МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГАЛЬКО С. В.
НОСАНЬ С. В.
МІРОШНИК О. О.

ПРАКТИКУМ З ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН: МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ І ТРАНСФОРМАТОРИ

Навчальний посібник

1256 1233 1996 LIHA-PRES
Львів – Торунь
Liha-Pres
2026

УДК 321.313.2+321.314.21(075)
Г17

Рецензенти:

Плюгін В. Є., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова;

Гапон Д. А., доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Рекомендовано Вченою радою
Державного біотехнологічного університету
(протокол № 15 від 28 квітня 2026 року)

Галько С. В.

Г17 Практикум з електричних машин: машини постійного струму і трансформатори : навчальний посібник / С. В. Галько, С. В. Носань, О. О. Мірошник ; Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Державний біотехнологічний університет. – Львів – Торунь : Liha-Pres, 2026. – 180 с.

ISBN 978-966-397-671-6
DOI: https://doi.org/10.36059/978-966-397-671-6

У практикумі представлено основні теоретичні положення і методику виконання лабораторних робіт з дослідження електричних машин: генераторів і двигунів постійного струму та силових трансформаторів. У додатках наведено технічні дані сухих силових трансформаторів з литою ізоляцією та електродвигунів постійного струму. Практикум призначений для наукових, науково-педагогічних працівників і здобувачів вищої освіти зі спеціальності G3 «Електрична інженерія» вищих навчальних закладів III–IV рівнів акредитації. Може бути корисним фахівцям, які працюють у галузі проєктування, ремонту та експлуатації електричних машин.

УДК 321.313.2+321.314.21(075)

© С. В. Галько, С. В. Носань, О. О. Мірошник, 2026
© Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного,
Державний біотехнологічний університет, 2026

ISBN 978-966-397-671-6

ЗМІСТ

Передмова……5

Загальні вимоги до виконання лабораторних робіт……7

Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт……..9

Критерії оцінювання лабораторних робіт……..11

Лабораторна робота № 1
Вивчення будови машин постійного струму з вимірюванням
омічного опору обмоток якоря і збудження……..12

Лабораторна робота № 2
Дослідження генератора постійного струму незалежного збудження
в режимі холостого ходу……22

Лабораторна робота № 3
Дослідження генератора постійного струму незалежного збудження
в режимі навантаження……30

Лабораторна робота № 4
Дослідження генератора постійного струму паралельного збудження…41

Лабораторна робота № 5
Дослідження генератора постійного струму змішаного збудження……..50

Лабораторна робота № 6
Дослідження двигуна постійного струму паралельного збудження…….60

Лабораторна робота № 7
Дослідження двигуна постійного струму змішаного збудження……..73

Лабораторна робота № 8
Вивчення будови силових трансформаторів з вимірюванням
омічних опорів первинної та вторинної обмоток……84

Лабораторна робота № 9
Дослідне визначення коефіцієнта трансформації трифазного
силового трансформатора……104

Лабораторна робота № 10
Дослідне визначення групи з'єднання обмоток трифазного
силового трансформатора……112

Лабораторна робота № 11
Дослід холостого ходу трифазного силового трансформатора……..121

Лабораторна робота № 12
Дослід короткого замикання трифазного силового трансформатора…..131

Лабораторна робота № 13
Дослід навантаження трифазного силового трансформатора……..141

Лабораторна робота № 14
Дослідження трифазних трансформаторів при паралельній роботі…….152

Додатки……168
ДОДАТОК А. Зразок титульного аркуша звіту лабораторної роботи……168
ДОДАТОК Б. Технічні дані щіток електричних машин та рекомендації щодо їх застосування……..169
ДОДАТОК В. Загальна будова машини постійного струму……..170
ДОДАТОК Г. Структура умовного позначення марок електротехнічних сталей……171
ДОДАТОК Д. Структура умовного позначення трансформаторів…..172
ДОДАТОК Е. Умовне позначення виду систем охолодження трансформаторів……..174
ДОДАТОК Ж. Приклади умовного позначення та технічні характеристики силових трансформаторів……175
ДОДАТОК И. Дані для визначення групи з’єднання обмоток силового трансформатора за експериментальними даними……..176
ДОДАТОК К. Зовнішній вигляд трифазних силових трансформаторів……..177

Список використаних джерел……179

ПЕРЕДМОВА

Електричні машини становлять ключовий компонент електроенергетичного устаткування та обладнання. Вони слугують для генерування електричної енергії (генератори), її перетворення з метою передачі та подальшого використання (трансформатори), а також для приведення в дію робочих машин і механізмів (електродвигуни). Електрична машина є невід'ємним компонентом будь-якої енергетичної установки. Тому фахівці, які працюють у сфері виробництва чи експлуатації електричних машин, повинні володіти не лише теоретичними знаннями та розумінням фізичної природи електромагнітних, механічних і теплових процесів, що відбуваються в таких пристроях. Не менш значущими є навички аналізу різноманітних конструктивних типів і виконань електричних машин, уміння здійснювати розрахунок необхідної потужності й обирати відповідний типорозмір з урахуванням технічних характеристик, ступеня захисту, способу охолодження, виду монтажу та кліматичних умов їх експлуатації.

Навчальна дисципліна «Електричні машини» посідає важливе місце в системі підготовки фахівців за спеціальністю G3 «Електрична інженерія». Її зміст охоплює вивчення призначення та конструктивних особливостей машин постійного струму загальнопромислового виконання; основ теорії таких машин, включно з поняттям і оцінюванням процесів комутації. Крім того, дисципліна передбачає ознайомлення з призначенням, будовою та принципами роботи силових трансформаторів, теоретичними засадами їх функціонування, енергетичними характеристиками, методиками проведення досліджень і випробувань, а також експлуатаційними властивостями. Окрему увагу приділено специфічним типам трансформаторів, їх конструктивним особливостям, принципам дії та сферам практичного застосування.

У цьому практикумі подано теоретичні та методичні матеріали, призначені для виконання лабораторних робіт, що стосуються дослідження силових і спеціальних трансформаторів, а також генераторів і двигунів постійного струму незалежного та паралельного збудження.

Метою лабораторних робіт є закріплення на практиці здобувачами вищої освіти теоретичних знань будови, основних фізичних

законів, на яких базується принцип дії і процеси перетворення енергії в електричних машинах, а також експериментальне дослідження взаємозалежності електричних, енергетичних і техніко-економічних характеристик і показників електричних машин.

Основними навчальними ***завданнями*** лабораторних робіт є:

- практичне ознайомлення з конструкцією, принципом дії та експлуатаційними характеристиками електричних машин загального і спеціального призначення, а також із лабораторним обладнанням, вимірювальними приладами та апаратурою, що застосовуються у процесі досліджень;
- поглиблення та закріплення знань, отриманих під час вивчення курсу, шляхом аналітичної й експериментальної перевірки ключових положень теорії та практики дисципліни «Електричні машини»;
- практичне ознайомлення з сучасними методами і технічними засобами випробування трансформаторів та обертових електричних машин;
- засвоєння на практиці наявних методів розрахункового та експериментального визначення параметрів електричних машин, а також отримання експериментальним шляхом їхніх статичних характеристик, що визначають властивості машин у сталих режимах роботи;
- набуття практичних умінь у здійсненні самостійної дослідницької діяльності, а також оволодіння методами опрацювання та аналізу експериментальних даних.

Мета окремих лабораторних робіт курсу визначаються у кожному конкретному завданні. Важливою передумовою ефективного виконання лабораторних робіт є ретельна самопідготовка здобувачів вищої освіти, а також чітке розуміння їхніх цілей, змісту та методики проведення. Автори сподіваються, що поданий матеріал сприятиме глибшому засвоєнню навчальної дисципліни «Електричні машини» та формуванню практичних умінь щодо дослідження електричних машин.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ

ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

До виконання робіт у лабораторіях електричних машин допускаються здобувачі вищої освіти, які опанували відповідні розділи теоретичного курсу, пройшли інструктаж з техніки безпеки та підготували шаблони звітів для проведення лабораторної роботи. Всі заняття в лабораторіях електричних машин проходять під керівництвом викладача.

Викладач перед кожною роботою наводить короткі теоретичні відомості, що полегшує здобувачам виконання роботи й оформлення звіту.

Здобувачі, які вперше приступають до роботи в електротехнічній лабораторії, зобов'язані ознайомитися з правилами поведінки та вимогами техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт і підтвердити це підписом у відповідному журналі.

Здобувачі вищої освіти зобов'язані належним чином підготуватися до лабораторного заняття: ознайомитися з ключовими теоретичними положеннями, порядком виконання роботи, підготувати заготовку звіту для фіксації експериментальних даних, виконати завдання для самостійної роботи та самостійно опрацювати контрольні запитання.

Заготовка звіту повинна містити назву лабораторної роботи, її мету, схему електричну принципову лабораторної установки та таблиці для внесення результатів спостережень.

Академічна група поділяється на бригади чисельністю три-чотири особи. Призначений бригадир відповідає за дисципліну членів бригади і за виконання ними даних правил.

Роботи виконуються фронтальним методом у послідовності, зазначеній викладачем.

Перед початком заняття здобувачі зобов'язані подати викладачу заготовку звіту для перевірки та надати відповіді на відповідні запитання. Лише після цього бригада отримує дозвіл на початок роботи. Здобувачі, які не продемонстрували належної підготовки, до виконання лабораторної роботи не допускаються.

Після завершення експериментальної частини роботи кожний здобувач подає викладачеві заповнені таблиці з результатами досліджень для підпису. У разі, якщо отримані дані є незадовільними або не були представлені викладачу, лабораторна робота вважається невиконаною.

За підсумками виконання роботи здобувачі готують звіт. Оформлення звіту здійснюється в лабораторії протягом навчального заняття, а також поза його межами з використанням комп'ютерної техніки. Документ подається на одній стороні аркуша білого паперу формату А4 (210×297 мм) з використанням міжрядкового інтервалу 1,5. Рекомендований шрифт – *Times New Roman* розміром 12–14 пунктів. Під час друку необхідно дотримуватися таких параметрів полів: ліве – 30 мм, праве – 15 мм, верхнє – 20 мм, нижнє – 30 мм.

Графічні залежності можуть бути побудовані за допомогою комп'ютерних засобів або вручну. У будь-якому випадку графік має містити координатну сітку, а на кожній осі повинні бути зазначені позначення величин, їхні одиниці вимірювання та масштаб. Для коректного відображення характеру досліджуваних характеристик масштабні параметри добирають так, щоб початок координат відповідав нульовим значенням як аргументів, так і функцій.

Під час побудови характеристик вручну спочатку наносять експериментальні точки, після чого через їх основне згущення проводять плавну апроксимаційну криву. У разі використання комп'ютерних засобів аналогічна операція виконується шляхом згладжування експериментальних даних. Отриману усереднену залежність розглядають як дослідну характеристику.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

У лабораторії проводяться дослідження електричних машин і трансформаторів, що працюють при напругах до 420 В змінного струму, що зумовлює необхідність неухильного дотримання основних вимог техніки безпеки.

1. Виконання лабораторної роботи дозволяється лише у складі бригади, що налічує три-чотири учасники. Самостійне виконання роботи одним здобувачем забороняється.

2. Монтаж і демонтаж робочої схеми слід здійснювати виключно за умови повного відключення живильної напруги. Лабораторне обладнання живиться від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ через проміжний знижувальний трансформатор 0,4/0,23 кВ. Трифазна лінійна напруга 0,23 кВ від цього трансформатора подається на кожний лабораторний стіл від головного розподільного щита через автоматичний вимикач.

На кожен лабораторний стіл через автоматичний вимикач подається постійна напруга 220 В. Змінну напругу з можливістю регулювання її величини отримують за допомогою регулювального автотрансформатора або індукційного регулятора (поворотного автотрансформатора). Регульована постійна напруга формується тими самими пристроями, але з використанням однофазних або трифазних випрямлячів.

3. Досліджувані електричні машини та трансформатори розміщуються під лабораторним столом або на його поверхні, при цьому їхні виводи (початки та кінці всіх обмоток) виведені на фронтальну вертикальну панель столу. На цій панелі також розташовані щитові вимірювальні прилади та елементи керування навантажувальними пристроями. Детальний опис конструкції лабораторних стендів наведено в кожній окремій лабораторній роботі.

Для кожної електричної схеми, що використовується у дослідженнях, необхідно підбирати вимірювальні прилади, навантажувальні та регулювальні пристрої відповідно до номінальних параметрів досліджуваних машин.

Подача живильної напруги на схему після її складання або будь-яких змін у з’єднаннях дозволяється лише після обов’язкової

перевірки викладачем або лаборантом. У разі появи напруги на робочій схемі після увімкнення ввідного автоматичного вимикача над ним засвічуються сигнальні лампи.

4. Здобувачам ***категорично забороняється***:

а) виконувати будь-які роботи з внутрішнього боку лабораторних стендів;

б) вмикати комутаційні апарати на головних розподільних щитах лабораторії;

в) переносити прилади, апаратуру та з'єднувальні провідники між різними лабораторними стендами для складання схем;

г) торкатися струмоведучих частин установки, що перебувають під напругою;

д) торкатися елементів машин, які знаходяться в русі;

е) залишати без нагляду працюючу машину або електричну схему, що перебуває під напругою;

є) залишати на машинах чи столах невикористані провідники;

ж) нарощувати провідники, що застосовуються для складання електричної схеми;

з) виконувати роботи на машинах без захисних кожухів, які закривають муфти та інші відкриті обертові частини.

У разі виникнення аварійних ситуацій у машині або в електричній схемі, що супроводжуються інтенсивним перегріванням машин, з'єднувальних провідників, реостатів чи різким зростанням частоти обертання (розносом двигуна), здобувачі повинні негайно зняти напругу з робочої схеми шляхом вимкнення автоматичного вимикача живлення на лабораторному столі та повідомити про інцидент викладача.

5. У разі ураження будь-кого з учасників робіт електричним струмом необхідно негайно знеструмити експериментальну установку і розпочати надання першої медичної допомоги постраждалому та викликати бригаду швидкої допомоги.

Здобувачі допускаються до виконання лабораторних робіт лише після ознайомлення з наведеними правилами та підтвердження цього підписом у відповідному журналі. У разі порушення вимог техніки безпеки здобувач відсторонюється від роботи й допускається до неї повторно лише з дозволу завідувача кафедри після проходження додаткового інструктажу. У разі повторного порушення правил здобувач не допускається до подальшої роботи в лабораторії.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Максимальна кількість балів за виконання лабораторної роботи становить **3 бали**. Кількісна оцінка формується на основі таких складових:

- вхідний контроль, за який можна отримати максимально 1 бал;
- підготовка та оформлення звіту, що також оцінюється максимально у 1 бал;
- вихідний контроль (захист лабораторної роботи або тестування на Освітньому порталі), за який передбачено максимально 1 бал.

Вхідний контроль здійснюється у формі усного опитування на початку заняття. Кількість балів визначається пропорційно правильно наданим відповідям.

Підготовка та оформлення звіту виконується здобувачем безпосередньо під час лабораторного заняття. Оцінювання здійснюється пропорційно кількості коректно виконаних пунктів звіту.

Вихідний контроль проводиться у формі письмового опитування наприкінці заняття (розв'язання задачі) або у форматі тестування на Освітньому порталі. Оцінка визначається пропорційно кількості правильних відповідей.

Лабораторна робота вважається виконаною на, якщо здобувач отримав не менше 60 % від максимального рейтингу, тобто 1,8 бала. У разі недосягнення цього порогу здобувач зобов'язаний підвищити підсумковий бал за лабораторну роботу у встановлений термін під час консультацій викладача, що вів заняття. Підвищення рейтингу передбачає повторне виконання окремих елементів роботи: вхідного контролю, звіту та вихідного контролю.

У разі пропуску лабораторного заняття здобувач повинен відпрацювати його у визначені строки під час консультацій викладача. Якщо пропуск підтверджений поважною причиною, максимальна можлива оцінка за відпрацювання становить 3,0 бали. У разі пропуску без поважної причини здобувач може отримати за відпрацювання не більше ніж 1,8 бала.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ВИВЧЕННЯ БУДОВИ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ВИМІРЮВАННЯМ ОМІЧНОГО ОПОРУ ОБМОТОК ЯКОРЯ І ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи

Засвоєння будови та призначення індуктора, якоря, колектору та щіточного апарата, типів та будови обмоток якоря, ознайомлення з матеріалами, які використовуються для виготовлення машин постійного струму, засвоєння методики вимірювання омічного опору обмоток.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. Детально вивчити конструкцію машини постійного струму (МПС) загального призначення, зокрема:

- конструкцію та функції нерухомої частини статора (індуктора) [1, 2, с. 68; 4, с. 18–19; 5, с. 17–18; 6, с. 345–346];
- будову обертової частини – якоря [1, 2, с. 68–69; 4, с. 20; 5, с. 19–20; 6, с. 346];
- конструкцію та призначення колектору [1, 2, с. 69–71; 4, с. 20–24; 5, с. 19; 6, с. 347–348];
- будову та функції щіткового апарата [1, 2, с. 70–73; 4, с. 21–22; 6, с. 348];
- типи і конструктивні особливості обмоток якоря МПС [1, 2, с. 75–82; 4, с. 21, 24–41; 5, с. 27–32; 6, с. 349–369];
- марки та експлуатаційні характеристики електричних щіток;
- конструктивні особливості головних та додаткових полюсів і їхніх обмоток [1, 2, с. 68–69; 4, с. 19–20; 5, с. 18–19; 6, с. 346–347].

