

Міністерство освіти і науки України

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

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")

2019

Дослідження магнітних підсилювачів: 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. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 27 с.

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

Рецензент: П.Д. Андрієнко, професор, д.т.н.

Відповідальний за випуск: Р.Е. Мохнач

Затверджено на засіданні кафедри
“Електричні та електронні апарати”.
Протокол № 9 від 2 квітня 2019 р.

Рекомендовано до видання на засіданні
навчально-методичної комісії
електротехнічного факультету.
Протокол № 9 від 18 квітня 2019 р.

ЗМІСТ

Вступна частина	4
Загальні відомості про магнітні підсилювачі	4
Лабораторна установка	6
Вказівки з техніки безпеки	8
Підготовка, виконання та захист лабораторних робіт	8
1. Лабораторна робота №1. Дослідження магнітних характеристик феромагнітного матеріала	9
1.1 Мета роботи	9
1.2 Предмет дослідження	9
1.3 Завдання	11
1.4 Методичні вказівки	11
1.5 Контрольні питання	12
2. Лабораторна робота №2. Дослідження дроселя насичення без підмагнічування	15
2.1 Мета роботи	9
2.2 Предмет дослідження	9
2.3 Завдання	11
2.4 Методичні вказівки	11
2.5 Контрольні питання	12
3. Лабораторна робота №3. Дослідження дросельного магнітного підсилювача	20
3.1 Мета роботи	9
3.2 Предмет дослідження	9
3.3 Завдання	11
3.4 Методичні вказівки	11
3.5 Контрольні питання	12
4. Лабораторна робота №4. Дослідження магнітного підсилювача з самонасиченням	36
4.1 Мета роботи	9
4.2 Предмет дослідження	9
4.3 Завдання	11
4.4 Методичні вказівки	11
4.5 Контрольні питання	12
Література	48

ВСТУПНА ЧАСТИНА

Загальні відомості про магнітні підсилювачі

Магнітний підсилювач (МП) являє собою електромагнітний елемент, робоча обмотка якого у широких межах змінює свою індуктивність. Якщо в електромагнітах змінення індуктивності відбувається при змінненні величини робочого повітряного зазору, то в МП, магнітні кола яких не мають повітряних зазорів, змінення індуктивності обмотки відбувається при змінненні магнітного стану окремих ділянок магнітного кола під впливом керуючого магнітного потоку, який утворюється обмоткою керування. МП мають широке та різноманітне використання і після деякого, підчас необґрунтованого, захоплення напівпровідниковими пристроями, вони зайняли достойне місце:

- у вимірювальній техніці;
- в системах керування потужними установками, двигунами постійного та змінного струму;
- у пристроях релейного захисту і автоматики.

Це пояснюється цілою низкою їх переваг. Це, по-перше, висока надійність, оскільки МП являють собою статичні пристрої, які не мають рухомих частин, мають широкий діапазон робочих температур, тисків, вибухово- та пожежобезпечні, працюють в умовах поштовхів та вібрацій. По-друге, МП забезпечують підсилення дуже слабких сигналів (до 10^{-19} Вт) і малі втрати. На відміну від напівпровідникових підсилювачів, МП дуже добре працюють на високих та надвисоких частотах, їх характеристики практично не залежать від температури та напруги мережі.

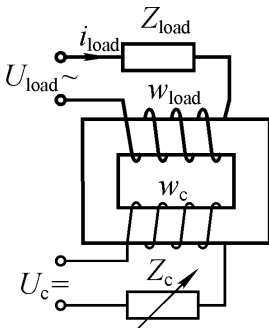


Схема підключення магнітного підсилювача

Принцип дії МП заснований на властивостях кривої намагнічування, яка має вельми нелінійний характер. Для МП використовують, головним чином, магнітотім'які матеріали, які мають дуже вузьку петлю гістерезису, що дозволяє при аналізі їх магнітного стану вважати криву намагнічування безгістерезисною. Найпростіший МП, наданий на рисунку, являє собою звичайний магнітопрвід без повітряних зазорів та дві обмотки. Робоча обмотка w_r підключається до кола навантаження, яке живиться від джерела змінного

струму. Обмотка керування w_k живиться від джерела постійного струму. Якщо не враховувати активний опір робочої обмотки струм в робочій обмотці буде відповідати такому виразу:

$$i = \frac{\dot{U}}{R_p + j\omega L_p},$$

де L_p – індуктивність робочої обмотки МП, яка визначається таким чином:

$$L_p = w_p^2 \Lambda_m = w_p^2 \mu_a \frac{S_m}{l_m},$$

де S_m – переріз магнітопроводу;

l_m – довжина середньої магнітної силової лінії магнітопроводу;

μ_a – абсолютна магнітна проникність матеріалу магнітопроводу.

При постійному значенні S_m і l_m індуктивність робочої обмотки є функцією магнітної проникності μ_a , яка залежить від магнітного стану магнітопроводу. Його змінення здійснюється підмагнічуванням постійним струмом, який тече в обмотці керування w_k і утворює магнітний потік Φ_0 і відповідно магнітну індукцію B_0 .

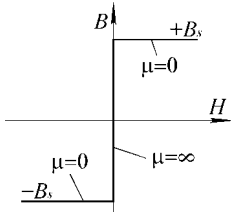
При відсутності струму в обмотці керування $B_0 = 0$ (тобто підмагнічування відсутнє) μ_a дуже велика і при $\omega L_p \gg Z_n$ струм навантаження ін дуже малий. При наявності струму в обмотці керування утворюється магнітний потік $\Phi_0 \rightarrow B_0$ (тобто магнітопровід підмагнічується). Якщо робоча ділянка кривої намагнічування відповідає малій μ_a , то $Z_n \gg \omega L_p$ і струм у робочому колі визначається лише опором навантаження Z_n . Таким чином, робоча обмотка МП при зміненні μ_a у широких межах представляє собою безконтактний комутаційний елемент, який вмикає та вимикає коло навантаження.

Основна складність аналізу роботи МП полягає у значній нелінійності кривої намагнічування, тому використовуються різноманітні спрощення, серед яких найбільш широкое розповсюдження набули дві теорії: лінеаризованого та ідеального МП.

