірюваної величини за отриманими даними.

Як зазначалось вище, при дослідженнях перехідного контактного опору розподіл випадкових похибок відповідає т.з. *нормальному закону розподілення*. Відповідно до цього закону щільність розподілу імовірностей появи того чи іншого значення a_i визначається наступною залежністю:

$$y(a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(a_i - a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (\text{A.2})$$

де σ – середньоквадратична похибка результатів вимірювання;

σ^2 – генеральна дисперсія результатів вимірювання, яка характеризує розкид значень вимірюваної величини відносно її істинного значення.

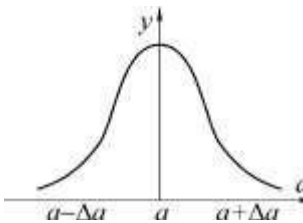


Рисунок А.1 – Крива Гауса

Графічне зображення закону розподілення випадкових величин є крива нормального розподілення або *крива Гауса*, яка наведена на рисунку А.1. Слід зазначити, що функція $y(a)$ безперервна і описує генеральну сукупність, яка вміщує нескінченну множину вимірювань. Але на практиці дослідник має можливість здійснити обмежену кількість (за звичаєм не більше 5–6) вимі-

рювань, тобто вибірку з генеральної сукупності. Тому числові характеристики, які визначені на основі обмеженої кількості вимірювань, є наближеними і їх називають *вибірковими оцінками*.

Вибіркова оцінка істинного значення вимірюваної величини визначається як середнє арифметичне з n паралельних вимірювань:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (\text{A.3})$$

Середнє арифметичне значення частіш за все є найбільш близьким до істинного значення вимірюваної величини та наближується до неї при безкінечній кількості дослідів.

Вибіркові оцінки генеральної дисперсії та середньої квадратичної похибки окремого вимірювання розраховуються за наступними рівняннями:

$$s^2 = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \quad s = \sqrt{\frac{1}{f} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}, \quad (\text{A.4})$$

де f – кількість ступенів свободи, що визначається як $n - 1$

Як зазначалось вище, величину відхилення $a - a_i$ визначити неможливо, бо a невідоме, але математична статистика дозволяє знайти інтервал значень середнього арифметичного $\bar{a} \pm \varepsilon_0$, в який з якоюсь імовірністю P буде попадати величина a . Інтервал від $\bar{a} - \varepsilon_0$ до $\bar{a} + \varepsilon_0$ називається *довірчим інтервалом*; величина ε_0 – похибкою середнього арифметичного, а P називають *довірчою імовірністю*, яка виражається у долях одиниці або у процентах. При знаходженні довірчого інтервалу за звичаєм задаються величиною довірчої імовірності, яка у даному випадку (як і для більшості розрахунків) може бути обрана такою, що дорівнює 0,95 або 95%.

Отже, величина похибки середньоарифметичного при обмеженій кількості дослідів і заданій довірчій імовірності визначається за наступною формулою:

$$\varepsilon_0 = \frac{t_\alpha s}{\sqrt{n}}, \quad (\text{A.6})$$

де t_α – т.з. *коефіцієнт Стюдента*, який враховує відхилення значення s^2 від нормального розподілу при малій кількості дослідів.

Отже, остаточний результат надається у наступному вигляді:

$$a = \bar{a} \pm \varepsilon_0.$$

Це означає, що з довірчою імовірністю P істинне значення вимірюваної величини заключено у довірчому інтервалі з межами:

$$\bar{a} - \varepsilon_0 \leq a \leq \bar{a} + \varepsilon_0.$$

На наступному прикладі розглянуто визначення похибок (конфіденційного інтервалу) при вимірюванні падіння напруги для пари контактів. Для одного і того ж значення контактного натиску проведено 5 паралельних дослідів. У результаті проведених експериментів та математичної їх обробки одержані дані, які надані у таблиці А.1.

Таблиця А.1 – Дані експерименту та їх статистичної обробки

№№ дослідів	1	2	3	4	5
U_{ki} , мВ	24,1	23,6	23,7	24,2	24,4
$\bar{U}_k$, мВ	24,0				
$(U_{ki} - \bar{U}_k)$	0,1	-0,4	-0,3	0,2	0,4
$(U_{ki} - \bar{U}_k)^2$	0,01	0,16	0,09	0,04	0,16
s^2	0,115				
s	0,339				
t_α	2,776				
ε_0	0,42				
U_k	24,0±0,42				

Додаток Б.

Розрахунок взаємної індуктивності двох кругових контурів

Визначення взаємної індуктивності двох кругових контурів зводиться до визначення власних індуктивностей трьох котушок, рис. Б.1.

$$M_{12} = \frac{1}{2}(L_{123} + L_2 - 2L_{12}),$$

де L_2 – індуктивність фіктивної котушки 2 довжиною x , яка має ті ж діаметри d_1 та d_2 і ту ж густину витків w_0 , що й дані котушок 1 і 3;

L_{123} , L_{12} – власні індуктивності котушок, складених відповідно з котушок 1-2-3 і 1-2.

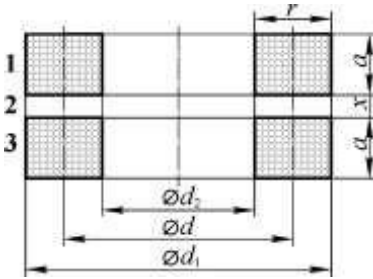


Рисунок Б.1 – До визначення взаємної індуктивності котушок

Власна індуктивність котушок прямокутного перерізу визначається за формулою:

$$L = 10^{-7} w_0^2 r^2 h^2 \Phi \cdot d,$$

де h – висота котушки;

Φ – величина, яка визначається як функція висоти обмотки, яка залежить від наступного співвідношення:

$$\rho = \frac{r}{d} = \frac{40}{200} = 0,2.$$

Для цієї величини функція Φ надана у таблиці Б.1.

Таблиця Б.1 - Функція Φ

h, мм	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Φ	13,2	11,5	10,2	9,1	8,3	7,6	7	6,5	6,05	5,7

Вихідні дані для розрахунку взаємної індуктивності котушок:

$$h_2 = x; h_{123} = 2r + x; h_{12} = r + x; w_0 = 2,21 \text{ мм}^2; r = 40 \text{ мм}; d = 200 \text{ мм}.$$