2. Виконати тести до теми 1 «Основні теоретичні відомості і загальні питання будови машин постійного струму» на освітньому порталі ТДАТУ.

3. Відповісти на контрольні запитання до лабораторної роботи.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Виконати ескізи конструктивних схем:
- МПС у цілому та у двох проєкціях [1, 3, с. 20–22; 4, с. 18];
- колектору МПС [1, 2, с. 71; 4, с. 21];
- головного та додаткового полюсів МПС разом з обмотками [1; 2, с. 69; 4, с. 19].

2. Ознайомитися з досліджуваною МПС та вимірювальними приладами, що застосовуються під час роботи.

3. Зняти експериментальні дані омічного опору обмоток МПС та температури обмоток.

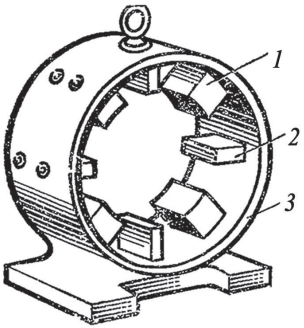
4. Розрахунковим шляхом визначити омічний опір обмоток МПС за розрахункової температури.

5. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

6. Виконати тести до лабораторної роботи № 1 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Індуктор МПС складається з корпусу (3) циліндричної форми, головних полюсів (1) з обмотками збудження та додаткових полюсів (2) з відповідними обмотками (рис. 1.1). Полюси закріплюють болтовими з'єднаннями до сталевого корпусу, який одночасно виконує функцію частини магнітного кола. Головні полюси зазвичай виготовляють шихтованими, тобто сформованими зі сталевих штампованих листів, тоді як додаткові полюси можуть бути масивними або також виконаними у шихтованому варіанті (рис. 1.2).

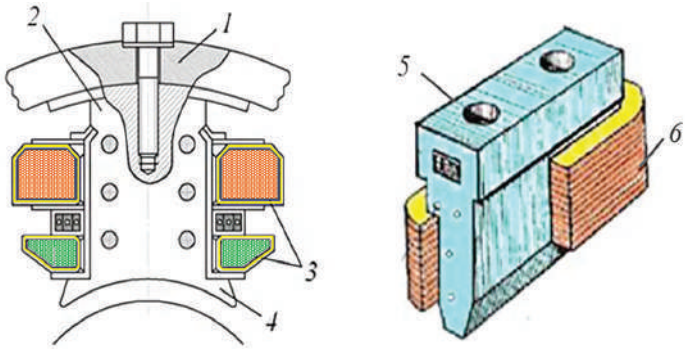


1 – головний полюс;
2 – додатковий полюс;
3 – корпус (станина)

Рисунок 1.1 – Індуктор МПС

У станині та полюсах замикається потік постійного магнітного поля, тому вибір між масивною та шихтованою конструкцією полюсів переважно визначається технологічними міркуваннями. Сталеві листи піддають пресуванню та з'єднують заклепками й притискними планками, розташованими

вздовж країв кожного полюса. Шихтованими обов'язково виконують лише наконечники головних полюсів, оскільки під час обертання зубчастого якоря внаслідок пульсацій магнітного потоку в повітряному зазорі в цих ділянках виникають вихрові струми та відповідні втрати потужності. Водночас, з міркувань спрощення технологічного процесу, на практиці часто шихтують увесь полюс [2].



а) ***б)***

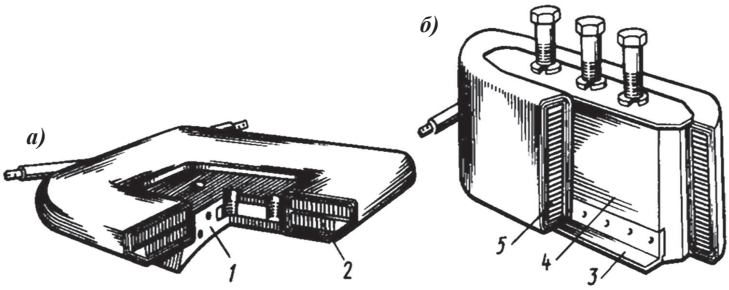
1 – станина; 2 – осердя основного (головного) полюса; 3 – обмотка збудження; 4 – полюсний наконечник; 5 – осердя додаткового полюса; 6 – обмотка додаткового полюса

Рисунок 1.2 – Будова основного (*а*) та додаткового (*б*) полюсів

Котушки головних і ***додаткових полюсів*** (рис. 1.3) виготовляють з ізольованого мідного проводу круглого або прямокутного перерізу. У машинах малої потужності котушки намотують тонким проводом, тоді як послідовні котушки обмоток збудження та додаткових полюсів виконують із смугової міді [3].

Кількість головних полюсів завжди є парною, при цьому північні та південні полюси чергуються. Таке чергування забезпечується відповідним електричним з'єднанням котушок збудження окремих полюсів. Котушки всіх полюсів зазвичай з'єднують послідовно.

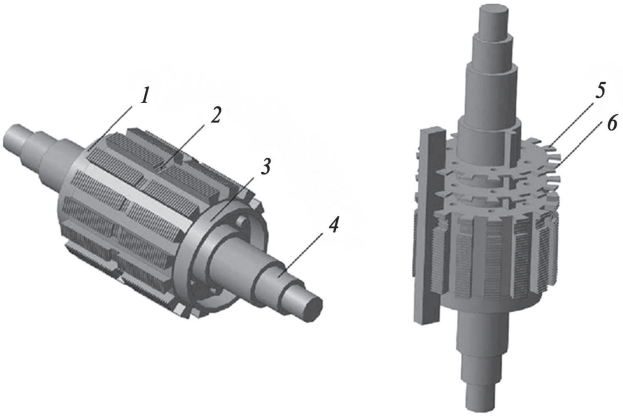
Потужність, що витрачається на збудження, становить приблизно 0,5–3 % від номінальної потужності машини. Нижня межа характерна для машин потужністю у декілька тисяч кіловат, тоді як верхня – для машин невеликої потужності, близько 5 кВт [4].



1 – головний полюс; 2 – котушка обмотки збудження; 3 – опорний косинець; 4 – додатковий полюс; 5 – котушка обмотки додаткових полюсів

Рисунок 1.3 – Будова котушок головних (*а*) та додаткових (*б*) полюсів

Осердя якоря (рис. 1.4) формують із штампованих пластин холоднокатаної електротехнічної сталі марок 2013, 2211 та 2312 завтовшки 0,5 мм. Перед складанням пластини покривають ізоляційним лаком, після чого встановлюють на вал, ущільнюють під пресом за допомогою двох шайб, з яких одна спирається на уступ валу [5].

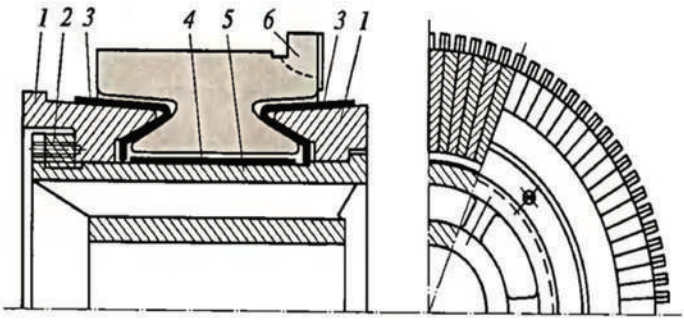


а) ***б)***

1, 3 – натискні шайби (для утримання обмотки);
2 – витки для накладання бандажу; 4 – місце для пресування колектору;
5 – ізоляційна плівка; 6 – сталевий лист

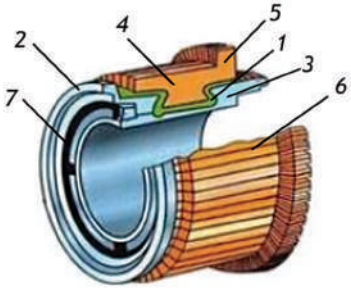
Рисунок 1.4 – Будова осердя якоря (*а*) та його збирання (*б*)

Колектор (рис. 1.5, 1.6) являє собою циліндричну конструкцію, зібрану з клиноподібних пластин із твердотягнутої міді. Між сусідніми пластинами розміщують ізоляційні прокладки зі слюди або міканіту. Звужені кінці колекторних пластин виконані у формі «ластівчиного хвоста». Після складання колектор затискають між корпусом і натискним фланцем, забезпечуючи ізоляцію за допомогою міканітових манжет. Секції обмотки якоря впаюють у прорізи, що розташовані на виступаючих частинах пластин колектору [3].



1 – конусні кільця; 2 – кільцева гайка; 3 – міканітові манжети;
4 – ізоляційний циліндр з міканіту; 5 – втулка; 6 – колекторні пластини

Рисунок 1.5 – Поперечний переріз колектору з конусними кільцями (шайбами)

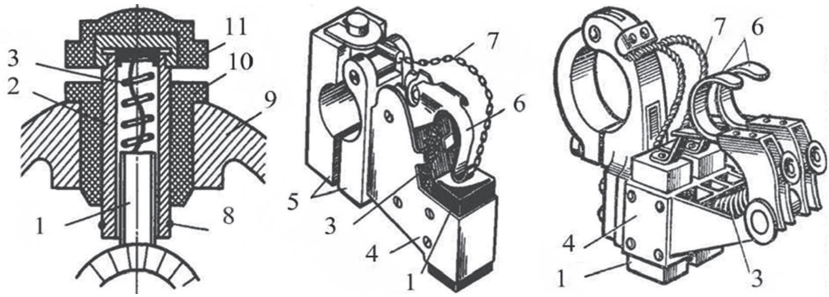


1 – ізоляційні манжети; 2 – натискний фланець; 3 – корпус з міканіту;
4 – колекторна пластина; 5 – виступаюча частина колекторної пластини;
6 – ізоляційна прокладка; 7 – кільцева гайка

Рисунок 1.6 – Будова колектору МПС з металевим корпусом

У машинах малої та середньої потужності широко використовують колектори, в яких мідні пластини та міканітові прокладки фіксуються шляхом запресовування в пластмасовий матеріал. Після складання колектор піддають токарній обробці з подальшим ретельним шліфуванням. Для запобігання підняттю міканітових прокладок над поверхнею пластин у процесі експлуатації, що може спричинити вібрацію щіток, їх фрезерують на глибину 0,8…1,5 мм відносно робочої поверхні колектору [6].

Для відведення та підведення струму до колектору використовується ***щіточний апарат***, де одним з головних конструктивних елементів є ***щітка***, закріплена в щіткоутримувачі (рис. 1.7). Щітки являють собою прямокутні бруски (рис. 1.8), виготовлені методом пресування та подальшої термічної обробки матеріалів на графітовій основі. Їх призначення полягає у забезпеченні електричного зв'язку між колектором і зовнішньою мережею, при цьому вони притискаються до його поверхні пружинами [7].



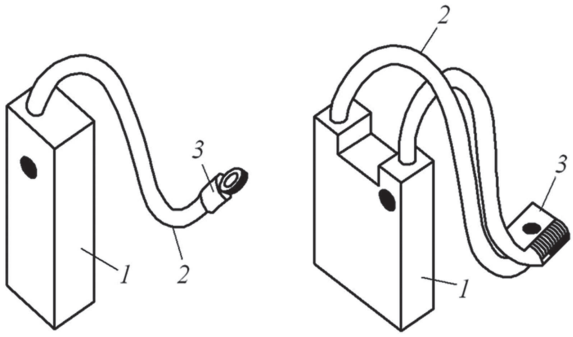
а) ***б)*** ***в)***

1 – щітка; 2 – обойма; 3 – пружина; 4 – обойма; 5 – затискачі для кріплення до щіткового пальця; 6 – натискні пластини; 7 – щітковий канатик; 8 – затискач для вивідного провідника; 9 – підшипниковий щит; 10 – ізоляційна втулка; 11 – ковпак

Рисунок 1.7 – Будова щіткоутримувачів малої (*а*), середньої (*б*) і великої (*в*) потужності

Під час обертання якоря щітки зберігають фіксоване положення відносно полюсів машини. Щіткоутримувачі встановлюють на щіткових пальцях і електрично ізолюють від них. Самі щіткові пальці

кріплять або до підшипникового щита, або до траверси, яка за потреби забезпечує поворот усієї щіткотримальної системи відносно полюсів машини. У машинах малої потужності переважно використовують трубчасті щіткоутримувачі, що монтуються безпосередньо в підшипниковому щиті [9].



а) *б)*

1 – щітка; 2 – щітковий канатик; 3 – кабельний наконечник

Рисунок 1.8 – Будова щіток малої (*а*) і великої (*б*) потужності

Залежно від хімічного складу, технології виготовлення та експлуатаційних характеристик щітки класифікують на шість основних груп: вугільно-графітні, графітні, електро-графітовані, метало-графітні, мідно-графітові, бронзо-графітні та срібно-графітні.

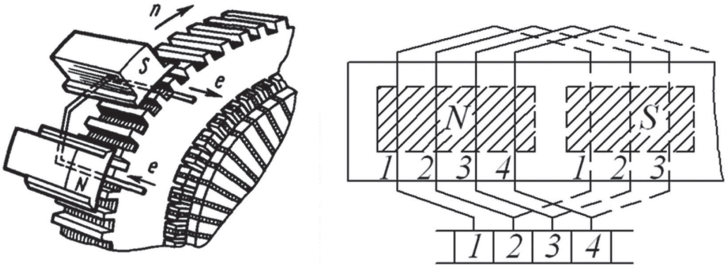
Технічні характеристики щіток електричних машин та рекомендації щодо їх використання подано в ДОДАТКУ Б [7].

Обмотка якоря є одним із ключових конструктивних елементів МПС. Для забезпечення надійної та ефективної роботи вона має відповідати таким вимогам:

- обмотка повинна бути розрахована на задані значення напруги та струму навантаження, що відповідають номінальній потужності машини, а також мати необхідну електричну, механічну й термічну стійкість, які гарантують достатньо тривалий ресурс роботи;
- конструкція обмотки має забезпечувати сприятливі умови перебігу комутаційних процесів на колекторі;
- під час виготовлення обмотки слід мінімізувати витрати матеріалів;

• технологічний процес її виготовлення повинен бути простим і технологічно доцільним [4].

У сучасних машинах застосовують барабанний тип обмотки, для якого провідники розміщують у два шари в пазах, сформованих на зовнішній поверхні якоря (рис. 1.9).



а) *б)*

Рисунок 1.9 – Схема розташування провідників обмотки (*а*) і розгорнута схема двошарової обмотки (*б*)

Щоб забезпечити додавання ЕРС, індукованих у провідниках витка, його сторони необхідно розташувати під полюсами протилежної полярності. Лише за такої умови у кожному витку виникає електрорушійна сила, що у два рази перевищує ЕРС, індуковану в одному окремому провіднику [4].

Обмотки барабанного типу поділяють на три основні групи: петльові (паралельні), хвильові (послідовні) та комбіновані (паралельно-послідовні). Основною структурною одиницею обмотки якоря є секція. ***Секцією називають частину обмотки, що містить кілька витків і з'єднує дві сусідні колекторні пластини відповідно до електричної схеми обмотки***. Кожна секція має дві активні сторони, розміщені в пазах якоря та з'єднані між собою лобовими частинами. Активні сторони секцій розташовують на відстані, що дорівнює полюсній поділці, тобто відстані між серединами полюсів уздовж окружності якоря [5].

Загальна будова МПС наведена у ДОДАТКУ В [7].