Теорія *лінеаризованого МП* полягає в тому, що магнітна проникність осердя упродовж періоду джерела живлення приймається незмінною; тому МП розглядається як лінійна індуктивність, яка керується; при зміні струму в обмотці керування змінюється індуктивність робочої обмотки і відповідно струм навантаження; близька до даної теорії

картина в реальних МП спостерігається при малій напрузі джерела, коли B_m не досягає ділянки, яка розташована за "коліном" кривої намагнічування (не досягає насичення B_s); проте при роботі реальних МП $B_m \cong B_s$, тому теорія лінеаризованого МП має обмежене використання;

Основне припущення теорії *ідеального МП* полягає у наступному: якщо магнітопровід ненасичений ($|B| < B_s$), то магнітна проникність μ_a і відповідно індуктивність робочої обмотки L_p безкінечно велика; якщо ж магнітопровід насичений ($B \cong B_s$), то L_p дорівнює нулю; тобто реальна крива намагнічування замінюється ідеальною, яка являє собою ламану криву, як показано на рисунку.



Ідеальна крива намагнічування

Таким чином, півперіод джерела живлення складається з двох характерних прошарків часу: 1 – осердя перемагнічується, при цьому робоча обмотка знаходиться у непровідному стані і струм у навантаженні відсутній; 2 – осердя насичене, при цьому опір робочої обмотки стає практично нульовим і струм у робочому колі визначається лише опором навантаження.

Лабораторна установка

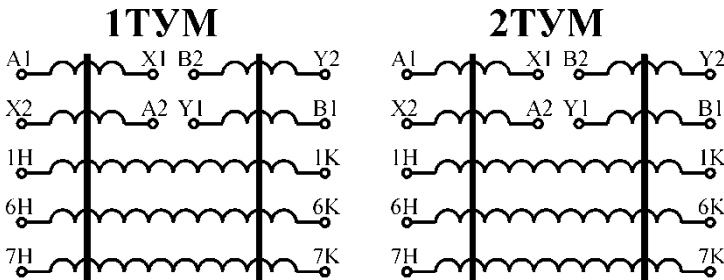
Лабораторні роботи з дослідження магнітних підсилювачів виконуються на лабораторному столі, де розташовані блок живлення та універсальний лабораторний модуль. Блок живлення складається з автоматичного вимикача QF для подачі живлення на стіл і індивідуальних автоматичних вимикачів та тумблерів відповідних джерел живлення.

Клеми джерел розташовані під лабораторним модулем. Для вимірювання струму та напруги при виконанні лабораторних робіт використовуються універсальні прилади, які розташовані на лабораторному столі.

На універсальному лабораторному модулі, зокрема, розміщені магнітні підсилювачі ТУМ А4-11 або ТУМ АЗ-11М. Їхні обмотки виведені на лицеву панель модуля; зовнішній вигляд частини панелі з магнітними підсилювачами надано на наступному рисунку. Паспортні дані обмоток МП надані у наступній таблиці.

При виконанні лабораторних робіт елементи схеми з'єднуються провідниками з штировими або клемними наконечниками. Для утворення вузлів в схемі використовуються клемні колодки, які розміщені

в нижній частині лицевої панелі, кожна з яких містить по чотири з'єднаних між собою гнізда.



Лицева панель з магнітними підсилювачами.

Паспортні дані обмоток магнітних підсилювачів.

Позначення виводів обмоток	Найменування параметрів	Величина параметра	
		ТУМ-А4-11	ТУМ-А3-11М
1Н-1К	Ном. струм (серед. знач.), А	0,152	0,283
	Тривалий струм (серед. зн.), А	0,33	0,66
	Опір при 20°C, Ом	1,6	2,6
2Н-2К	Ном. струм (серед. знач.), А	0,021	0,0213
	Тривалий струм (серед. зн.), А	0,052	0,055
	Опір при 20°C, Ом	1,6	2,6
3Н-3К	Ном. струм (серед. знач.), А	0,009	0,0061
	Тривалий струм (серед. зн.), А	0,074	0,055
	Опір при 20°C, Ом	108	186
4Н-4К	Ном. струм (серед. знач.), А	0,009	0,0078
	Тривалий струм (серед. зн.), А	0,052	0,055
	Опір при 20°C, Ом	170	158
5Н-5К	Ном. струм (серед. знач.), А	0,009	0,0078
	Тривалий струм (серед. зн.), А	0,052	0,055
	Опір при 20°C, Ом	170	158
6Н-6К	Ном. струм (серед. знач.), А	0,009	0,0078
	Тривалий струм (серед. зн.), А	0,1	0,09
	Опір при 20°C, Ом	100	110
7Н-7К	Ном. струм (серед. знач.), А	0,009	0,0078
	Тривалий струм (серед. зн.), А	0,1	0,09
	Опір при 20°C, Ом	100	110

Вказівки з техніки безпеки

1. Перед виконанням циклу лабораторних робіт студенти повинні пройти інструктаж з техніки безпеки і внутрішнього розпорядку в лабораторії і суворо дотримуватись відповідних правил. Студенти, які не пройшли такий інструктаж до виконання лабораторних робіт не допускаються.

2. Зборку схеми та перемикання під час виконання лабораторної роботи потрібно здійснювати при вимкненому вимикачеві QF. Усі автотрансформатори повинні бути у нульовому положенні.

3. Категорично забороняється вмикати схему під напругу без дозволу викладача або лаборанта.

4. Перед виконанням вимірів потрібно встановити вимірювальні прилади у відповідний режим (амперметра або вольтметра).

5. При виконанні пробних вимірів звернути увагу на граничні струми та напруги приладів та обмоток магнітного підсилювача і на вхід його осердя у насичення.

6. При виконанні робочих вимірів уважно стежити за показаннями вимірювальних приладів, не допускаючи їх зашкалення, неправильного підключення та виходу з ладу.

Підготовка, виконання та захист лабораторних робіт

Для успішного і своєчасного виконання кожної лабораторної роботи студент повинен якісно до неї підготуватись поза розкладом лабораторних занять. Під час підготовки студент повинен ознайомитись з цими методичними вказівками, вивчити теоретичний матеріал, а також скласти схему експериментальних досліджень відповідно до теми лабораторної роботи.

Схема експериментального дослідження одразу після початку аудиторного заняття повинна бути узгоджена з викладачем, який веде лабораторні роботи. Після виконання експерименту студент повинен узгодити їх результати, не розбираючи схеми.