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Вимірювання омічного опору обмоток МПС виконують за допомогою вимірювального моста, омметра, мультиметра або тестера. Під час проведення вимірювань необхідно зафіксувати температуру обмоток, приймаючи її рівною температурі навколишнього середовища, якщо перед дослідом МПС не була під'єднана до мережі. Для кожної обмотки здійснюють 3 вимірювання опору, після чого обчислюють середнє значення. Додатково визначають середні значення опорів обмоток МПС, приведені до температур навколишнього середовища (20 °С) та розрахункової температури (75°С). Отримані результати вимірювань і розрахунків заносять до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення омічного опору обмоток МПС Θ_0 = __ °С

Я1–Я2	Ш1–Ш2	С1–С2	$R_{Я1–Я2(75\,°C)}$, Ом	$R_{Ш1–Ш2(75\,°C)}$, Ом	$R_{С1–С2(75\,°C)}$, Ом

В таблиці 1.1 позначено: Я1–Я2 – обмотка якоря МПС; Ш1–Ш2 – обмотка збудження МПС; С1–С1 – серіїсна обмотка МПС; $R_{(75\,°C)}$ – опір обмотки при розрахунковій температурі $\Theta_р$ = 75 °С для класу нагрівостійкості ізоляції «В».

Омічний опір обмотки при розрахунковій температурі 75 °С визначається за формулою:

$$R_{(75\,°C)} = R_{\Theta_0} \frac{235 + 75}{235 + \Theta_0}, \quad (1.1)$$

де R_{Θ_0} – омічний опір обмотки при температурі навколишнього середовища;

Θ_0 – температура навколишнього середовища.

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Відомості про призначення:
   - нерухомої частини: статора (індуктора);
   - обертової частини (якоря);
   - колектора;
   - щіткового апарата;
   - обмоток якоря МПС.

2. Відомості про марки та характеристики електричних щіток.

3. Відомості про особливості та будову головних та додаткових полюсів та їх обмоток.

4. Ескізи конструктивних схем:

- МПС в цілому та в двох проєкціях;
- колектору МПС;
- головного та додаткового полюсів МПС з обмотками.

5. Заповнену таблицю 1 із значенням експериментальних та розрахункових величин.

6. Аналіз отриманих результатів (висновки).

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Наведіть конструктивну схему МПС в двох проєкціях. З яких основних конструктивних елементів складається МПС?

2. З яких матеріалів виготовляють основні конструктивні елементи МПС?

3. Наведіть конструктивну схему індуктора МПС в двох проєкціях з урахуванням геометричної форми полюсів. Назвіть елементи конструкції і з яких матеріалів їх виготовляють?

4. Наведіть конструктивну схему якоря МПС. З яких основних конструктивних елементів складається якір МПС?

5. З яких матеріалів виготовляють основні конструктивні елементи якоря МПС?

6. З яких конструктивних елементів складається щітковий апарат МПС?

7. Яке призначення має щітковий апарат МПС?

8. Які типи обмоток якоря МПС існують і які вимоги до них?

9. Як визначається перший крок обмотки якоря?

10. Яку будову мають обмотки якоря МПС і який їх основний елемент?

11. Що називається паралельною гілкою обмотки якоря?

12. З яких матеріалів виготовляються обмотки МПС?

13. У чому сутність принципу роботи спрощеної МПС в режимі генератора?

14. У чому сутність принципу роботи спрощеної МПС в режимі двигуна?

15. У чому полягає принцип або властивість оберненості МПС?

16. Що називається омічним опором обмотки МПС і від чого залежить його величина?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ В РЕЖИМІ ХОЛОСТОГО ХОДУ

Мета роботи

Набуття практичних навичок з монтажу схеми електричної принципової підключення генератора постійного струму незалежного збудження та експериментального отримання характеристики холостого ходу.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1, 2, с. 108–113; 3, с. 66–70; 4, с. 69–72, 76–77; 6, с. 393–397] опрацювати теоретичний матеріал за темою 2 «Генератори постійного струму», зосередивши увагу на: призначенні та класифікації генераторів постійного струму (ГПС); принципі дії та основних рівняннях ГПС; режимах холостого ходу (х.х.) та короткого замикання (к.з.); основних характеристиках і властивостях ГПС незалежного збудження.

2. Виконати тести з теми 2 на освітньому порталі ТДАТУ, які охоплюють положення, викладені в пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали для оформлення звіту з лабораторної роботи, необхідні для фіксації та опрацювання експериментальних даних, а також побудови характеристик генератора.

2. Ознайомитися з методикою отримання статичних характеристик ГПС незалежного збудження.

3. Ознайомитися з робочим місцем, вимірювальним обладнанням та приладами стенда для випробувань. Записати паспортні дані генератора та приводного електродвигуна, а також визначити номінальний струм ГПС.

4. Зібрати схему електричну принципову для проведення випробувань ГПС незалежного збудження з приводним двигуном.

5. Виконати зняття експериментальних даних, необхідних для побудови характеристики холостого ходу (х.х.х.) ГПС.

6. Побудувати х.х.х. за отриманими експериментальними даними, провести її аналіз, пояснити характер кривої та оцінити експлуатаційні властивості ГПС незалежного збудження.

7. На основі результатів експерименту визначити величину напруги $U_{зал}$ при $I_{зб} = 0$.

8. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

9. Виконати тести до лабораторної роботи № 2 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Статичні характеристики ГПС визначаються за умов незмінної частоти обертання (n = const). До основних характеристик належать: характеристика холостого ходу, характеристика короткого замикання, зовнішня характеристика, регулювальна та навантажувальна характеристики [3].

Форма та поведінка статичних характеристик визначають експлуатаційні властивості та якісні показники роботи ГПС.

Характеристика холостого ходу – залежність напруги на виході генератора в режимі х.х. U_0 від струму збудження $I_{зб}$:

$$U_0 = f(I_{зб}) \text{ при } I_a = 0 \text{ і } n = \text{const},$$

де I_a – струм якоря.

Режим х.х. – це режим роботи ГПС, за якого якір обертається з номінальною частотою обертання, а в обмотці збудження проходить струм $I_{зб}$, що створює магніторушійну силу (МРС) збудження $F_{зб}$ та відповідний магнітний потік $\Phi_{зб}$. Під дією цього потоку в обмотці якоря індукується електрорушійна сила (ЕРС) E_a, при цьому струм якоря відсутній, тобто $I_a = 0$ [4].

Під час зняття х.х.х. $U_0 = f(I_{зб})$ генератор працює в режимі х.х., тобто $I_a = 0$. Після встановлення номінальної частоти обертання, яку підтримують сталою протягом усього експерименту, струм збудження $I_{зб}$ поступово збільшують від нульового значення до такого

рівня $+I_{зб}$, за якого напруга х.х. досягає величини $U_0 = 1{,}15…1{,}25U_{ном}$ (де $U_{ном}$ – номінальна напруга генератора, що наведена в його паспортних даних). За отриманими даними будують криву 2 (рис. 2.1). Початкова ордината цієї кривої є додатною, що пояснюється наявністю магнітного потоку залишкового магнетизму, який зберігається в магнітопроводі після попереднього намагнічування машини [5].

Після побудови кривої 2 струм збудження зменшують до нуля, потім змінюють його полярність та знову плавно збільшують до значення $-I_{зб}$. У результаті отримують криву 1, яка є ***спадною гілкою*** характеристики. У першому квадранті крива 1 розташована вище кривої 2, що зумовлено збільшенням залишкового магнітного потоку під час зняття кривої 2.

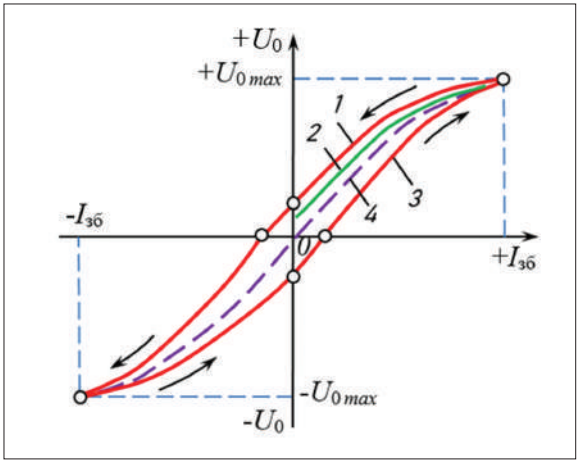


Рисунок 2.1 – Характеристики холостого ходу ГПС незалежного збудження

Подальший етап досліду полягає у зменшенні струму збудження від $-I_{зб}$ до нуля, а потім у його повторному збільшенні до $+I_{зб}$. У такий спосіб отримують криву 3, яка відповідає ***висхідній гілці*** х.х. [6].

Спадна та висхідна гілки утворюють ***петлю намагнічування (гістерезису)***. Провівши між кривими 2 та 3 середню лінію 4, отримують ***розрахункову х.х.х.*** [6].

Лінійна ділянка х.х.х. відповідає режиму, за якого магнітна система машини перебуває в стані не насичення. Подальше збільшення струму збудження призводить до насичення магнітопроводу, унаслідок чого характер кривої стає нелінійним і набуває вираженої криволінійності.

Характеристика короткого замикання (х.к.з.) – залежність струму короткого замикання (к.з.) в обмотці якоря $I_{а\,кз}$ від струму збудження $I_{зб}$:

$$I_{а\,кз} = f(I_{зб}) \text{ при } U = 0 \text{ і } n = \text{const}.$$

Зазвичай х.к.з (рис. 2.2) знімають до струмів якоря $I_а = 1{,}15\ldots1{,}5I_{а\,ном}$ (де $I_{а\,ном}$ – номінальний струм якоря генератора). Оскільки при цьому напруга на вихідних затискачах генератора дорівнює нулю, ЕРС $E_а$ повністю врівноважується падінням напруги в колі якоря, тобто $E_а = I_а \cdot \Sigma R$ (де ΣR – сумарний опір кола якоря) [3].

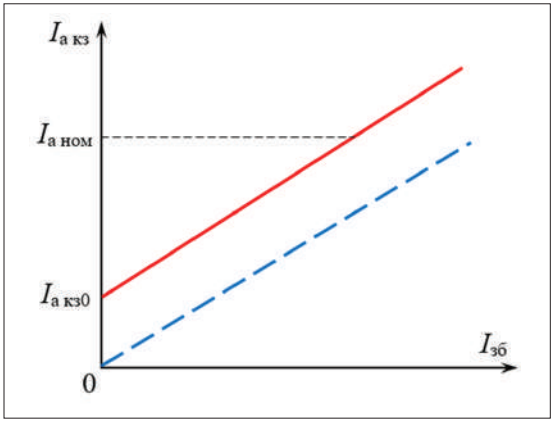


Рисунок 2.2 – Характеристика короткого замикання ГПС незалежного збудження

Через те, що сумарний опір кола якоря ΣR є малим, значення $E_а$ також залишається незначним. За умов сталої частоти обертання $n = \text{const}$ та малої величини $E_а$, магнітний потік наближається до нульового значення, що відповідає практично ненасиченому стану магнітної системи, який визначається за виразом [4]:

$$\Phi = \frac{E_{\text{a}}}{c_{\text{e}} n}, \qquad (2.1)$$

де $c_{\text{e}} = pN / 60a = \text{const}$ – постійна ЕРС для даного генератора;

p – кількість пар полюсів генератора;

N – кількість провідників обмотки якоря;

a – кількість паралельних гілок обмотки якоря.

У цьому режимі магнітний потік має дуже малу величину, а магнітна система ГПС залишається ненасиченою. Унаслідок цього залежність $I_{\text{а кз}} = f(I_{\text{зб}})$ набуває майже лінійного характеру. При $I_{\text{зб}} = 0$, завдяки наявності залишкового магнітного потоку $\Phi_{\text{зал}}$, у колі якоря протікає певний струм $I_{\text{а}} = I_{\text{а кз0}} \neq 0$. У окремих випадках його величина може досягати номінального значення $I_{\text{а ном}}$ [5].

Тому перед зняттям х.к.з. доцільно виконати процедуру ***розмагнічування ГПС***. Якщо ж характеристику $I_{\text{а кз}} = f(I_{\text{зб}})$ отримано без попереднього розмагнічування, то її необхідно паралельно змістити до початку координат, як це показано пунктирною лінією на рисунку 2.2.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Схема електрична принципова для випробувань ГПС незалежного збудження наведена на рисунку 2.3. Під час виконання лабораторної роботи слід змонтувати відповідну схему електричну принципову для випробувань ГПС та зафіксувати паспортні дані вимірювальних приладів і електричних машин, що застосовуються в досліді: досліджуваного генератора (М1) і приводного двигуна (М2).

4.1 Методика отримання характеристики холостого ходу ГПС

Х.х.х. ГПС незалежного збудження досліджується за схемою електричною принциповою, наведеною на рисунку 2.3, у такій послідовності.

Перед проведенням досліду навантажувальний реостат $R_{\text{нав}}$ встановлюється у виведене положення, щоб його опір дорівнював нескінченності ($R_{\text{нав}} = \infty$), що відповідає розриву кола навантаження і режиму х.х. ГПС. При цьому струм в якорі $I_{\text{а}}$ буде дорівнювати нулю. Струм в якорі $I_{\text{а}}$ вимірюють амперметром РА2. В якості $R_{\text{нав}}$ використовується рідинний реостат. Потенціометр (повзунковий реостат) $R_{\text{зб}}$ встановлюється у введене положення, щоб струм збудження $I_{\text{зб}}$ при пуску генератора в роботу дорівнював нулю, тобто ГПС був незбудженим. Струм збудження $I_{\text{зб}}$ в досліді вимірюється амперметром РА1.

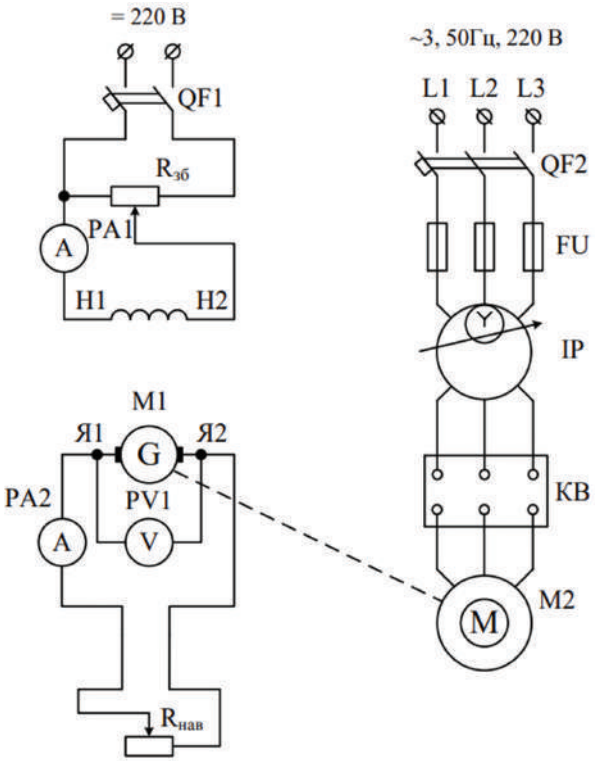


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова дослідження ГПС незалежного збудження

Потім автоматичним вимикачем *QF*2 подається живлення на обмотку статора асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором М2 і встановлюється номінальна напруга живлення індукційним регулятором ІР. Напруга живлення двигуна вимірюється вольтметром, який встановлений у комплекті вимірювальному КВ.

У досліді якір ГПС М1 приводиться в обертання первинним двигуном М2 до номінальної частоти обертання, яка вимірюється тахометром і підтримується незмінною протягом усього експерименту.

Після цього вмикається автоматичний вимикач *QF*1, і обмотка збудження генератора *Н*1 – *Н*2 отримує живлення від незалежного джерела постійного струму.

Далі при незбудженому генераторі (струм збудження $I_{зб} = 0$, про що свідчать покази амперметра PA1), вимірюють напругу на якорі U_o вольтметром PV1, зумовлену залишковим магнетизмом, $U_{зал}$. Потім, плавно змінюючи опір потенціометра $R_{зб}$, поступово збільшують струм збудження від $I_{зб} = 0$ до значення $I_{зб\ макс}$, за якого напруга U_o на затискачах генератора становить $(1{,}2…1{,}3)U_{ном}$. Внаслідок цього отримують висхідну гілку х.х.х.

Спадну гілку характеристики отримують шляхом зменшення струму збудження від $I_{зб\ макс}$ до $I_{зб} = 0$. Для побудови х.х.х достатньо зафіксувати 8…10 експериментальних точок для кожної її гілки. Показання вимірювальних приладів заносять до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Експериментальні дані досліду холостого ходу

Висхідна гілка	$I_{зб}$, А									
	U_o, В									
Спадна гілка	$I_{зб}$, А									
	U_o, В									

4.2 Обробка дослідних даних

На підставі даних таблиці 1 необхідно побудувати х.х.х. $U_0 = f(I_{зб})$ ГПС незалежного збудження та визначити значення напруги залишкового магнетизму $U_{зал}$ при $I_{зб} = 0$.

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову випробувань ГПС незалежного збудження.
2. Технічні характеристики застосованих вимірювальних приладів та електричних машин (паспортні дані досліджуваного генератора та приводного двигуна).
3. Експериментальні дані, зведені у таблицю 2.1.
4. Побудовані в масштабі дослідну х.х.х. $U_0 = f(I_{зб})$ ГПС (висхідна та спадна гілки) та розрахункову х.х.х.

5. Визначене значення напруги залишкового магнетизму $U_{зал}$.

6. Аналіз отриманих результатів з зазначенням основних експлуатаційних властивостей ГПС незалежного збудження у режимі х.х. (інтерпретація форми кривої, вплив залишкового магнетизму, зона лінійності та насичення).

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. З яких основних конструктивних елементів складається ГПС і матеріал їх виготовлення?
2. Що називається індуктором ГПС і його призначення?
3. Що називається якорем ГПС і його призначення?
4. У чому полягає сутність принципу дії ГПС?
5. Поясніть, як розрізняють ГПС за способом збудження?
6. Які характеристики відносяться до статичних характеристик ГПС?
7. Що називається режимом х.х. ГПС?
8. Наведіть і поясніть х.х.х. ГПС незалежного збудження.
9. Поясніть причину виникнення залишкової ЕРС.
10. Яке значення має приблизно величина залишкової ЕРС в ГПС незалежного збудження у відсотках від номінальної?
11. Як позначаються на схемах електричних принципових виводи обмотки збудження ГПС незалежного збудження?
12. Як позначаються на схемах електричних принципових виводи обмотки якоря ГПС незалежного збудження?
13. Наведіть принципову електричну схему ГПС незалежного збудження.
14. У чому полягає сутність методики дослідного отримання х.х.х. ГПС?
15. Наведіть і поясніть х.к.з. ГПС незалежного збудження.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ В РЕЖИМІ НАВАНТАЖЕННЯ

Мета роботи

Набуття практичних навичок з монтажу схеми електричної принципової підключення ГПС незалежного збудження та експериментального отримання його зовнішньої і регулювальної характеристик.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1, 2, с. 85–90, 113–116; 3, с. 58–63, 66–67, 69–71; 4, с. 52–57, 72–76; 6, с. 375–379, 391–393, 397–400] ознайомитися з теоретичним матеріалом за темою 2 «Генератори постійного струму», що охоплює питання режиму навантаження ГПС, статичних характеристик, енергетичної діаграми перетворення енергії в генераторі незалежного збудження, енергетичних показників ГПС та реакції якоря.

2. Виконати тести з теми 2 на освітньому порталі ТДАТУ, які охоплюють положення, викладені в пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов’язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали для оформлення звіту з лабораторної роботи для запису, обробки дослідних даних і побудови характеристик генератору.

2. Ознайомитись із методикою експериментального отримання статичних характеристик ГПС незалежного збудження, зокрема зовнішньої, регулювальної та навантажувальної характеристик.

3. Ознайомитись з робочим місцем, конструкцією та приладами стенда для випробувань; зафіксувати паспортні дані генератора та приводного двигуна; визначити номінальний струм ГПС.

4. Змонтувати схему електричну принципову випробувань ГПС незалежного збудження з приводним електродвигуном.

5. Зняти експериментальні дані для побудови зовнішньої характеристики генератора.

6. Зняти експериментальні дані для побудови регулювальної характеристики генератора.

7. Побудувати за експериментальними даними зовнішню та регулювальну характеристики ГПС; виконати їх аналіз, пояснити форму характеристик та оцінити експлуатаційні властивості генератора в режимі навантаження.

8. За експериментальними даними зовнішньої характеристики визначити величину зміни напруги при номінальному навантаженні генератора незалежного збудження.

9. За експериментальними даними регулювальної характеристики визначити величину зміни струму збудження при номінальному навантаженні генератора незалежного збудження.

10. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

11. Виконати тести до лабораторної роботи № 3 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Зовнішня характеристика – залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження $I_а$:

$$U = f(I_а) \text{ при } I_{зб} = \text{ const і } n = \text{const}.$$

Зовнішню характеристику ГПС досліджують у режимі навантаження [2].

Під ***режимом навантаження*** розуміють такий робочий стан, за якого якір генератора обертається з номінальною частотою, в обмотці збудження протікає струм $I_{зб}$, що створює МРС збудження $F_{зб}$ та магнітний потік збудження $Ф_{зб}$. Останній індукує у якірній обмотці ЕРС $E_а$. До затискачів якоря при цьому під'єднане навантаження, внаслідок чого в якорі протікає струм $I_а$ [3].

Під час знімання експериментальних даних для побудови зовнішньої характеристики генератор приводять в обертання з номінальною частотою та навантажують до номінального струму за умови номінальної

напруги на затискачах. Після цього, поступово зменшуючи струм навантаження до режиму х.х. ($I_а = 0$), фіксують показання вимірювальних приладів. Протягом усього досліду опір кола збудження $R_{рзб}$ та частоту обертання якоря підтримують незмінною (n = const) [5].

На рисунку 3.1 наведено зовнішню характеристику ГПС незалежного збудження [5]. Із графіка видно, що зі збільшенням струму навантаження $I_а$ напруга на затискачах генератора зменшується. Це зумовлено впливом реакції якоря та падінням напруги в його колі.

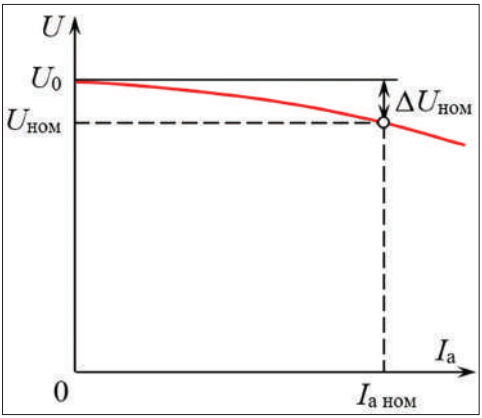


Рисунок 3.1 – Зовнішня характеристика ГПС незалежного збудження

Реакція якоря – це вплив МРС обмотки якоря $F_а$ на основне магнітне поле машини, створюване МРС збудження $F_{зб}$.

Нахил зовнішньої характеристики відносно осі абсцис (***жорсткість зовнішньої характеристики***) кількісно оцінюють за величиною номінальної зміни напруги генератора при переході від номінального режиму до режиму х.х. [6]:

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} 100\ \%, \qquad (3.1)$$

де U_0 – напруга на затискачах якоря генератора в режимі х.х.;

$U_{ном}$ – напруга на затискачах якоря генератора при номінальному навантаженні ($I_а = I_{а\ ном}$).

Зазвичай для генератора незалежного збудження $\Delta U_{ном} = 5…10\ \%$.

Регулювальна характеристика – залежність струму збудження $I_{зб}$ від струму навантаження $I_а$ при незмінній напрузі на виході генератора:

$$I_{зб} = f(I_а) \text{ при } U = \text{const і } n = \text{const}.$$

Регулювальна характеристика $I_{зб} = f(I_а)$ (рис. 3.2) відображає залежність між струмом збудження та струмом навантаження і показує, яким чином необхідно змінювати струм у колі збудження, щоб напруга на затискачах генератора залишалася сталою та відповідала номінальному значенню при зміні навантаження. Під час дослідження частота обертання якоря підтримується постійною ($n = \text{const}$) [5].

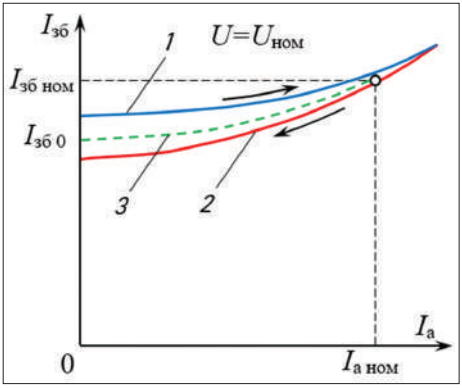


Рисунок 3.2 – Регулювальна характеристика ГПС незалежного збудження

Під час роботи генератора в режимі х.х. в колі збудження встановлюють струм $I_{зб\ 0}$, за якого напруга на його затискачах дорівнює номінальному значенню. Далі навантаження генератора поступово збільшують, одночасно підвищуючи струм збудження таким чином, щоб напруга залишалася сталою та відповідала номінальній у всьому діапазоні навантажень. У результаті отримують ***висхідну гілку*** регулювальної характеристики (рис. 3.2, крива 1).

Після цього навантаження генератора поступово зменшують до режиму х.х., відповідним чином змінюючи струм збудження, що

дозволяє побудувати ***спадну гілку*** характеристики (рис. 3.2, крива 2). Спадна гілка розташована нижче висхідної, що зумовлено підвищеним залишковим намагнічуванням магнітного кола машини, яке виникає під час знімання висхідної частини характеристики.

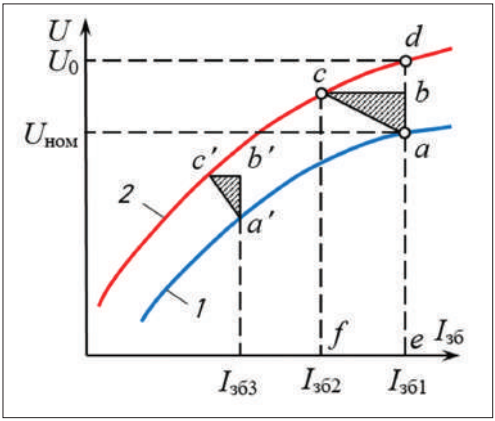


Рисунок 3.3 – Навантажувальна характеристика ГПС незалежного збудження

Криву 3, побудовану як середню між висхідною і спадною гілками, називають ***практичною регулювальною характеристикою генератора*** [5].

Навантажувальна характеристика – залежність напруги на виході генератора U при роботі з навантаженням від струму збудження $I_{зб}$:

$$U = f(I_{зб}) \text{ при } I_a \neq 0 \text{ і } n = \text{const}.$$

Навантажувальну характеристику генератора досліджують за умови сталого струму навантаження, наприклад, номінального, а також постійної частоти обертання. За цих умов напруга на затискачах генератора є меншою за його ЕРС, унаслідок чого навантажувальна характеристика (рис. 3.3, крива 1) розташована нижче х.х.х. (рис. 3.3, крива 2) [5, 6].

Якщо з точки a, що відповідає номінальній напрузі $U_{ном}$, відкласти вгору відрізок ab, величина якого дорівнює $I_a\Sigma r$, і провести з точки b

горизонтальний відрізок *bc* до перетину з х.х.х., після чого з'єднати точки *a* і *c*, то отримаємо трикутник *abc*, який називають ***реактивним (характеристичним) трикутником*** [6].

У режимі х.х. при струмі збудження $I_{зб1} = f(I_{зб\ ном})$ напруга на затискачах генератора становить $U_0 = de$. Після підключення навантаження (за незмінного струму збудження) напруга зменшується до номінального значення $U_{ном} = ae$. Таким чином, відрізок *da* відображає зміну напруги $\Delta U = U_0 + U_{ном}$ при струмі збудження $I_{зб1} = I_{зб\ ном}$.

Зменшення напруги в цьому режимі зумовлене двома факторами: падінням напруги у колі якоря та дією реакції якоря.

Знаючи опір кола якоря та обчисливши падіння напруги $I_а\Sigma R$, можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження за виразом: $E_а = U + I_а\Sigma R$ [5].

На рисунку 3.3 ця ЕРС зображена відрізком *be*. Значення ЕРС у навантаженому режимі менше, ніж у режимі х.х. ($be \le de$), що пояснюється впливом реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу з точки *c* опускають перпендикуляр на вісь абсцис. Отриманий відрізок *cf* відповідає тій ЕРС генератора, яка створюється при навантаженні; у режимі х.х. для утворення такої ЕРС був би потрібний струм збудження $I_{зб2} = I_{зб1\ ном}$.

Отже, відрізок *fe*, що дорівнює різниці струмів збудження ($I_{зб1} - I_{зб2}$), характеризує величину додаткового струму збудження, необхідного для компенсації реакції якоря [6].

Катети реактивного трикутника кількісно характеризують фактори, що спричиняють зниження напруги генератора під час його навантаження. Зокрема, вертикальний катет відповідає спаданню напруги в колі якоря, тоді як горизонтальний катет визначає складову зменшення напруги, зумовлену впливом реакції якоря [6]:

$$ab = I_а\Sigma R\ . \tag{3.2}$$

Струм збудження ($I_{зб1} - I_{зб2}$), що компенсує дію реакції якоря, визначає катет [6]:

$$bc = I_{зб1} - I_{зб2} = \frac{2F_{qd} + F_{ad}}{2W_{зб}}, \tag{3.3}$$

де F_{qd} і F_{ad} – поперечна і поздовжня складові намагнічуючої сили реакції якоря;

$W_{зб}$ – число витків у полюсній котушці обмотки збудження.

Реактивний трикутник $a'b'c'$, побудований для іншого значення струму збудження $I_{збз}$, демонструє зміну впливу окремих факторів на роботу генератора. Сторона $a'b'$ залишається незмінною ($a'b' = ab$), що зумовлено сталим струмом навантаження. Водночас сторона $b'c'$ зменшується ($b'c' = bc$), оскільки при меншому струмі збудження знижується ступінь насичення магнітного кола генератора, а відповідно – і величина реакції якоря [6].

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

На рисунку 3.4 наведено схему електричну принципову випробувань ГПС незалежного збудження. Під час виконання лабораторної роботи слід змонтувати відповідну схему електричну принципову для випробувань ГПС та зафіксувати паспортні дані вимірювальних приладів і електричних машин, що застосовуються в досліді: досліджуваного генератора (М1) і приводного двигуна (М2).

4.1 Методика отримання зовнішньої характеристики ГПС

Зовнішня характеристика ГПС незалежного збудження досліджується за схемою електричною принциповою, наведеною на рисунку 3.4, у такій послідовності.

Перед проведенням досліду навантажувальний реостат $R_{нав}$ встановлюється у виведене положення, щоб його опір дорівнював нескінченності ($R_{нав} = \infty$), що відповідає розриву кола навантаження і режиму х.х. ГПС. При цьому струм в якорі $I_а$ буде дорівнювати нулю. Струм в якорі $I_а$ вимірюють амперметром РА2. В якості $R_{нав}$ використовується рідинний реостат. Потенціометр (повзунковий реостат) $R_{зб}$ встановлюється у введене положення, щоб струм збудження $I_{зб}$ при пуску генератора в роботу дорівнював нулю, тобто ГПС був незбудженим. Струм збудження $I_{зб}$ в досліді вимірюється амперметром РА1.

Потім автоматичним вимикачем $QF2$ подається живлення на обмотку статора асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором М2 і встановлюється номінальна напруга живлення індукційним регулятором ІР. Напруга живлення двигуна вимірюється вольтметром, який встановлений у комплекті вимірювальному КВ.

У досліді якір ГПС М1 приводиться в обертання первинним двигуном М2 до номінальної частоти обертання, яка вимірюється тахометром і підтримується незмінною протягом усього експерименту (n = const).

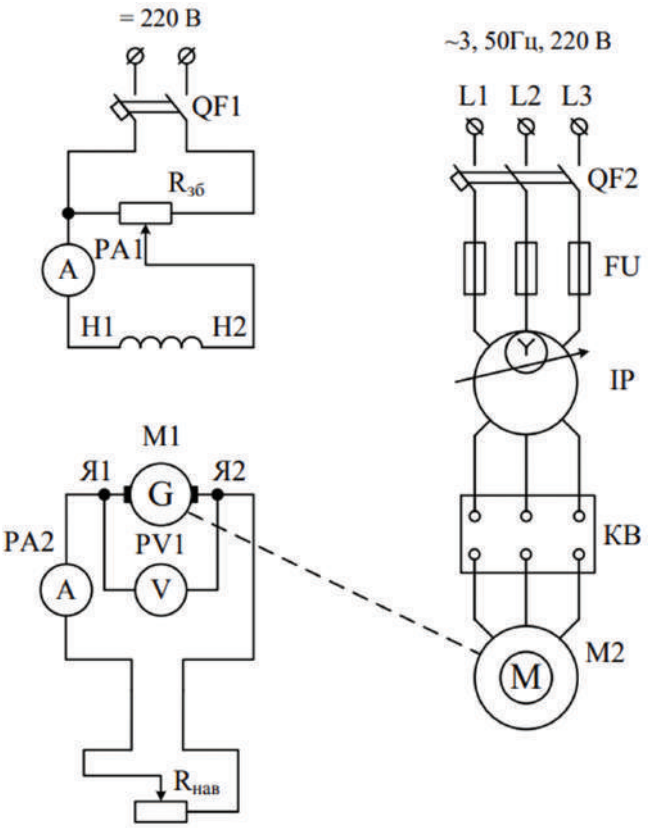


Рисунок 3.4 – Схема електрична принципова дослідження генератора постійного струму незалежного збудження

Після цього вмикається автоматичний вимикач *QF*1, і обмотка збудження генератора *H*1 – *H*2 отримує живлення від незалежного джерела постійного струму.