За результатами виконання кожної лабораторної роботи студент повинен надати та захистити звіт, оформлений у відповідності до СТП 15-96. Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- титульний лист з найменуванням лабораторної роботи;
- мету роботи;
- схему експериментальних досліджень;
- таблицю експериментальних даних;

- графічні залежності відповідно до завдання;
- осцилограми відповідно до завдання;
- формули, необхідні для розрахунків, відповідно до завдання;
- висновки по роботі.

1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРОМАГНІТНОГО МАТЕРІАЛА

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

1.1 Мета роботи.

Метою роботи є експериментальне визначення основних характеристик кривої намагнічування феромагнітного матеріалу.

1.2 Предмет дослідження.

Якісні властивості і характеристики електромагнітних елементів в значній мірі визначаються властивостями феромагнітних матеріалів, що використовуються в них. Тому вибір матеріалу є дуже відповідальним етапом проектування апарата в цілому і електромагнітної системи зокрема.

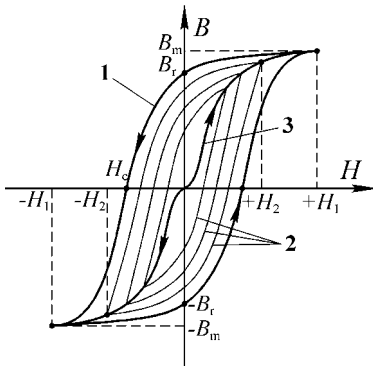


Рисунок 1.1 – Типова крива намагнічування феромагнітного матеріалу

Основною характеристикою, яка визначає властивості феромагнітних матеріалів є крива намагнічування. Вона представляє собою залежність індукції магнітного поля B від його напруженості H і має дуже складний характер: по-перше, вона дуже нелінійна, і, по-друге, неоднозначна, тобто має гістерезис, рис. 1.1.

Залежність $B(H)$ має межу петлю гістерезису 1, яка характеризується залишковою індукцією B_r і коерцитивною силою H_c ; частинні симетричні петлі гістерезису 2 та основна крива намагнічування 3, побудована по вершинам частинних симетричних петель.

Елементи магнітних кіл електричних апаратів виготовляються, головним чином, з магніто-м'яких матеріалів, які характеризуються

дуже вузькою петлею гістерезису. При розрахунках неоднозначність кривої намагнічування не враховується і характеристика матеріалу визначається за основною кривою намагнічування. Зв'язок між індукцією і напруженістю магнітного поля визначається таким виразом:

$$B = \mu_a H = \mu \mu_0 H$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність;

μ – відносна магнітна проникність;

μ_0 – абсолютна магнітна проникність вакуумного середовища.

В ряді випадків користуються так званою диференційною магнітною проникністю

$$\mu_d = \frac{dB}{dH}.$$

Форма статичної кривої намагнічування характеризується коефіцієнтом прямокутності:

$$k_{sq} = \frac{B_r}{B_m}.$$

За формою кривих намагнічування феромагнітні матеріали можна умовно поділити на матеріали з високою прямокутністю, тобто матеріали з "прямокутною" петлею гістерезису ($k_{sq} > 0.85$) і матеріали з низькою прямокутністю ($k_{sq} \leq 0.85$).

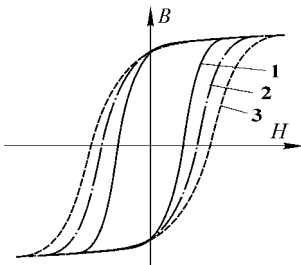


Рисунок 1.2 – Статична та динамічні петлі гістерезису

Надані вище криві являють собою *статичні криві намагнічування*, які отримуються при дуже повільному зміні зовнішнього магнітного поля, тобто $dH/dt \rightarrow 0$. Проте, в реальних електромагнітних системах перемагнічування феромагнітних матеріалів здійснюється при досить швидкому зміні зовнішнього магнітного поля, при цьому дещо змінюється і характер кривої намагнічування. Така крива намагнічування являє собою *динамічну криву намагнічування*, або динамічну петлю гістерезису. Її характер визначається, поперек за все, швидкістю зміння зовнішнього магнітного поля, рис. 1.2.

Динамічні петлі гістерезису завжди ширші за статичні і чим швидше змінюється H , тим ширше петля гістерезису. Наявність динамічної

петлі гістерезису пояснюється запізненням змінення індукції B при зміні напруженості H , яке обумовлено двома факторами:

- в'язкістю феромагнітних матеріалів, тобто запізненням зміненням в орієнтації доменів при зміні зовнішнього магнітного поля;
- вихровими струмами, що утворюють магнітне поле, яке у відповідності до правила Ленца перешкоджає зміні зовнішнього магнітного поля.

Матеріалами, що використовуються в електромагнітних системах електричних апаратів є: електротехнічні сталі, якісні конструкційні сталі, стальне виливання, чавуни, спеціальні залізо-нікелеві і залізо-кобальтові сплави.

1.3 Завдання.

1.3.1 Скласти схему експериментального дослідження кривої намагнічування (виконати під час підготовки до роботи поза розкладом лабораторних занять).

1.3.2 Експериментально визначити струми та напруги, необхідні для розрахунку кривої намагнічування осердя магнітного підсилювача.

1.3.3 Розрахувати параметри кривої намагнічування сердечника та побудувати відповідні графіки.

1.3.4 За результатами експерименту та розрахунків визначити матеріал магнітопроводу.

1.4 Методичні вказівки.

1.4.1 Для виконання п. 1.3.1 необхідно скористатись підручником (див. розділ "Література") або конспектом лекцій. Схема для проведення експерименту повинна містити всі необхідні вимірювальні прилади.

1.4.2 Для зняття кривої намагнічування осердя в схемі використати дві робочі обмотки МП ТУМ-А4-11 або ТУМ-А3-11М.

1.4.3 Для зручності зборки схеми та її перевірки схема повинна містити позначення клем обмоток МП, а також номери вузлів.

1.4.4 Складена схема повинна бути узгоджена з викладачем, який веде лабораторні роботи.

1.4.5 Для виконання п. 1.3.2 необхідно:

а) зібрати схему, використавши джерело з регулюванням фазної напруги: фазу "А" – клеми 4 та 5; або фазу "В" – клеми 4 та 6; або фазу "С" – клеми 4 та 7; зібрана схема повинна бути обов'язково перевірена викладачем або лаборантом;

б) встановити універсальні вимірювальні прилади у потрібний режим (амперметра або вольтметра змінного струму), а також найбільші діапазони вимірювання;

в) увімкнути автомат QF і автомат відповідної фази джерела живлення;

г) за допомогою автотрансформатора відповідної фази джерела підвищити напругу живлення до максимальної величини і встановити оптимальні діапазони вимірювання амперметра та вольтметра;

д) знижуючи напругу живлення зробити 10–12 робочих вимірювань і занести їх результати до таблиці 1.1; при цьому більш детально дослідити характеристику в області вигину (коліна кривої намагнічування).