Далі повзунок потенціометра $R_{зб}$ встановлюється у середнє положення, внаслідок чого через обмотку збудження *H*1 – *H*2 починає протікати певний початковий струм збудження про що свідчать покази амперметра PA1.

Наступним етапом, змінюючи струм навантаження, який контролюється амперметром PA2, за допомогою реостата $R_{нав}$ та коригуючи

струм збудження $I_{зб}$, визначають номінальне значення струму збудження $I_{зб} = I_{зб\ ном}$, яке забезпечується номінальну напругу генератора $U = U_{ном}$, яка вимірюється вольтметром PV1, при струмі навантаження $I_а = I_{зб\ ном}$. Після встановлення номінального струму збудження, підтримуючи $I_{зб} = \text{const}$, збільшують струм навантаження до $I_а = 1{,}2I_{а\ ном}$, і вимірюють відповідне значення напруги U.

Далі генератор поступово розвантажують до режиму х.х. ($I_а = 0$), підтримуючи номінальне значення струму збудження $I_{зб}$, фіксуючи значення напруги вольтметром PV1 на затискачах та інші параметри, необхідні для побудови зовнішньої характеристики. Всього знімається 8…10 точок. Дані вимірів заносяться до таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Експериментальні дані для побудови зовнішньої характеристики ГПС незалежного збудження $I_{зб} = I_{зб\ ном}$ = ____ А

U	В										
$I_а$	А										

4.2 Методика отримання регулювальної характеристики ГПС

Дослід виконується відповідно до схеми електричної принципової, поданої на рисунку 3.4, у такій послідовності. У режимі х.х. ($I_а = 0$) на затискачах збудженого генератора встановлюють номінальну напругу $U_0 = U_{ном}$ шляхом регулювання струму збудження $I_{зб}$, після чого фіксують показання вимірювальних приладів (PA1, PA2 і PV1).

Потім регулюючи струм збудження $I_{зб}$ реостатом $R_{зб}$, підтримують напругу на затискачах генератора незмінною та рівною номінальному значенню ($U = U_{ном} = \text{const}$), навантаження генератора поступово збільшують від режиму х.х. до струму $I_а = 1{,}2I_{а\ ном}$. Рекомендується реєструвати 8…10 точок характеристики. Отримані експериментальні дані вносять до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Експериментальні дані для побудови регулювальної характеристики ГПС незалежного збудження $U_{ном}$ = ____ В = const

$I_{зб}$	А										
$I_а$	А										

4.3 Обробка дослідних даних

На підставі даних, наведених у таблицях 1 і 2, слід побудувати зовнішню та регулювальну характеристики ГПС. Крім того, необхідно визначити при номінальному навантаженні генератора незалежного збудження:

– зміну напруги на виході генератора:

$$\Delta U_{ном\%} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_0} 100\ \%; \tag{3.4}$$

– зміну струму збудження:

$$\Delta I_{зб.ном\%} = \frac{I_{зб.ном} - I_{зб.0}}{I_{зб.0}} 100\ \%. \tag{3.5}$$

де $I_{зб.0}$ – струм збудження в режимі х.х. при $U_0 = U_{ном}$;

$I_{зб.ном}$ – струм збудження при номінальному навантаженні генератора:

$$U = U_{ном} \text{ і } I_а = I_{а\ ном}.$$

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову випробування ГПС незалежного збудження.

2. Технічні характеристики вимірювальних приладів та електричних машин, які використовуються в досліді (ГПС, що досліджується, і приводного двигуна).

3. Данні дослідів зведених до таблиць 3.1 і 3.2.

4. Побудовані в масштабі зовнішню та регулювальну характеристики ГПС незалежного збудження.

5. Результати розрахунків значень $\Delta U_{ном\%}$ і $\Delta I_{зб.ном\%}$.

6. Аналіз отриманих результатів з зазначенням основних властивостей ГПС незалежного збудження в режимі навантаження.

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що називається режимом навантаження ГПС?
2. Що називається статичними характеристиками ГПС?
3. Що називається зовнішньою характеристикою ГПС?
4. Поясніть методику отримання зовнішньої характеристики ГПС
5. Наведіть і поясніть вигляд зовнішньої характеристики ГПС незалежного збудження.
6. Що називається зміною напруги ГПС незалежного збудження і яке приблизне її значення?
7. Що називається регулювальною характеристикою ГПС?
8. У чому полягає фізичний сенс регулювальної характеристики?
9. Що називається практичною регулювальною характеристикою генератора?
10. Поясніть методику отримання регулювальної характеристики ГПС.
11. Наведіть і поясніть вигляд регулювальної характеристики ГПС незалежного збудження.
12. Чому спадна гілка регулювальної характеристики розташована нижче висхідної гілки?
13. Що називається зміною струму збудження ГПС незалежного збудження і яке приблизне її значення?
14. Наведіть і поясніть вигляд навантажувальної характеристики ГПС незалежного збудження.
15. Як отримати трикутник реактивний (характеристичний) для побудови навантажувальної характеристики?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи

Набуття практичних навичок з монтажу схеми електричної принципової підключення ГПС паралельного збудження та експериментального отримання його зовнішньої і регулювальної характеристик.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 116–120; 3, с. 71–72; 4, с. 77–79; 6, с. 401–405] ознайомитися з теоретичним матеріалом за темою 2 «Генератори постійного струму», що охоплює питання режиму навантаження, статичних характеристик, енергетичної діаграми перетворення енергії, енергетичних показників, а також механізму самозбудження ГПС паралельного збудження.

2. Виконати тести з теми 2 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали та шаблони для оформлення звіту лабораторної роботи, передбачивши процедури внесення та обробки експериментальних даних і побудови відповідних характеристик генератора.

2. Ознайомитися з методикою проведення експериментальних вимірювань для побудови зовнішніх та регулювальних характеристик ГПС паралельного збудження.

3. Ознайомитися з робочим місцем, обладнанням та вимірювальними приладами лабораторного стенда; зафіксувати паспортні дані генератора й приводного двигуна та визначити номінальний струм генератора.

4. Змонтувати схему електричну принципову для випробувань ГПС паралельного збудження та виконати зняття зовнішньої і регулювальної характеристик генератора у встановленому порядку.

5. Зняти експериментальні дані для побудови зовнішньої характеристики генератора.

6. Зняти експериментальні дані для побудови регулювальної характеристики генератора.

7. Побудувати за експериментальними даними зовнішню та регулювальну характеристики ГПС; виконати їх аналіз, пояснити форму характеристик та оцінити експлуатаційні властивості генератора в режимі навантаження.

8. За експериментальними даними зовнішньої характеристики визначити величину зміни напруги при номінальному навантаженні генератора паралельного збудження.

9. За експериментальними даними регулювальної характеристики визначити величину зміни струму збудження при номінальному навантаженні генератора паралельного збудження.

10. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

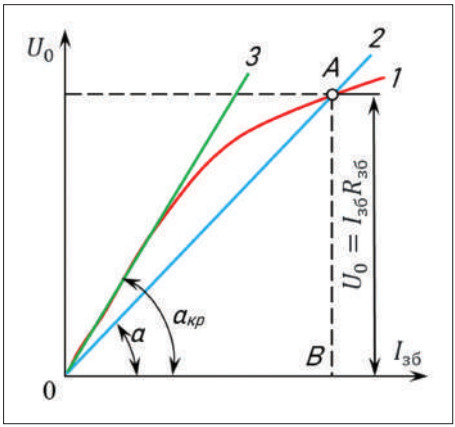
11. Виконати тести до лабораторної роботи № 4 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Принцип самозбудження ГПС паралельного збудження ґрунтується на здатності магнітної системи машини зберігати певний залишковий магнітний потік $\Phi_{зал}$ у полюсних осердях та станині, величина якого становить приблизно 2–3 % від номінального потоку. Під час обертання якоря цей залишковий потік індукує в його обмотці відповідну ЕРС $E_{зал}$, під дією якої в обмотці збудження виникає невеликий струм $I_{зб.\,зал}$ [2].

Якщо МРС обмотки збудження $I_{зб.\,зал} \cdot W_{зб}$ має однаковий напрям із залишковим потоком $\Phi_{зал}$, вона сприяє збільшенню магнітного потоку головних полюсів. Унаслідок цього зростає ЕРС, що генерується машиною, а відповідно зростає і струм збудження. Процес підсилення магнітного потоку та нарощування струму збудження продовжується доти, доки напруга генератора не зрівноважиться падінням напруги в колі збудження, тобто доки не буде виконано умову: $I_{зб} \cdot R_{зб} = U_0$ [3].

З х.х.х (рис. 4.1) випливає, що кут нахилу прямої $I_{зб} \cdot R_{зб} = f(I_{зб})$ до осі абсцис є прямо пропорційним повному опору кола збудження. Однак за певного значення опору реостата $R_{рзб}$ загальний опір $R_{зб}$ досягає такої величини, за якої лінія $I_{зб} \cdot R_{зб} = f(I_{зб})$ стає дотичною до лінійної ділянки х.х.х. (рис. 4.1, пряма 3). За такої умови процес самозбудження генератора не відбувається [3].



1 – х.х.х. генератора; 2 – ВАХ кола збудження; 3 – дотична ВАХ до х.х.х

Рисунок 4.1 – Характеристика х.х. ГПС паралельного збудження

Опір кола збудження, при досягненні якого самозбудження стає неможливим, називають ***критичним опором*** і позначають як $R_{зб.\ крит}$

Таким чином, ***самозбудження ГПС паралельного збудження можливе лише за дотримання таких умов*** [5]:

- магнітна система машини повинна зберігати залишковий магнетизм;
- обмотка збудження має бути під'єднана так, щоб її МРС збігалася за напрямом із потоком залишкового магнетизму $\Phi_{зал}$;
- опір кола збудження повинен бути мінімально можливим;
- частота обертання якоря повинна відповідати номінальному значенню.

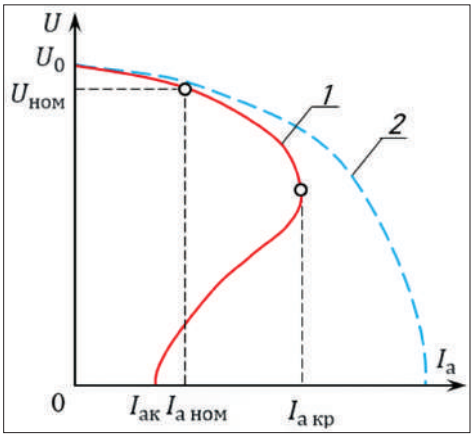
Оскільки генератор паралельного збудження здатний до самозбудження лише за одного напрямку обертання, його х.х.х. може бути отримана лише для одного квадранта координатної площини.

Навантажувальна та регулювальна характеристики генератора паралельного збудження за формою практично збігаються з аналогічними характеристиками генератора незалежного збудження [6].

Зовнішньою характеристикою ГПС паралельного збудження називається залежність:

$$U = f(I_а) \text{ при } R_{зб} = \text{const і } n = n_{ном} = \text{const}.$$

Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження (рис. 4.2, крива 1) є менш жорсткою порівняно з характеристикою генератора незалежного збудження. Це пояснюється тим, що в генераторі паралельного збудження, окрім чинників, притаманних генератору незалежного збудження – реакції якоря та падіння напруги в його колі – проявляється додатковий фактор: зменшення струму збудження, спричинене зниженням напруги внаслідок дії перших двох чинників.



1 – в режимі навантаження; 2 – при раптовому короткому замиканні

Рисунок 4.2 – Зовнішня характеристика ГПС паралельного збудження

Ця особливість також пояснює той факт, що під час поступового зменшення опору навантаження $R_{нав}$ струм якоря спочатку зростає лише до критичного значення $I_{а\,кр}$, а при подальшому зниженні $R_{нав}$ починає зменшуватися. У режимі короткого замикання струм навантаження набуває значення $I_а < I_{а\,кр}$ [4].

Це зумовлено тим, що зі збільшенням струму зростає розмагнічувальна дія якоря (посилюється реакція якоря та зменшується струм збудження), що переводить машину в ненасичений режим. У такому стані навіть незначне зменшення опору навантаження призводить до різкого зниження ЕРС генератора. Оскільки струм визначається співвідношенням $I_а < U / R_{нав}$, то при значеннях $I_а < I_{а\,кр}$, коли напруга зменшується повільніше, ніж опір навантаження, спостерігається зростання струму навантаження. Після досягнення критичного струму $I_а < I_{а\,кр}$ подальше зменшення $R_{нав}$ супроводжується зменшенням струму, оскільки в цьому діапазоні напруга U спадає швидше, ніж зменшується опір навантаження $R_{нав}$ [4].

Таким чином, коротке замикання, що виникає внаслідок поступового зменшення опору навантаження, не становить небезпеки для генератора паралельного збудження. Проте у випадку раптового короткого замикання магнітна система машини не встигає розмагнітитися, і струм різко зростає до небезпечних для генератора величин $I_{ак} = (8…12)I_{а\,ном}$ (рис. 4.2, крива 2). Таке імпульсне збільшення струму викликає значний гальмівний момент на валу генератора, а на колекторі спостерігається інтенсивне іскріння, яке може перейти у суцільний коловий вогонь. З огляду на це генератор необхідно забезпечувати відповідними засобами захисту від перевантаження та короткого замикання [5].

Регулювальна характеристика ГПС являє собою залежність:

$$I_{зб} = f(I_а) \text{ при } U = U_{ном} = \text{const і } n = n = \text{const}.$$

Загальний вигляд регулювальної характеристики ГПС паралельного збудження аналогічний як у ГПС незалежного збудження.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Схема електрична принципова випробування ГПС паралельного збудження подана на рисунку 4.3. Під час виконання лабораторної роботи слід змонтувати відповідну схему електричну принципову для випробувань ГПС та зафіксувати паспортні дані вимірювальних приладів і електричних машин, що застосовуються в досліді: досліджуваного генератора (М1) і приводного двигуна (М2).

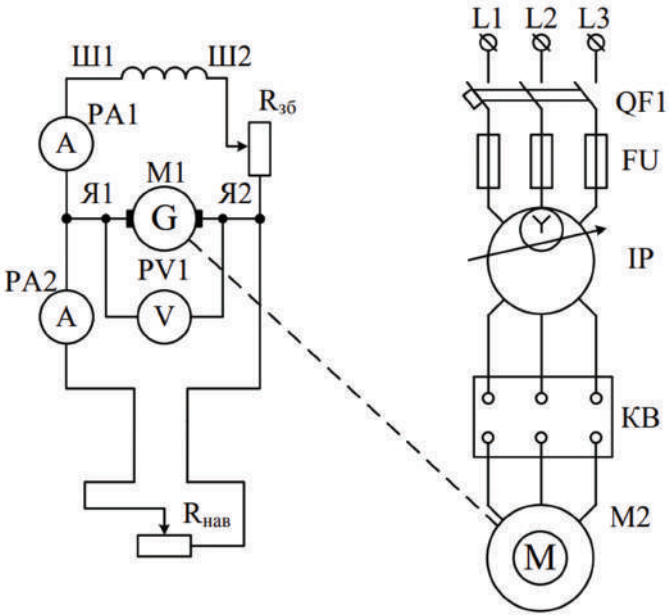


Рисунок 4.3 – Схема електрична принципова дослідження ГПС паралельного збудження

Після монтажу схеми електричної принципової необхідно пересвідчитись у факті самозбудження генератора. Для чого увімкнути автоматичний вимикач *QF*1, подавши живлення на обмотку статора асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором М2, і встановити номінальну напругу живлення індукційним регулятором IP. Напруга живлення двигуна вимірюється вольтметром, який встановлений у комплекті вимірювальному КВ. У разі, якщо за правильно зібраної схеми, самозбудження не відбувається, що контролюється вольтметром PV1 (його покази близькі до нуля), слід застосувати відповідні заходи, спрямовані на забезпечення процесу збудження генератора. Наприклад, змінити підключення виводів паралельної обмотки збудження Ш1–Ш2 генератора, або змінити напрям обертання привідного двигуна М2, змінивши чергування фаз на статорі.

4.1 Методика отримання зовнішньої характеристики ГПС паралельного збудження

Дані для побудови зовнішньої характеристики отримують у такій послідовності. Спочатку експериментально визначають опір реостата кола збудження $R_{зб}$, за якого струм збудження генератора дорівнює номінальному значенню $I_{зб} = I_{зб\ ном}$. Струм збудження контролюється амперметром PA1. Для цього збуджений генератор навантажують за допомогою навантажувального реостата $R_{нав}$ до номінального струму $I_а = I_{а\ ном}$ (контролюється амперметром PA2) при номінальних напрузі (контролюється вольтметром PV1) та частоті обертання привідного двигуна (контролюється тахометром, на рис. 4.3 не показаний). Визначений таким чином опір реостата $R_{зб}$ упродовж усього досліду, залишається незмінним.