Таблиця 1.1 – Результати вимірювань та розрахунків.

$E, \text{В}$	$I, \text{А}$	$E_n, \text{В}$	$B_m, \text{Тл}$	$H_{cp}, \text{А}$	$\mu, \text{Гн/м}$	$\mu_d, \text{Гн/м}$
...	...	...	...	...	...	...

1.4.6 Після закінчення робочих вимірювань потрібно встановити автотрансформатор у нульове положення, вимкнути всі автомати і, не розбираючи схему, узгодити результати вимірювань з викладачем.

1.4.7 Для виконання пп 1.3.3 та 1.3.4 необхідно скористатись формулами та довідковими матеріалами, які надані у підручниках та довідниках (див. розділ "Література")

1.5 Контрольні питання

1.5.1 Назвіть основні параметри, якими характеризуються властивості феромагнітних матеріалів.

1.5.2 Що таке крива намагнічування і якими параметрами вона характеризується?

1.5.3 Що таке абсолютна (відносна) магнітна проникність?

1.5.4 Яким параметром характеризується прямокутність петлі гістерезису?

1.5.5 Що таке динамічна петля гістерезису і який вона має вигляд?

1.5.6 Чим пояснюється динамічність петлі гістерезису?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОСЕЛЯ НАСИЧЕННЯ БЕЗ ПІДМАГНІЧУВАННЯ

Тривалість лабораторного заняття - 4 години

2.1 Мета роботи.

Метою роботи є експериментальне визначення основних характеристик дроселя насичення (ДН) без підмагнічування, а також осцилограм напруги на окремих елементах схеми дослідження.

2.2 Предмет дослідження.

Дроселем насичення без підмагнічування називають такий дросель, по обмотках якого тече тільки змінний струм без постійної складової. ДН без підмагнічування знайшов широке використання в системах автоматики в якості датчиків електричних величин (струму, напруги, частоти, потужності), вимірювальних релейних елементів, стабілізаторів напруги та ін. Розглянемо роботу найпростішого ДН без підмагнічування з одною робочою обмоткою, схема включення якого наведена на рис. 2.1.

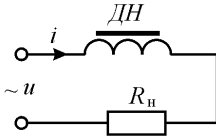


Рисунок 2.1 – Схема включення ДН без підмагнічування

Схема складається з робочої обмотки ДН і навантаження R_n , які включаються між собою послідовно. Живлення схеми здійснюється від джерела синусоїдальної напруги. Аналіз роботи схеми здійснюється за такими припущеннями:

- осердя ДН має ідеальну криву намагнічування;
- індукція в осерді розподілена рівномірно;
- потік розсіяння відсутній;
- активні втрати в обмотці ДН відсутні;
- навантаження чисто активне.

Для робочого кола ДН справедливе таке рівняння:

$$U_m \sin \omega t = iR_n + w_p S_c \frac{dB}{dt}, \quad (2.1)$$

де S_c – переріз магнітопроводу;

w_p – кількість витків у робочій обмотці.

Якщо у продовж періоду джерела живлення індукція $|B| < B_s$, то сердечник весь час знаходиться у стані переманічування. Тому, у відповідності до теорії ідеального МП струм навантаження дорівнює нулю і рівняння (2.1) набуває такого вигляду:

$$U_m \sin \omega t = w_p S_c \frac{dB}{dt}. \quad (2.2)$$

Поділяючи змінні і інтегруючи частини рівняння отримаємо вираз індукції у сердечнику

$$B = -\frac{U_m}{\omega w_p S_c} \cos \omega t + A = -B_m \cos \omega t + A. \quad (2.3)$$

Часові діаграми роботи ДН надані на рис. 2.2.

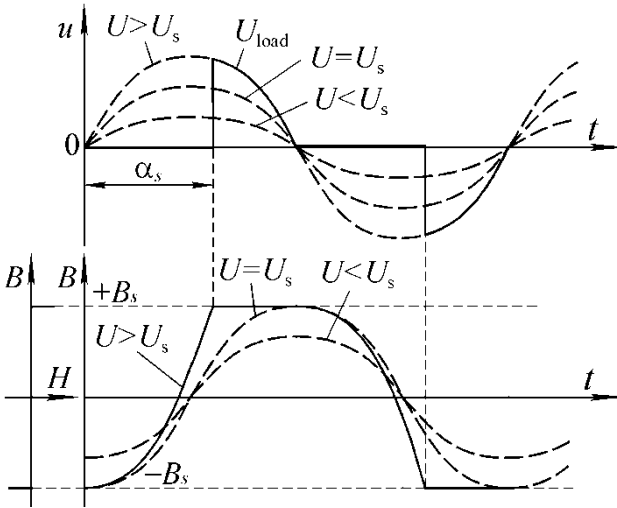


Рисунок 2.2 – Часові діаграми роботи ДН

Якщо підвищувати амплітуду джерела живлення U_m , відповідно буде підвищуватись амплітуда магнітної індукції B_m . При деякому значенні U_{ms} амплітуда магнітної індукції досягне значення індукції насичення B_s , яка згідно (2.3) буде визначатись наступним виразом:

$$U_{ms} = \omega w_p S_c B_s \quad (2.4)$$

При $U_m > U_{ms}$ частина півперіоду від 0 до t_s осердя буде переманічуватись, а у момент часу t_s досягає насичення і остається у стані

насичення до кінця півперіоду. Вся напруга живлення в цей час виявляється прикладеною до навантаження.

Таким чином, середнє значення напруги на навантаженні за півперіод буде визначатись наступним виразом:

$$U_n = U - U_s,$$

де U – середня за півперіод напруга джерела живлення;

U_s – середня за півперіод напруга на ДН, яка згідно до виразу (2.3) буде визначатись таким чином

$$U_s = 4 f B_s S_c.$$

Величина U_s не залежить від напруги живлення, тому характеристики ДН при різних частотах напруги живлення будуть мати вигляд наданий на рис. 2.3.