Після цього генератор навантажують до струму $I_а = 1{,}5I_{а\ ном}$, а потім, поступово зменшуючи навантаження до режиму х.х., проводять вимірювання струму (PA2) та напруги (PV1) через рівні інтервали струму навантаження. Загалом реєструють 8…10 точок зовнішньої характеристики. Отримані експериментальні дані заносять до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Експериментальні дані для побудови зовнішньої характеристики ГПС паралельного збудження $R_{зб}$ = const

U	B										
$I_а$	A										

4.2 Методика отримання регулювальної характеристики ГПС паралельного збудження

Дослід виконують за схемою електричною принциповою, наведеною на рисунку 4.3, у такій послідовності. У режимі х.х. на затискачах збудженого генератора встановлюють номінальну напругу $U = U_{ном}$ (контролюється вольтметром PV1), регулюючи струм збудження $I_{зб}$ реостатом $R_{зб}$, після чого фіксують показання вимірювальних приладів (PA1, PA2). Далі, підтримуючи напругу на затискачах генератора незмінною та рівною номінальному значенню, регулюючи струм збудження $I_{зб}$, поступово підвищують навантаження генератора

від режиму х.х. до струму $I_а = 1{,}2I_{а\,ном}$ Рекомендується реєструвати 8…10 точок характеристики. Отримані дані вимірювань вносять до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Експериментальні дані для побудови регулювальної характеристики ГПС паралельного збудження $U_{ном}$ = ____ В = const

$I_{зб}$	А										
$I_а$	А										

4.3 Обробка дослідних даних

За даними таблиць 4.1 і 4.2 необхідно побудувати зовнішню та регулювальну характеристики ГПС паралельного збудження. Також необхідно визначити при номінальному навантаженні генератора паралельного збудження:

– зміну напруги на виході:

$$\Delta U_{ном\%} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_0} 100\ \%; \qquad (4.1)$$

– зміну струму збудження:

$$\Delta I_{зб.ном\%} = \frac{I_{зб.ном} - I_{зб.0}}{I_{зб.0}} 100\%, \qquad (4.2)$$

де $I_{зб.0}$ – струм збудження в режимі х.х. при $U_0 = U_{ном}$;

$I_{зб.ном}$ – струм збудження при номінальному навантаженні генератора $U_0 = U_{ном}$ і $I_а = I_{а\,ном}$.

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову випробування ГПС паралельного збудження.

2. Технічні характеристики вимірювальних приладів та електричних машин, які використовуються в досліді (ГПС, що досліджується, і приводного двигуна).

3. Данні дослідів зведені до таблиць 4.1–4.2.

4. Побудовані в масштабі зовнішня та регулювальна характеристики ГПС паралельного збудження.

5. Результати розрахунків значень $\Delta U_{\text{ном}\%}$ і $\Delta I_{\text{зб.ном}\%}$.

6. Аналіз отриманих результатів з зазначенням основних властивостей ГПС паралельного збудження.

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як класифікуються ГПС за способом збудження?

2. Наведіть принципові електричні схеми ГПС паралельного збудження.

3. Які умови потрібно виконати для забезпечення самозбудження ГПС паралельного збудження?

4. Поясніть процес самозбудження ГПС паралельного збудження.

5. Поясніть методику перевірки факту самозбудження ГПС паралельного збудження.

6. Що називається зовнішньою характеристикою ГПС?

7. Який вигляд мають зовнішні характеристики ГПС паралельного збудження?

8. Які причини зниження напруги на затискачах ГПС паралельного збудження з ростом навантаження?

9. У чому сутність методики визначення дослідним шляхом номінального струму збудження ГПС?

10. У чому сутність методики отримання зовнішніх характеристик ГПС паралельного збудження?

11. Як визначити зміну напруги ГПС паралельного збудження при номінальному навантаженні і яке приблизне її значення?

12. Що називається регулювальною характеристикою ГПС?

13. Який вигляд має регулювальна характеристика ГПС паралельного збудження?

14. У чому сутність методики отримання регулювальних характеристик ГПС паралельного збудження?

15. Як визначити зміну струму збудження ГПС паралельного збудження при номінальному навантаженні і яке приблизне її значення?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи

Набуття практичних навичок з монтажу схеми електричної принципової підключення ГПС змішаного збудження та експериментального отримання його зовнішньої і регулювальної характеристик.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 120–121; 3, с. 73–74; 4, с. 80–81; 6, с. 405–406] ознайомитися з теоретичним матеріалом за темою 2 «Генератори постійного струму», що охоплює питання будови, принципу самозбудження, схеми включення, статичних характеристик та властивостей у сталих режимах роботи ГПС змішаного збудження.

2. Виконати тести з теми 2 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблиці для реєстрації, оброблення та графічного подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з методикою експериментального отримання зовнішніх і регулювальних характеристик генератора змішаного збудження.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для випробування генератора змішаного збудження. Записати паспортні дані генератора та приводного двигуна. Визначити номінальний струм генератора.

4. Змонтувати схему електричну принципову для випробування генератора змішаного збудження та виконати перевірку узгодженості підключення його обмоток збудження.

5. Експериментально отримати зовнішню та регулювальну характеристики генератора змішаного збудження.

6. Побудувати за отриманими дослідними даними зовнішню та регулювальну характеристики генератора.

7. Виконати аналіз отриманих характеристик, пояснити їх форму та оцінити властивості генератора змішаного збудження.

8. За експериментальними даними зовнішньої характеристики визначити величину зміни напруги при номінальному навантаженні генератора змішаного збудження.

9. За експериментальними даними регулювальної характеристики визначити величину зміни струму збудження при номінальному навантаженні генератора змішаного збудження.

10 Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

11 Виконати тести до лабораторної роботи № 5 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

ГПС змішаного збудження оснащений двома обмотками збудження: основною (паралельною) та допоміжною (послідовною). МРС послідовної обмотки зазвичай становить близько 10…15 % від МРС паралельної обмотки збудження [4].

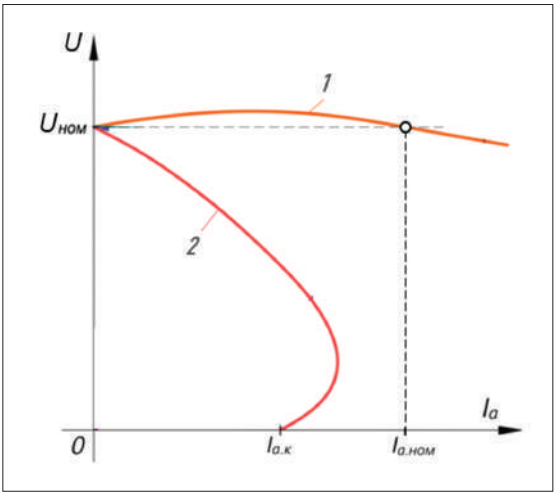
Зовнішня характеристика – залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження $I_а$:

$$U = f(I_а) \text{ при } I_{зб} = \text{ const і } n = \text{const}.$$

Вид зовнішніх характеристик ГПС визначається типом його збудження. У генераторі змішаного збудження одночасно функціонують дві обмотки збудження – паралельна та послідовна, які можуть бути з'єднані узгоджено або зустрічно. У разі ***узгодженого*** з'єднання магнітні потоки обох обмоток спрямовані в один бік [5].

У режимі х.х. в роботу вступає лише паралельна обмотка збудження, оскільки струм якоря практично дорівнює нулю ($I_а \approx 0$). Із появою навантаження виникає магнітний потік послідовної обмотки, який частково компенсує розмагнічувальний вплив реакції якоря та падіння напруги в його колі. Це забезпечує майже незмінну напругу U на виході генератора у широкому діапазоні навантажень (рис. 5.1, крива 1) [5].

Раціональним вибором параметрів паралельної та послідовної обмоток збудження можна досягти практично сталої вихідної напруги генератора при зміні струму якоря (рис. 5.1, крива 1). Така властивість є суттєвою перевагою генераторів змішаного збудження. Саме тому генератори з узгодженим змішаним збудженням застосовують для живлення силових навантажень у випадках, коли необхідно забезпечити стабільність напруги [5].



1 – при узгодженому з'єднанні обмоток; 2 – при зустрічному з'єднанні обмоток

Рисунок 5.1 – Зовнішні характеристики ГПС зі змішаним збудженням

За ***зустрічного*** з'єднання паралельної та послідовної обмоток збудження їхні магнітні потоки спрямовані у протилежні боки. Унаслідок цього зі збільшенням струму якоря I_a вихідна напруга U зменшується значно більш інтенсивніше (рис. 5.1, крива 2). Таке зустрічне з'єднання застосовується переважно в ГПС спеціального призначення – зварювальних агрегатах, прожекторних установках та інших пристроях, де необхідно отримати різко спадну зовнішню характеристику й водночас обмежити струм короткого замикання $I_{ак}$ [6].

Регулювальна характеристика – залежність струму збудження $I_{зб}$ від струму навантаження I_a при незмінній напрузі U_a на виході генератора:

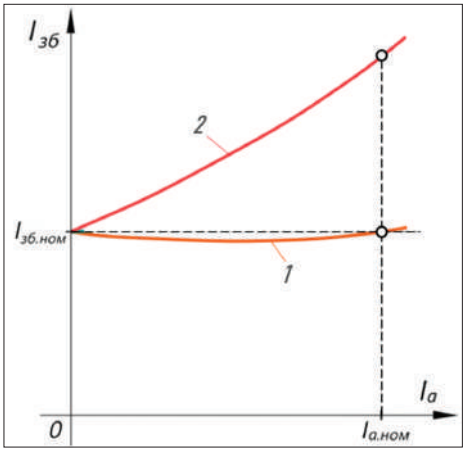
$$I_{зб} = f(I_a) \text{ при } U = \text{ const і } n = \text{const.}$$

Регулювальна характеристика відображає залежність між струмом збудження та навантаженням генератора і демонструє, яким чином необхідно змінювати струм збудження для забезпечення сталої вихідної напруги за змінних режимів роботи.

Аналогічно до зовнішніх характеристик, форма регулювальної характеристики істотно визначається способом збудження генератора [5].

При ***узгодженому*** підключенні паралельної та послідовної обмоток збудження вихідна напруга U генератора залишається практично сталою зі зростанням навантаження. У цьому випадку потреба в додатковому регулюванні струму збудження є мінімальною (рис. 5.2, крива 1).

За ***зустрічного*** підключення обмоток спостерігається інтенсивне зниження напруги U зі збільшенням струму якоря I_a. Тому для підтримання незмінної напруги $U =$ const необхідно значно підвищувати струм збудження $I_{зб}$ (рис. 5.2, крива 2).



1 – при узгодженому з'єднанні обмоток;
2 – при зустрічному з'єднанні обмоток

Рисунок 5.2 – Регулювальні характеристики ГПС зі змішаним збудженням

Глибина регулювання струму збудження визначається намагнічувальною дією послідовної обмотки при узгодженому вмиканні або її розмагнічувальною дією при зустрічному вмиканні [6].

Струм короткого замикання генератора змішаного збудження при ***узгодженому*** підключенні послідовної обмотки є надзвичайно великим. Тому виконання ***досліду короткого замикання*** допускається лише за умови живлення паралельної обмотки збудження від зовнішнього джерела та за ***зустрічного*** вмикання послідовної обмотки збудження [6].

Навантажувальні характеристики генератора змішаного збудження за формою подібні до характеристик генераторів паралельного або незалежного збудження, проте можуть розташовуватися вище кривої х.х. Це пояснюється дією послідовної обмотки збудження, яка впливає на роботу генератора під навантаженням [8].

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

4.1 Пуск ГПС змішаного збудження

Схема електрична принципова випробування ГПС змішаного збудження подана на рисунку 5.3. Під час виконання лабораторної роботи слід змонтувати схему електричну принципову для випробувань ГПС та зафіксувати паспортні дані вимірювальних приладів і електричних машин, що застосовуються в досліді: досліджуваного генератора (М1) і приводного двигуна (М2).

Після монтажу схеми електричної принципової необхідно пересвідчитись у факті самозбудження генератора і перевірити правильність узгодження вмикання паралельної та послідовної обмоток збудження. Перед пуском генератора в роботу, регулювальний реостат $R_{зб}$ в колі паралельної обмотки збудження встановлюється у виведене положення, тобто його опір дорівнює нулю, а навантажувальний реостат $R_{нав}$ в колі якоря генератора – у положення максимального опору, щоб забезпечити пуск генератора на х.х. Потім увімкнути автоматичний вимикач *QF*1, подавши живлення на обмотку статора асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором М2, і встановити номінальну напругу живлення індукційним регулятором ІР. Напруга живлення двигуна вимірюється вольтметром, який встановлений у комплекті вимірювальному КВ, при цьому генератор буде обертатися з номінальною частотою (контролюється тахометром).

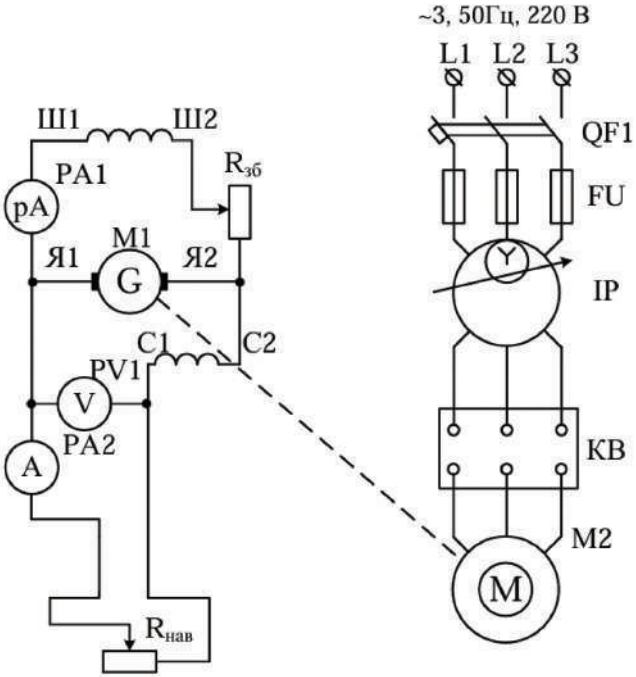


Рисунок 5.3 – Схема електрична принципова дослідження ГПС змішаного збудження

При проведені досліджень частота обертання генератора підтримується незмінною (n = const). У разі, якщо за правильно зібраної схеми, самозбудження не відбувається, що контролюється вольтметром PV1 (його покази близькі до нуля), слід застосувати відповідні заходи, спрямовані на забезпечення процесу самозбудження генератора. Наприклад, змінити напрям обертання приводного двигуна M2, змінивши чергування фаз на статорі.

Після забезпечення самозбудження генератора перевіряють узгодженість включення обмоток збудження. За допомогою навантажувального реостата $R_{нав}$ створюють певне значення струму навантаження $I_а$ (контролюється амперметром PA2), наприклад $I_а = 0{,}5I_{а\,ном}$, і вимірюють напругу U на затискачах генератора (контролюється вольтметром PV1). Потім приводний двигун зупиняють і виконують

перемикання проводів, що під'єднані до виводів послідовної обмотки збудження С1-С2. Далі генератор знову запускають, за допомогою навантажувального реостата $R_{нав}$, встановлюють значення струму навантаження $I_а = 0{,}5I_{а\,ном}$ при тій самій величині опору $R_{зб}$, після чого повторно вимірюють напругу U. Узгоджене вмикання обмоток збудження відповідає тому варіанту їх підключення, за якого напруга U на затискачах генератора набуває максимального значення.

4.2 Методика отримання зовнішньої характеристики ГПС змішаного збудження

Дані для побудови зовнішньої характеристики отримують за схемою електричною принциповою, наведеною на рисунку 5.3, у такій послідовності.

Експериментально визначається опір у колі збудження $R_{зб}$, за якого струм збудження генератора дорівнює номінальному значенню $I_{зб} = I_{зб\,ном}$. Для цього збуджений генератор навантажують за допомогою навантажувального реостата $R_{нав}$ до номінального струму якоря $I_а = I_{а\,ном}$ (контролюється амперметром PA2) за номінальної напруги $U_{ном}$ (контролюється вольтметром PV1) і номінальної частоти обертання приводного двигуна, яка підтримується незмінною у продовж всього досліду. Визначений при цьому опір $R_{зб}$ зберігається незмінним протягом усього досліду з дослідження зовнішньої характеристики.