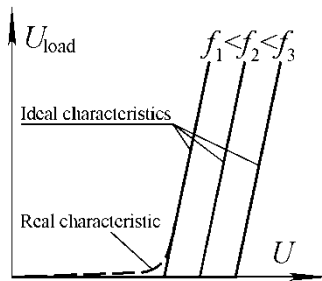


Рисунок 2.3 – Характеристика дроселя насичення.

2.3 З а в д а н н я .

2.3.1 Скласти схему експериментального дослідження ДН (виконати під час підготовки до роботи поза розкладом лабораторних занять).

2.3.2 Експериментально визначити характеристики ДН $U_d(U)$, $U_n(U)$, $I_n(U)$ та побудувати їх графіки.

2.3.3 Лінеаризувати визначені характеристики та визначити напругу насичення E_s і матеріал магнітопроводу.

2.3.4 Зняти осцилограми напруг на дроселі $u_d(t)$ та навантаженні $u_n(t)$ при $U < U_s$ і $U > U_s$.

2.3.5 Зробити висновки по роботі.

2.4 Методичні вказівки.

2.4.1 Для виконання п. 2.3.1 необхідно скористатись підручником (див. розділ "Література") або конспектом лекцій. Схема для проведення експерименту повинна містити всі необхідні вимірювальні прилади.

2.4.2 Для отримання характеристик ДН у відповідності до п. 2.3.2 використати одну з робочих обмоток МП ТУМ-А4-11 або ТУМ-А3-11М.

2.4.3 Для зручності зборки схеми та її перевірки схема повинна містити позначення клем обмоток МП, а також номери вузлів.

2.4.4 Складена схема повинна бути узгоджена з викладачем, який веде лабораторні роботи.

2.4.5 Для виконання п. 2.3.2 необхідно:

- зібрати схему; зібрана схема повинна бути обов'язково перевірена викладачем або лаборантом;

- встановити універсальні вимірювальні прилади у потрібний режим (амперметра або вольтметра змінного струму), а також найбільші діапазони вимірювання;

- увімкнути автомат QF і автомат відповідної фази джерела живлення;

- за допомогою автотрансформатора відповідної фази джерела підвищити напругу живлення до максимальної величини і встановити оптимальні діапазони вимірювання амперметра та вольтметрів;

- знижуючи напругу живлення зробити 10–12 робочих вимірювань і занести їх результати до таблиці 2.1; при цьому більш детально дослідити характеристику в області вигину.

Таблиця 2.1 - Результати вимірювань та розрахунків.

$U, \text{В}$	$U_d, \text{В}$	$U_n, \text{В}$	$I_n, \text{А}$
. . .	. . .	. . .	. . .

2.4.6 Для виконання п. 2.3.4 потрібно:

- увімкнути осцилограф і підключити до нього високочастотний кабель;

- підключити кабель до об'єкту, що досліджується (дроселя або навантаження) і встановити потрібну напругу джерела ($U < U_s$ або $U > U_s$);

- прогріти осцилограф впродовж 5 хв. і після з'яви розгортки налагодити його, встановивши потрібні масштаби з часу та амплітуди; зображення повинно бути синхронізовано;

- отримані осцилограми з екрана зняти на кальку, всі вони повинні мати однакові масштаби з часу та амплітуди.

2.4.7 Після закінчення робочих вимірювань і осцилографування потрібно встановити автотрансформатор у нульове положення, вимкнути всі автомати і, не розбираючи схему, узгодити результати вимірювань і осцилограми з викладачем.

2.5 Контрольні питання

2.5.1 Що таке ДН?

2.5.2 Де використовуються ДН?

2.5.3 Надати основні схеми підключення ДН.

2.5.4 Що таке U_s ?

2.5.5 Що називають частотою насичення?

2.5.6 Пояснити отримані осцилограми.

3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДРОСЕЛЬНОГО МАГНІТНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Тривалість лабораторного заняття - 4 години

3.1 Мета роботи.

Метою роботи є експериментальне визначення основних характеристик дросельного магнітного підсилювача, а також отримання осцилограм напруг на окремих елементах схеми дослідження.

3.2 Предмет дослідження.

Дросельний магнітний підсилювач (ДМП) відрізняється від ДН тим, що по одній з його обмоток проходить постійна складова струму. Тобто ДМП це ДН з підмагнічуванням постійним струмом. Схема підключення найпростішого ДМП надана на рис. 1, але вона має серйозні недоліки: по-перше, змінний магнітний потік, який утворюється робочою обмоткою, наводить в обмотці керування (як у вторинній обмотці) змінну м.р.с. і при малому опорі кола керування струм в робочому колі буде визначатись, головним чином, опором навантаження (як у корот-

козамкненому трансформаторі), тому ефекту керування струмом навантаження практично не буде; по-друге, буде спостерігатись спотворення форми кривої струму навантаження.

Трансформації змінного струму з робочого кола в коло керування можна уникнути, якщо підключити обмотку керування до джерела струму (з практично безкінечним опором). В реальності можна лише обмежити трансформацію введенням в коло керування великої індуктивності або активного резистора. Але такі заходи значно погіршують техніко-економічні показники МП: підвищуються інерційність, витрати матеріалу, втрати, знижується коефіцієнт підсилення та ін. З цієї причини така схема знайшла обмежене використання.

Широке практичне використання набули ДМП з двома ДН з підмагнічуванням, в яких трансформація змінного струму з робочого кола усувається зустрічним включенням робочих обмоток відносно обмотки керування, рис. 3.1.

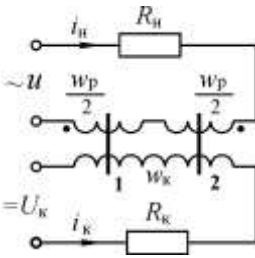


Рисунок 3.1 – ДМП з двома робочими обмотками

Розрізняють два крайніх режиму у роботі ДМП: режим змушеного намагнічування і режим вільного намагнічування. Перший має місце при великому опорі кола керування, яке обмежує трансформацію змінного струму в коло керування; другий спостерігається при малому опорі кола керування, коли він практично не впливає струм трансформації в коло керування. Розглянемо більш детально режим вільного намагнічування. При активному навантаженні рівняння за II-м законом Кірхгофа для робочого кола має такий вигляд

$$u = i_n R_n + \frac{d\Psi_p}{dt} = i_n R_n + \frac{w_p S_c}{2} \left(\frac{dB_1}{dt} + \frac{dB_2}{dt} \right) \quad (3.1)$$

де B_1, B_2 – індукція відповідно у першому і другому стержнях, які змінюються у відповідності з такими виразами:

$$B_1 = -B_m \cos \omega t + B_0; \quad B_2 = -B_m \cos \omega t - B_0, \quad (3.2)$$

де B_0 – індукція, яка утворюється обмоткою керування (постійна за величиною та напрямком).