Далі генератор навантажують до струму $I_а = 1{,}5I_{а\,ном}$, після чого, поступово зменшуючи навантаження до режиму х.х., виконують вимірювання струму та напруги через рівні інтервали струму навантаження. Загалом фіксується 8…10 точок зовнішньої характеристики. Отримані експериментальні дані заносять до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Експериментальні дані для побудови зовнішньої характеристики ГПС змішаного збудження ($R_{зб}$ = const)

U, В										
$I_а$, А										

4.3 Методика отримання регулювальної характеристики ГПС змішаного збудження

Дослідження виконується за схемою електричною принциповою, поданою на рисунку 5.3. У режимі х.х. на затискачах збудженого генератора встановлюють номінальну напругу $U_0 = U_{ном}$, регулюючи струм збудження $I_{зб}$ реостатом $R_{зб}$ в колі паралельної обмотки збудження, після чого фіксують показання вимірювальних приладів: амперметрів PA1 і PA2 та вольтметру PV1. Далі, підтримуючи напругу на виході генератора незмінною та рівною номінальній ($U = U_{ном}$), регулюючи струм збудження $I_{зб}$ регулювальним реостатом $R_{зб}$, поступово збільшують навантаження генератора від х.х. до струму $I_а = 1{,}2I_{а\,ном}$. При проведені дослідження частота обертання генератора підтримується незмінною і номінальною ($n = n_{ном} = \text{const}$). Рекомендується реєструвати 8…10 точок характеристики. Отримані експериментальні дані заносять до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Експериментальні дані для побудови регулювальної характеристики ГПС змішаного збудження

$I_{зб}$, А										
$I_а$, А										

4.4 Обробка дослідних даних

За даними таблиць 5.1 і 5.2 необхідно побудувати зовнішню та регулювальну характеристики ГПС змішаного збудження. Також необхідно визначити при номінальному навантаженні генератора змішаного збудження:

– зміну напруги на виході генератора, %:

$$\Delta U_{ном\%} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_0} 100\ \%; \qquad (5.1)$$

– зміну струму збудження, %:

$$\Delta I_{зб.ном\%} = \frac{I_{зб.ном} - I_{зб.0}}{I_{зб.0}} 100\ \%, \qquad (5.2)$$

де $I_{зб.0}$ – струм збудження в режимі х.х. при $U_0 = U_{ном}$;

$I_{зб.ном}$ – струм збудження при номінальному навантаженні генератора $U = U_{ном}$ і $I_а = I_{а\,ном}$.

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову дослідження ГПС змішаного збудження.
2. Технічні характеристики ГПС та приладів, що використовувалися в дослідах.
3. Данні дослідів, що зведені до таблиць 5.1–5.2.
4. Побудовані в масштабі зовнішню та регулювальну характеристики ГПС змішаного збудження.
5. Розрахунок значень зміни напруги $\Delta U_{\%}$ та струму збудження $\Delta I_{зб\%}$.
6. Аналіз отриманих результатів з зазначенням основних властивостей ГПС змішаного збудження.

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які типи ГПС за способом збудження існують?
2. Які умови потрібно виконати для забезпечення самозбудження ГПС змішаного збудження?
3. Яке призначення має послідовна обмотка збудження в ГПС змішаного збудження?
4. Що називається зовнішньою характеристикою ГПС і який вигляд вона має у ГПС змішаного збудження?
5. Які причини зниження напруги на затискачах ГПС змішаного збудження із ростом навантаження?
6. У чому полягає сутність методики перевірки узгодженості включення обмоток збудження ГПС змішаного збудження?
7. Що відбудеться з вихідною напругою генератора, якщо паралельна і послідовна обмотки опиняться при роботі включеними зустрічно?
8. Поясніть методику отримання зовнішніх характеристик ГПС змішаного збудження.
9. У чому сутність методики визначення дослідним шляхом величини номінального струму збудження ГПС?
10. Як розрахувати значення зміни напруги $\Delta U_{ном\%}$ при номінальному навантаженні при знятті зовнішніх характеристик?
11. Що називається регулювальною характеристикою ГПС і який вигляд вона має у ГПС змішаного збудження?

12. Поясніть методику отримання регулювальних характеристик ГПС змішаного збудження.

13. Як розрахувати значення зміни струму збудження $\Delta I_{\text{зб ном\%}}$ при номінальному навантаженні при знятті регулювальних характеристик?

14. Які умови при проведенні досліду к.з. ГПС змішаного збудження потрібно виконувати?

15. Який вигляд має принципова електрична схема ГПС змішаного збудження?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи

Набуття практичних навичок з монтажу схеми електричної принципової підключення двигунів постійного струму (ДПС) паралельного збудження та експериментального отримання його робочих і регулювальних характеристик.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 122–143; 3, с. 92–102; 4, с. 82–95; 5, с. 41–62; 6, с. 406–437] ознайомитися з теоретичним матеріалом за темою 3 «Двигуни постійного струму», що охоплює питання будови, принципу самозбудження, схеми електричної принципової підключення, статичних характеристик та властивостей у сталих режимах роботи ДПС паралельного збудження.

2. Виконати тести з теми 3 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблиці для реєстрації, оброблення та графічного подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з методикою експериментального отримання робочих і регулювальних характеристик ДПС паралельного збудження.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для випробувань ДПС. Записати паспортні дані ДПС та визначити номінальні струми двигуна і навантажувального генератора.

4. Змонтувати схему електричну принципову для випробування ДПС паралельного збудження.

5. Зняти експериментальні дані, необхідні для побудови робочих характеристик ДПС паралельного збудження.

6. Зняти експериментальні дані для побудови регулювальних характеристик ДПС паралельного збудження.

7. Виконати розрахунок величин, потрібних для побудови робочих характеристик.

8. Побудувати робочі характеристики ДПС паралельного збудження.

9. Побудувати регулювальні характеристики ДПС паралельного збудження.

10. Виконати аналіз отриманих характеристик, пояснити їх форму та оцінити властивості ДПС паралельного збудження.

11. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

12. Виконати тести до лабораторної роботи № 6 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Експлуатаційні якості ДПС визначаються його ***робочими характеристиками***, *під якими розуміють залежність частоти обертання n (швидкісна характеристика), струму в обмотці якоря* I_a, *споживаної з мережі потужності* P_1, *корисного моменту на валу* M_2, *обертового моменту* M_{EM}, *ККД* η *від потужності на валу двигуна* P_2:

$$I_a,\ P_1,\ n,\ M_2,\ M_{EM},\ \eta = \eta\ f(P_2) \text{ при } U = \text{const та } I_{зб} = \text{const}.$$

Робочі характеристики ДПС з паралельним збудженням (рис. 6.1) є майже тотожними характеристикам двигуна з незалежним збудженням, оскільки в обох випадках струм збудження $I_{зб}$ практично не змінюється зі зміною струму якоря I_a. Нижче подано пояснення особливостей формування робочих характеристик [3].

1. Залежність $n = f(P_2)$. Згідно рівнянню електромеханічної характеристики двигуна:

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_E \Phi}, \qquad (6.1)$$

де U – напруга живлення ДПС;

I_a – струм в обмотці якоря;

ΣR – сумарний опір кола якоря;

c_E – постійна ЕРС для даного двигуна;

Ф – результуючий магнітний потік в двигуні в режимі навантаження, виходить, що на величину частоти обертання n будуть впливати два фактори: падіння напруги в колі якоря $I_a\Sigma R$ і реакція якоря, яка змінюватиме магнітне поле двигуна [6].

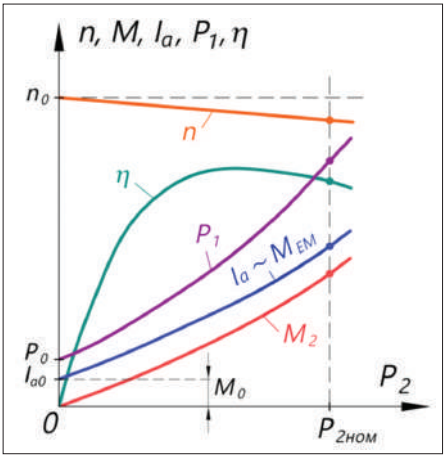


Рисунок 6.1 – Робочі характеристики ДПС з паралельним збудженням

При відсутності навантаження на валу двигуна, він працює в режимі х.х. і частота обертання якоря становить n_0 (рис. 6.1). При збільшені навантаження на валу (P_2), частота обертання якоря n зменшується за рахунок збільшення падіння напруги в колі якоря $I_a\Sigma R$ і реакції якоря, так як зростає струм якоря I_a.

2. Залежність $M_2 = f(P_2)$. Корисний момент на валу двигуна визначається за формулою:

$$M_2 = 9{,}55\frac{P_2}{n}. \tag{6.2}$$

Оскільки при зростанні P_2 частота обертання дещо знижується n, то M_2 зростатиме трохи швидше ніж за законом прямої лінії [6].

3. Залежність $M_{\text{ЕМ}} = f(P_2)$. Обертовий (електромагнітний) момент дорівнює:

$$M_{\text{ЕМ}} = M_0 + M_2, \tag{6.3}$$

де M_0 – момент х.х. ДПС (рис. 6.1), який дорівнює:

$$M_0 = 9{,}55\frac{P_0}{n_0}, \tag{6.4}$$

де P_0 – потужність х.х. ДПС (рис. 6.1).

Як видно з рівняння (6.4) при зміні навантаження (P_2), момент х.х. M_0 залишається незмінним, тому характеристики $M_2 = f(P_2)$ і $M_{\text{ЕМ}} = f(P_2)$ паралельні і відрізняються на величину моменту х.х. M_0.

4. Характеристика $I_{\text{а}} = f(P_2)$ визначатиметься виглядом характеристики $M_{\text{ЕМ}} = f(P_2)$, оскільки $M_{\text{ЕМ}} = c_M I_{\text{а}} \Phi$ (де c_M – постійна моменту ДПС). В свою чергу $M_{\text{ЕМ}} \approx M_2$ (в усталеному режимі, відмінність тільки на невелику постійну величину моменту х.х.) [6]. В режимі х.х. ($P_2 = 0$), в обмотці якоря протікає струм $I_{\text{а}0}$ (рис. 6.1).

5. Залежність $P_1 = f(P_2)$. Вхідна потужність визначається як $P_1 = P_2 = \Sigma p$ (де Σp – сумарні втрати в ДПС). В свою чергу сумарні втрати Σp включають в себе як постійні і відносно невеликі втрати на збудження $p_{\text{зб}}$, і втрати х.х. P_0, так і змінні Джоулеві втрати в колі якоря $p_{\text{е а}} = I_{\text{а}}^2 R_{\text{а}}$, які пропорційні I_a^2. Тому P_1 буде зростати швидше ніж за законом прямої лінії і швидше чим струм в обмотці якоря $I_{\text{а}}$ [6]. В режимі х.х. ($P_2 = 0$), двигун споживає потужність х.х. P_0 (рис. 6.1).

6. Залежність $\eta = f(P_2)$ має типовий для електричних машин вигляд. Коли в машині постійні втрати х.х. P_0 більші за змінні (електричні) $P_{\text{к}}$, то графік ККД при збільшені навантаження P_2 на валу машини, зростає. Коли вони стають рівними, тобто $P_0 = P_{\text{к}}$, то ККД машини – максимальне і при $P_0 < P_{\text{к}}$, ККД машини знижується. Оскільки значну частину експлуатаційного часу двигуни працюють із потужністю, меншою за номінальну, то зазвичай їх проектують так, що максимум ККД має місце при $P_2 = (0{,}6 \ldots 0{,}7) P_{2\,\text{ном}}$.

Регулювальні характеристики ДПС – це характеристики отримані при зміні струму збудження $I_{\text{зб}}$ або напруги живлення U, або опору регулювального реостату в колі якоря $P_{\text{п.р}}$.

Регулювальна характеристика *ДПС при зміні струму збудження або потоку збудження визначається залежністю:*

$$n = f(I_{\text{зб}}) \text{ при } M_2 = \text{const та } U = U_{\text{ном}} = \text{const}. \qquad (6.5)$$

На рисунку 6.2 приведені регулювальні характеристики ДПС з паралельним збудженням при регулюванні частоти обертання якоря зміною магнітного потоку збудження $\Phi_{\text{зб}}$ (струму збудження $I_{\text{зб}}$). Регулювання частоти обертання валу двигуна за рахунок зміни струму в обмотці збудження $I_{\text{зб}}$ тобто зміною магнітного потоку збудження $\Phi_{\text{зб}}$ – це простий і економічний спосіб, тому широко застосовується на практиці [5].

Зі зменшенням магнітного потоку $\Phi_{зб}$ частота обертання n зростатиме за гіперболічним законом. Вигляд регулювальних характеристик $n = f(\Phi_{зб})$ залежить від значення моменту навантаження M_2 на валу двигуна (рис. 6.2): зі зростанням M_2 максимальна частота обертання n_{max} зменшуватиметься [5]. Даним способом можна здійснювати регулювання частоти обертання в діапазоні:

$$\frac{n_{max}}{n_{min}} = 2\ldots5.$$

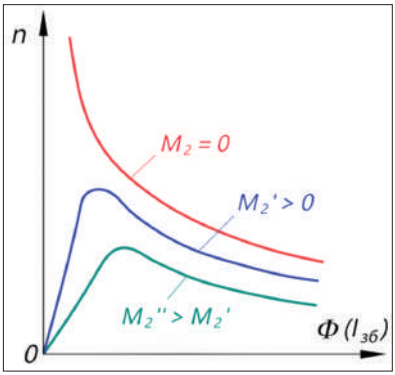


Рисунок 6.2 – Регулювальні характеристики ДПС з паралельним збудженням при зміні магнітного потоку збудження

Нижню межу n_{min} обмежує насичення магнітного кола ДПС, яке не дозволяє значно збільшувати магнітний потік $\Phi_{зб}$. Верхня межа n_{max} визначається умовами механічної міцності двигуна. Так, у випадку незначного або взагалі відсутнього навантаження на валу ($M_2 = 0$) та при сильному зменшенні $\Phi_{зб}$ максимальна частота обертання n_{max} може в багато разів перевищити номінальне значення $n_{ном}$, тобто двигун «піде в рознос» [6].

Регулювальна характеристика *ДПС при введені додаткового опору в коло обмотки якоря визначається залежністю:*

$$n = f(R_{дод}) \text{ при } M_2 = \text{const та } I_{зб} = \text{const}. \qquad (6.6)$$

Додатковий реостат включають в коло якоря аналогічно пусковому реостату, який повинен бути розрахований на тривале протікання

струму. При включенні додаткового опору формула для частоти обертання набуде вигляду:

$$n = \frac{U - I_{\text{а}}\left(\sum R + R_{\text{дод}}\right)}{c_E \Phi} = n_0 - \Delta n, \qquad (6.7)$$

де $R_{\text{дод}}$ – опір додаткового реостата, який вводиться в коло якоря;

$n_0 = U / (c_E \Phi)$ – частота обертання якоря в режимі х.х.;

$\Delta n = I_{\text{а}}\left(\Sigma R + R_{\text{дод}}\right) / (c_E \Phi)$ – зміна частоти обертання якоря, викликана спаданням напруги в колі якоря.

Зі збільшенням $R_{\text{дод}}$ зростає Δn, що призводить до зменшення частоти обертання. Залежність $n = f(R_{\text{дод}})$ ілюструється також і механічними характеристиками двигуна паралельного збудження: з підвищенням $R_{\text{дод}}$ збільшується нахил механічних характеристик, а частота обертання при заданому навантаженні M_2 на валу зменшується.

Цей спосіб забезпечує *плавне регулювання частоти обертання*, проте в нього є і *недоліки*:

• регулювання можливе тільки в бік зменшення частоти від номінального значення;

• значні втрати електроенергії в додатковому реостаті $I_a^2 R_{дод}$.

Регулювальна характеристика *ДПС при зміні напруги на затискачах якоря визначається залежністю:*

$$n = f(U_{\text{а}}) \text{ при } M_2 = \text{const та } I_{\text{зб}} = \text{const}. \qquad (6.8)$$

В цьому випадку частота обертання якоря n змінюватиметься пропорційно зміні напруги $U_{\text{а}}$ (рис. 6.3), але початкова точка характеристики $n = f(U_{\text{а}})$ зміщена відносно початку координат на величину напруги зрушення $U_{\text{а1}}$, де $U_{\text{а1}} = I_{\text{а}} \cdot \Sigma R$. Даний спосіб, зазвичай використовують коли потрібно знизити частоту обертання. Для технічної реалізації зазначеного методу потрібне джерело постійного струму з регульованою напругою.