Якщо $|B_0| < B_s$, а $|B_m| = B_s$, то

$$B_1 = -B_s \cos \omega t + B_0; \quad B_2 = -B_s \cos \omega t - B_0, \quad (3.3)$$

Оскільки індукція у стержні не може бути по абсолютному значенні більшою, ніж B_s , то у початковий момент часу індукції у стержнях набувають таких величин:

$$B_1(0) = -B_s + B_0; \quad B_2(0) = -B_s.$$

Починаючи з моменту $t = 0$ індукція B_1 буде змінюється у відповідності до рівняння (3.3). Для визначення B_2 використаємо рівняння кола керування:

$$U_k = i_k R_k + \frac{d\Psi_k}{dt} = i_k R_k + w_k S_c \left(\frac{dB_1}{dt} - \frac{dB_2}{dt} \right)$$

У відповідності до визначення режиму вільного намагнічування $R_k \approx 0$ (тобто дуже малий), тому

$$w_k S_c \left(\frac{dB_1}{dt} - \frac{dB_2}{dt} \right) = 0; \quad \frac{dB_1}{dt} = \frac{dB_2}{dt}.$$

Отже, у будь-який момент часу різниця $B_1 - B_2 = B_0 = \text{const}$ (див. рис. 3.2).

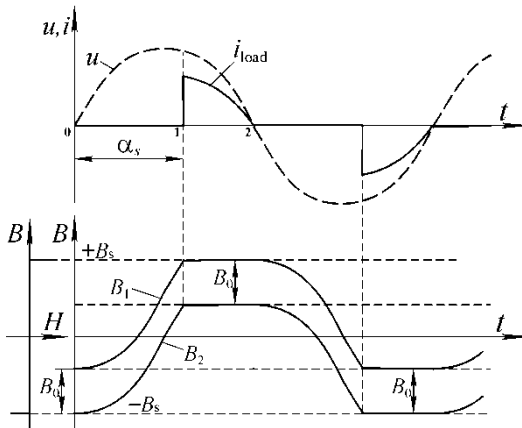


Рисунок 3.2 – Часові діаграми роботи ДМП.

Таким чином, у кожному півперіоді напруги живлення буде спостерігатись 2 характерних інтервалу часу:

0–1 – в цей інтервал часу обидва осердя перемагнічуються, тобто працюють на вертикальній ділянці ідеальної кривої намагнічування, при цьому робоча обмотка знаходиться у непродуктивному стані і струм у навантаженні відсутній;

1–2 – в цей інтервал 1-й сердечник насичується, а у 2-му нема змінення індукції, тобто індуктивний опір також дорівнює нулю, тому сумарний індуктивний опір робочих обмоток буде дорівнювати нулю і струм навантаження буде визначатись лише опором навантаження. У другому півперіоді картина буде аналогічною.

Кут, який відповідає інтервалу 0-1 називають *кутом насичення* α_s . Його можна визначити з рівняння (3.3)

$$\cos \alpha_s = \frac{B_0}{B_s} - 1.$$

Таким чином, змінюючи індукцію B_0 можна регулювати середнє та діюче значення струму навантаження.

При $B_0 = 0$; $\cos \alpha_s = -1$; $\alpha_s = \pi$, робоча обмотка не пропускає струм навантаження впродовж всього півперіоду. В цьому випадку магнітний підсилювач працює в *режимі холостого ходу*.

При $B_0 = 2B_s$; $\cos \alpha_s = 1$; $\alpha_s = 0$, робоча обмотка пропускає струм навантаження впродовж всього півперіоду і середнє значення робочого струму максимальне. В цьому випадку магнітний підсилювач працює в *режимі максимальної віддачі*.

Якщо ж $0 < B_0 < 2B_s$, магнітний підсилювач працює у *робочому режимі*. Враховуючі те, що $B_0 \equiv I_k$, характеристика керування ДМП буде мати вигляд, наданий на рис. 3.3.

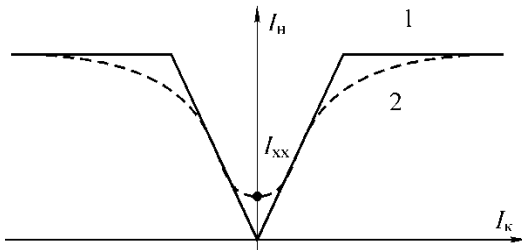


Рисунок 3.3 - Характеристики керування ідеального (1) та реального (2) ДМП

3.3 Завдання.

3.3.1 Скласти схему експериментального дослідження ДМП (виконати під час підготовки до роботи поза розкладом лабораторних занять).

3.3.2 Експериментально визначити характеристику керування ДМП та побудувати її графік.

3.3.3 По характеристиці керування визначити коефіцієнт підсилювання магнітного підсилювача.

3.3.4 Зняти осцилограми напруги на навантаженні $u_n(t)$ у трьох характерних режимах ДМП: холостого ходу, робочому та максимальної віддачі.

3.3.5 Зробити висновки по роботі.

3.5 Методичні вказівки.

3.4.1 Для виконання п. 3.3.1 необхідно скористатись підручником (див. розділ "Література") або конспектом лекцій. Схема для проведення експерименту повинна містити всі необхідні вимірювальні прилади.

3.4.2 Для отримання характеристики керування ДМП відповідно до п. 3.3.2 використати обидві робочі обмотки МП ТУМ-А4-11 або ТУМ-А3-11М і обмотку керування, клеми якої мають позначення 6Н–6К.

3.4.3 Для джерел живлення робочого кола і кола керування використати різні фази. Наприклад, якщо для робочого кола використовується джерело фазної напруги змінного струму фази "А", то для кола керування потрібно використати джерело фазної напруги постійного струму фази "В" або "С".

3.4.4 Опір навантаження робочого кола прийняти таким, що дорівнює 300 Ом, навантаженням в колі керування є сама обмотка керування.

3.4.5 Для зручності зборки схеми та її перевірки схема повинна містити позначення клем обмоток МП, джерел живлення, а також номери вузлів.

3.4.6 Складена схема повинна бути узгоджена з викладачем, який веде лабораторні роботи.

3.4.7 Для виконання п. 3.3.2 необхідно:

а) зібрати схему; зібрана схема повинна бути обов'язково перевірена викладачем або лаборантом;

б) встановити універсальні вимірювальні прилади у потрібний режим (амперметра або вольтметра змінного або постійного струму), а також найбільші діапазони вимірювання;

в) увімкнути автомат QF і автомат відповідної фази джерела живлення робочого кола;

г) за допомогою автотрансформатора джерела робочого кола підвищити напругу живлення до величини $2U_s$ (див. лабораторну роботу №2);

д) вимкнути автомат відповідної фази джерела живлення кола керування;

е) підвищуючи за допомогою автотрансформатора струм керування, зробити 10–12 робочих вимірювань і занести їх результати до таблиці 3.1; при цьому більш детально дослідити характеристику в області вигину.

Таблиця 3.1 - Результати вимірювань та розрахунків.

I_k, A	I_n, A	U_n, B	P_n, Bt
...	...	...	...

3.4.8 Для виконання п. 3.3.4 потрібно:

а) увімкнути осцилограф і підключити до нього високочастотний кабель;

б) підключити кабель до навантаження робочого кола і встановити потрібний режим ДМП (холостого ходу, робочий, максимальної віддачі);

в) прогріти осцилограф впродовж 5 хв. і після з'яви розгортки налагодити його, встановивши потрібні масштаби з часу та амплітуди; зображення повинно бути синхронізовано;

г) отримані осцилограми з екрана зняти на кальку, всі вони повинні мати однакові масштаби з часу та амплітуди.

3.4.9 Після закінчення робочих вимірювань і осцилографування потрібно встановити автотрансформатор у нульове положення, вимкнути всі автомати і, не розбираючи схему, узгодити результати вимірювань і осцилограми з викладачем.

3.5 Контрольні питання

3.5.1 Пояснити принцип дії ДМП.

3.5.2 Які недоліки має схема ДМП з однією робочою обмоткою?

3.5.3 Як зменшують змінну складову напруги в колі керування?

3.5.4 Що таке характеристика керування ДМП?

3.5.5 Показати і пояснити різницю характеристик керування ідеального і реального ДМП.

3.5.6 Що характеризує коефіцієнт і як він визначається?

3.5.7 Які схеми ДМП найбільш розповсюджені у практиці?

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПІДСИЛЮВАЧА З САМОНАСИЧЕННЯМ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

4.1 Мета роботи.

Метою роботи є експериментальне визначення основних характеристик магнітного підсилювача з самонасиченням, а також осцилограм напруг на окремих елементах схеми дослідження.

4.2 Предмет дослідження.

Магнітний підсилювач з самонасиченням (МПС) відрізняється від ДМП тим, що підмагнічування осердя в ньому здійснюється не тільки за рахунок струму, що тече в обмотці керування, але й за рахунок постійної складової струму навантаження. Схема підключення найпростішого МПС відрізняється від схеми підключення ДМП (див. рис. 1) наявністю у робочому колі випрямного елемента (діода). Таким чином, в робочому колі проходить однопівперіодний струм навантаження з постійною складовою, за рахунок якої здійснюється додаткове підмагнічування осердя, пропорційне величині струму навантаження. Це викликає ефект, аналогічний дії обмотки зворотного зв'язку і тому МПС часто називають МП з *внутрішнім зворотнім зв'язком*. Відповідно МП без постійної складової струму навантаження часто називають МП з *зовнішнім зворотнім зв'язком*. Півперіод, в якому діод пропускає струм навантаження називають *робочим півперіодом*, а той в якому не пропускає називають *керуючим півперіодом*.

Припустимо, що:

- заданій амплітуді джерела відповідає максимальне значення індукції B_s ;
- повний опір кола керування дуже великий, тому струм в ньому визначається лише напругою U_k і не залежить від м.р.с., яка трансформується з робочого кола;
- вентиль має безкінечно великий опір в керуючий півперіод і нульовий у робочий;
- матеріал сердечника має ідеальну прямокутну петлю гістерезису у статичному режимі, проте процеси в МПС визначаються, головним чином, формою динамічної петлі гістерезису, яка являє собою паралелограм, рис. 4.1.

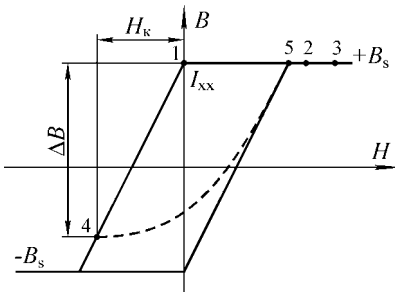


Рисунок 4.1 – Ідеальна динамічна петля гістерезису

При $I_k = 0$ відсутнє підмагнічування осердя обмоткою керування. В цьому випадку під дією постійної складової струму навантаження у сердечнику встановлюється індукція B_s і його магнітний режим визначається ділянкою 1–2, тобто перемагнічування відсутнє і сердечник весь час насичений. В цьому випадку у робочий півперіод в навантаженні тече максимальний струм, який

визначається опором навантаження.

При $I_k > 0$ утворений обмоткою керування магнітний потік за напрямком співпадає з потоком, утвореним постійною складовою струму навантаження. В цьому випадку магнітний режим сердечника буде відповідати точці 3 і струм навантаження також буде максимальним.

При $I_k < 0$ магнітний потік, що утворюється обмоткою керування, буде протилежним за напрямком по відношенню до потоку від постійної складової струму навантаження. В цьому випадку в кінці керуючого півперіоду індукція у сердечнику буде відповідати напруженості H_k (точка 4). В робочий півперіод магнітний режим визначається

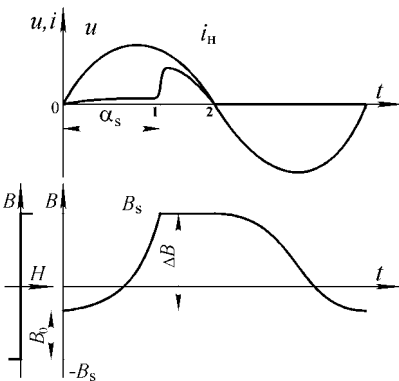


Рисунок 4.2 – Часові діаграми роботи МП з самонасиченням

частинною динамічною гілкою гістерезису 4–5–2. На ділянці 4–5 відносна магнітна проникність набагато більше одиниці і індуктивність робочої обмотки значно зростає; в робочому колі тече невеликий струм. В точці 5 відносна проникність стає такою, що дорівнює 0 і до кінця робочого півперіоду в робочому колі тече струм, який визначається опором навантаження. Коли настає керуючий півперіод струм у робочому колі стає таким, що дорівнює 0, оскільки вентиль замика-

ється, і сердечник за керуючий півперіод розмагнічується на ΔB . Часові діаграми роботи МПС надані на рис. 4.2.

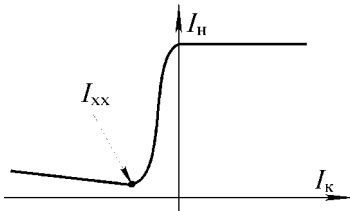


Рисунок 4.3 – Характеристика керування МП з самонасиченням

Середнє значення струму навантаження визначається величиною кута відсічки α_s , яка в свою чергу визначається величиною індукції B_0 утвореною обмоткою керування. Таким чином, враховуючі те, що $B_0 \equiv I_k$, характеристика керування МПС буде мати вигляд, який відповідає рис. 4.3.

4.3 Завдання.

4.3.1 Скласти схему експериментального дослідження МПС (виконати під час підготовки до роботи поза розкладом лабораторних занять).

4.3.2 Експериментально визначити характеристику керування МПС та побудувати її графік.

4.3.3 Визначити основні характерні режими роботи МПС.

4.3.4 Зняти осцилограми напруги на навантаженні $u_n(t)$ у всіх характерних режимах МПС: робочому, максимальної віддачі та струмовому.

4.3.5 Зробити висновки по роботі.

4.4 Методичні вказівки.

4.4.1 Для виконання п. 4.3.1 необхідно скористатись підручником (див. розділ "Література") або конспектом лекцій. Схема для проведення експерименту повинна містити всі необхідні вимірювальні прилади.

4.4.2 Для отримання характеристики керування ДМП відповідно до п. 3.3.2 використати двопівперіодну схему з навантаженням на змінному струмі.

4.4.3 Для робочого кола використати джерело фазної напруги змінного струму. Для кола керування – джерело постійного струму 0...12 В.

4.4.4 Опір навантаження робочого кола прийняти таким, що дорівнює 300 Ом, навантаженням в колі керування є сама обмотка керування.

4.4.5 Для зручності зборки схеми та її перевірки схема повинна містити позначення клем обмоток МП, джерел живлення, а також номери вузлів.

4.4.6 Складена схема повинна бути узгоджена з викладачем, який веде лабораторні роботи.

4.4.7 Для виконання п. 4.3.2 необхідно:

а) зібрати схему; зібрана схема повинна бути обов'язково перевірена викладачем або лаборантом;

б) встановити універсальні вимірювальні прилади у потрібний режим (амперметра або вольтметра змінного або постійного струму), а також найбільші діапазони вимірювання;

в) увімкнути автомат QF і автомат відповідної фази джерела живлення робочого кола;

г) за допомогою автотрансформатора джерела робочого кола підвищити напругу живлення до величини $2U_s$ (див. лабораторну роботу №2);

д) увімкнути тумблер джерела живлення кола керування;

е) підвищуючи регулятором струм керування, зробити 5-6 робочих вимірювань, заносючи їх результати до таблиці 3.1;

ж) вимкнути тумблер джерела живлення кола керування і поміняти місцями кінці обмотки керування;

з) знижуючи регулятором струм керування, зробити ще 5-6 робочих вимірювань, заносючи їх результати до таблиці 3.1;

і) більш детально дослідити характеристику в робочому режимі та режимі холостого ходу;

к) характеристику керування побудувати в двох квадрантах.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань та розрахунків.

I_k, A	I_n, A	U_n, B	P_n, Bt
. . .	. . .	. . .	. . .

4.4.8 Для виконання п. 3.3.4 потрібно:

а) увімкнути осцилограф і підключити до нього високочастотний кабель;

б) підключити кабель до навантаження робочого кола і встановити потрібний режим МПС (холостого ходу, робочий, струмовий);

в) прогріти осцилограф впродовж 5 хв. і після з'яви розгортки налагодити його, встановивши потрібні масштаби з часу та амплітуди; зображення повинно бути синхронізовано;

г) отримані осцилограми з екрана зняти на кальку, всі вони повинні мати однакові масштаби з часу та амплітуди.

4.4.9 Після закінчення робочих вимірювань і осцилографування потрібно встановити автотрансформатор у нульове положення, вимкнути всі автомати і, не розбираючи схему, узгодити результати вимірювань і осцилограми з викладачем.

4.5 Контрольні питання

- 4.5.1 Пояснити принцип дії МПС.
- 4.5.2 Що таке характеристика керування МПС?
- 4.5.3 Що таке робочий (керуючий) півперіод?
- 4.5.4 Назвіть та охарактеризуйте характерні режими роботи МПС.
- 4.5.5 Надати основні схеми МПС.
- 4.5.6 Чому МПС являють собою МП з внутрішнім зворотнім зв'язком?
- 4.5.7 Назвіть та охарактеризуйте статичні та динамічні параметри МПС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / [Б.К. Буль, Г.В. Буткевич, А.Г. Годжелло и др.]; под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.
2. Шопен, Л.В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики: учеб. для вузов / Л.В. Шопен. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
3. Шопен, Л.В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики / Шопен Л.В. – М.: Энергия, 1976. – 568 с.
4. Преображенский, А.А. Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский, Е.Т. Бишард. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.
5. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник / [Пятин Ю.М., Чернявская А.М., Владимирский Р.А. и др.]; под ред. Ю.М. Пятина. – М.: Машиностроение, 1982. – 528 с.
6. Методичні вказівки до лабораторних робіт курсу "Безконтактні електричні апарати автоматики" /Склав В.Д. Флора. – Запоріжжя: ЗМІ, 1992. – 40 с.
7. Методические указания к лабораторным работам по курсу "Бесконтактные электрические аппараты автоматики"/ Сост. В.Д. Флора. – Запорожье: ЗМІ, 1986. – 32 с.
8. Sidney Platt. Magnetic Amplifiers. Theory and Applications. – Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J., 1958. – 254 p.