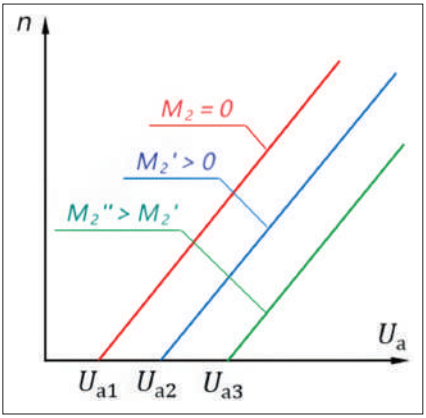


Рисунок 6.3 – Регулювальні характеристики ДПС з паралельним збудженням при зміні напруги на якорі

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Схема електрична принципова випробування ДПС паралельного збудження подана на рисунку 6.4. Під час виконання лабораторної роботи слід змонтувати схему електричну принципову та зафіксувати паспортні дані вимірювальних приладів і електричних машин, що застосовуються в досліді: навантажувального генератора (М1) і досліджуваного двигуна (М2).

4.1 Пуск ДПС паралельного збудження

Пуск ДПС паралельного збудження виконується за схемою електричною принциповою, наведеною на рисунку 6.4, із застосуванням пускового реостата (опору) $R_{п.р}$. На момент пуску цей реостат має бути повністю введений у коло якоря з метою обмеження пускового струму. Водночас реостат у колі обмотки збудження повинен бути повністю виведений, що забезпечує запуск двигуна за максимального магнітного потоку. У процесі розгону двигуна ЕРС якоря зростає, струм якоря зменшується, і пусковий реостат $R_{п.р}$ поступово повністю виводиться.

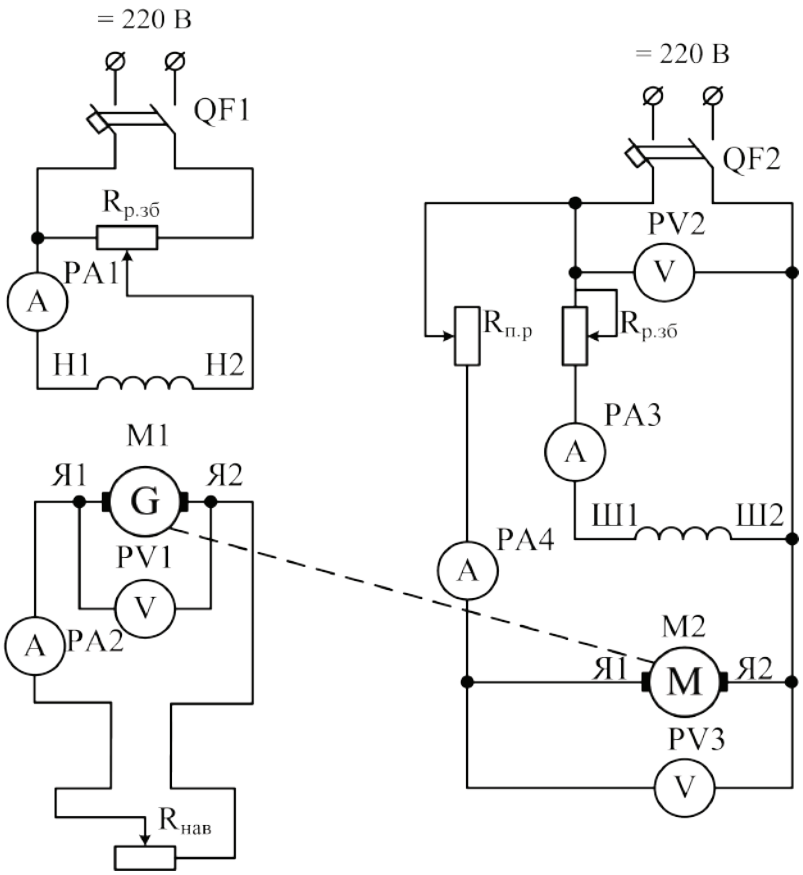


Рисунок 6.4 – Схема електрична принципова дослідження ДПС паралельного збудження

4.2 Методика отримання робочих характеристик ДПС паралельного збудження дослідним шляхом

Для отримання робочих характеристик ДПС паралельного збудження використовується принципова електрична схема, подана на рисунку 6.4. У цьому досліді навантаженням на валу ДПС слугує ГПС незалежного збудження.

Експеримент виконується у такій послідовності. Спочатку здійснюється пуск двигуна, після чого його навантажують за допомогою

навантажувального генератора до величини номінального навантаження. За цих умов струм якоря двигуна має відповідати номінальному значенню при номінальній напрузі живлення на затискачах двигуна та номінальній частоті обертання.

Значення струму збудження $I_{зб}$ двигуна, за якого забезпечується номінальний режим роботи, встановлюють за допомогою регулювального реостату $R_{р.\,зб}$ і підтримують незмінним протягом усього експерименту. Далі, утримуючи напругу на затискачах двигуна незмінною та рівною номінальному значенню, навантаження на валу змінюють за допомогою навантажувального генератора таким чином, щоб струм якоря перебував у діапазоні від $I_{зб} = I_{а0}$ до $I_а = 1{,}2I_{ном}$. У процесі дослідження реєструють 5…6 експериментальних точок. Отримані дані заносять до таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Експериментальні і розрахункові дані для отримання робочих характеристик ДПС паралельного збудження

Дані досліду						**Дані розрахунку**						
$U_а$	$I_а$	$I_{зб}$	n	$U_г$	$I_г$	$\eta_г$	$P_г$	$P_{1д}$	$P_{2д}$	$\eta_д$	$M_{ЕМ}$	ω
В	**А**	**А**	**об/хв**	**В**	**А**	**%**	**Вт**	**Вт**	**Вт**	**%**	**Н·м**	**рад/с**

Данні розрахунку в таблиці 6.1 визначаються за наступними рівняннями [7].

Потужність навантажувального ГПС:

$$P_г = U_г \cdot I_г, \tag{6.9}$$

де $U_г$ – напруга на затискачах обмотки якоря генератора, В;

$I_г$ – струм якоря генератора, А.

Потужність, що споживається ДПС з мережі постійного струму:

$$P_{1д} = U_а \cdot I_а = U_а\,(I_а + I_{зб}), \tag{6.10}$$

де $U_а$ – напруга на затискачах обмотки якоря ДПС, В;

$I_а$ – струм якоря ДПС, А;

$I_{зб}$ – струм збудження ДПС, А.

Потужність на виході ДПС, що віддається навантажувальному ГПС:

$$P_2 = \frac{P_г}{\eta_г}, \tag{6.11}$$

де $\eta_г$ – ККД навантажувального ГПС, в.о., визначається за графіком, представленим на рисунку 6.5.

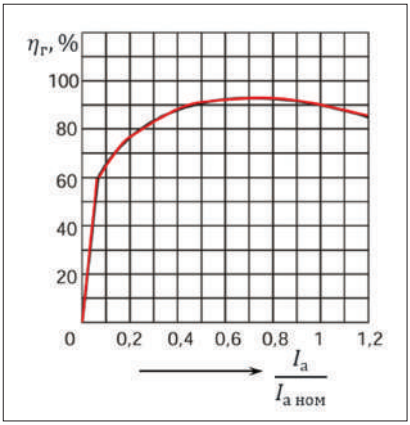


Рисунок 6.5 – Графік ККД навантажувального ГПС

Корисний момент на валу ДПС:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}, \tag{6.12}$$

де ω – кутова швидкість обертання якоря ДПС, рад/с.

Кутова швидкість обертання якоря ДПС:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \tag{6.13}$$

де n – частота обертання якоря ДПС, об/хв.

Момент холостого ходу ДПС:

$$M_0 = \frac{U_a \cdot I_{a0}}{\omega_0}, \tag{6.14}$$

де I_{a0} – струм х.х. ДПС, А.

Електромагнітний (обертовий) момент $M_{ЕМ}$ ДПС визначається за виразом (6.3).

4.3 Методика отримання регулювальних характеристик ДПС паралельного збудження дослідним шляхом

4.3.1 Регулювальна характеристика при зміні струму збудження або потоку збудження визначається залежністю (6.5).

Дослід проводиться у такій послідовності. Після здійснення пуску двигуна за допомогою навантажувального генератора встановлюється струм якоря $I_а = 0{,}5I_{ном}$. За умови підтримання номінальної напруги на затискачах якоря двигуна М2 струм навантаження генератора М1 необхідно підтримувати незмінним протягом усього експерименту. Підтримуючи номінальну напругу на затискачах якоря, поступово зменшують струм збудження двигуна до моменту, коли частота його обертання досягне значення $(1{,}2…1{,}3)\, n_{ном}$. У ході досліду фіксується 5…6 точок. Отримані експериментальні дані заносяться до таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Експериментальні дані для побудови залежності $n = f(I_{зб})$

$U_а$	$I_а$	$I_{зб}$	n
В	**А**	**А**	**об/хв**

4.3.2 Регулювальна характеристика двигуна при зміні напруги на затискачах якоря двигуна визначається залежністю (6.8).

Зміна напруги на затискачах якоря ДПС здійснюється шляхом введення до кола якоря регулювального реостата $R_{п.р}$. Такий спосіб регулювання частоти обертання забезпечує можливість зниження швидкості двигуна порівняно з номінальною, однак є малоефективним через значні енергетичні втрати у реостаті $R_{п.р}$. Після пуску двигуна встановлюють струм збудження, що відповідає його номінальному режиму (див. табл. 6.1), і підтримують його незмінним упродовж усього досліду.

Навантаження двигуна М2 здійснюється за допомогою навантажувального генератора М1 при повністю введеному до кола якоря реостаті $R_{п.р}$ до досягнення струму $I_а = 0{,}5I_{ном}$. Отриманий при цьому струм

навантаження генератора підтримують незмінним протягом усього експерименту. Далі, використовуючи реостат $R_{п.р}$, поступово знижують напругу на затискачах якоря до моменту, коли швидкість обертання двигуна досягне значення $0{,}5n_{ном}$. У ході досліду фіксують 5…6 точок. Покази приладів заносяться до таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Експериментальні дані для побудови залежності $n = f(U_а)$

$U_а$	$I_а$	$I_{зб}$	n
В	**А**	**А**	**об/хв**

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову випробування ДПС паралельного збудження.
2. Технічні характеристики вимірювальних приладів та електричних машин, які використовуються в досліді (ДПС, що досліджується, і навантажувального ГПС).
3. Таблиці 6.1–6.3 з даними дослідів і розрахунків.
4. Побудовані в масштабі робочі характеристики ДПС паралельного збудження.
5. Побудовані в масштабі регулювальні характеристики ДПС паралельного збудження.
6. Аналіз отриманих результатів з зазначенням основних властивостей ДПС паралельного збудження.

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як класифікуються ДПС за способом збудження?
2. У чому полягає сутність принципу дії ДПС?
3. Поясніть, з якою метою вводять пусковий реостат в колі якоря?
4. Поясніть, з якою метою вводять регулювальний реостат в колі збудження двигуна?

5. Як виконується пуск в роботу ДПС паралельного збудження?

6. Поясніть, чому при пуску двигуна потрібно, щоб пусковий реостат був повністю введеним, а регулювальний в колі збудження – виведеним?

7. У чому полягає сутність методики експериментального отримання робочих характеристик ДПС?

8. Наведіть і поясніть вигляд робочих характеристик ДПС паралельного збудження.

9. Що називається регулювальною характеристикою ДПС паралельного збудження?

10. Якими способами і як регулюється швидкість обертання ДПС паралельного збудження?

11. У яких допустимих межах можливо регулювання швидкості обертання якоря ДПС при регулюванні її зміною струму збудження?

12. Чому заборонено приєднувати обмотку паралельного збудження після пускового реостата?

13. Що відбудеться, якщо при навантаженні на валу було розірвано коло обмотки паралельного збудження ДПС?

14. У чому є переваги і недоліки способу регулювання частоти обертання ДПС введенням додаткового опору в коло якоря?

15. У чому є переваги і недоліки способу регулювання частоти обертання ДПС зміною напруги на якорі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи

Набуття практичних навичок з монтажу схеми електричної принципової підключення ДПС змішаного збудження та експериментального отримання його робочих і регулювальних характеристик.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 141–143; 3, с. 92–102; 4, с. 90–92; 6, с. 420–423] ознайомитися з теоретичним матеріалом за темою 3 «Двигуни постійного струму», що охоплює питання будови, схеми електричної принципової підключення, статичних характеристик та властивостей у сталих режимах роботи ДПС змішаного збудження.

2. Виконати тести з теми 3 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблиці для реєстрації, оброблення та графічного подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з методикою експериментального отримання робочих і регулювальних характеристик ДПС змішаного збудження.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для випробувань ДПС. Записати паспортні дані ДПС та визначити номінальні струми двигуна і навантажувального генератора.

4. Змонтувати схему електричну принципову для випробування ДПС змішаного збудження.

5. Зняти експериментальні дані, необхідні для побудови робочих характеристик ДПС змішаного збудження.

6. Зняти експериментальні дані для побудови регулювальних характеристик ДПС змішаного збудження.

7. Виконати розрахунок величин, потрібних для побудови робочих характеристик.

8. Побудувати робочі характеристики ДПС змішаного збудження.

9. Побудувати регулювальні характеристики ДПС змішаного збудження.

10. Виконати аналіз отриманих характеристик, пояснити їх форму та оцінити властивості ДПС змішаного збудження.

11. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

12. Виконати тести до лабораторної роботи № 7 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

ДПС змішаного збудження оснащений двома обмотками збудження: паралельною та послідовною. Частота обертання такої машини визначається співвідношенням [2]:

$$n = \frac{U - I_{\text{a}} \Sigma R_{\text{a}}}{c_E \left(\Phi_1 \pm \Phi_2 \right)}, \tag{7.1}$$

де Φ_1 і Φ_2 – магнітні потоки паралельної і послідовної обмоток збудження.

Знак «плюс» у рівнянні відповідає узгодженому вмиканню обмоток збудження, за якого МРС обох обмоток додаються. У такому режимі зі зростанням навантаження загальний магнітний потік збільшується (за рахунок потоку послідовної обмотки Φ_2), що спричиняє зменшення частоти обертання двигуна [2].

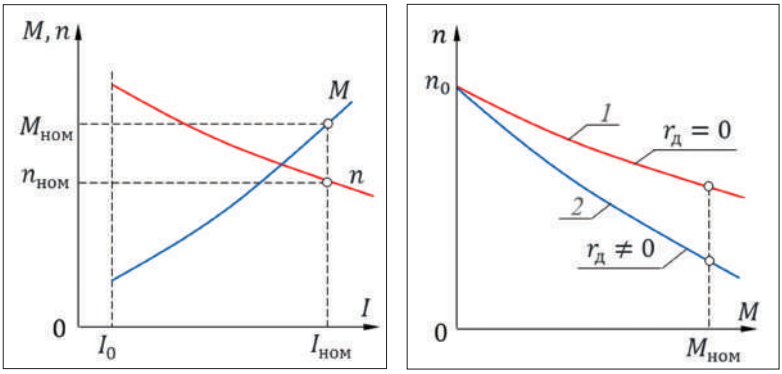
За зустрічного вмикання обмоток збудження потік Φ_2 зі збільшенням навантаження діє в розмагнічувальному напрямку (знак «мінус»), що, навпаки, призводить до підвищення частоти обертання. У цьому випадку робота двигуна набуває нестійкого характеру, оскільки частота обертання зростає без обмежень зі збільшенням навантаження. Разом з тим, якщо кількість витків послідовної обмотки є незначною, то її вплив на магнітний потік слабкий, і зі зростанням навантаження

частота обертання практично не змінюється, залишаючись майже постійною у всьому діапазоні навантажень [2].

Робочими характеристиками *ДПС називаються залежності частоти обертання n (швидкісна характеристика), струму в обмотці якоря $I_а$, споживаної з мережі потужності P_1 корисного моменту на валу M_2, обертового моменту $M_{ЕМ}$ ККД η від потужності на валу двигуна P_2* [9]:

$$I_а,\ P_1,\ n,\ M_2,\ M_{ЕМ},\ \eta = f(P_2) \text{ при } U = \text{const та } I_{зб} = \text{const}. \quad (7.2)$$

На рисунку 7.1 наведено робочі та механічні характеристики ДПС змішаного збудження за умови узгодженого вмикання його обмоток збудження. На відміну від характеристик двигунів послідовного збудження, ці криві мають більш пологий характер. Слід підкреслити, що за своєю формою характеристики двигуна змішаного збудження займають проміжне місце між аналогічними характеристиками двигунів паралельного та послідовного збудження. Це пояснюється тим, що їх вид визначається переважанням МРС тієї чи іншої обмотки збудження – паралельної або послідовної [10].



а) ***б)***

Рисунок 7.1 – Робочі (а) і механічні (б) характеристики ДПС змішаного збудження

ДПС змішаного збудження має низку переваг порівняно з двигунами послідовного збудження. Завдяки наявності паралельної обмотки збудження його магнітний потік $Ф_1$ обмежує

частоту обертання у режимі х.х., що запобігає небезпечному «розносу» машини. Частоту обертання такого двигуна можна регулювати за допомогою реостата, увімкненого в коло паралельної обмотки збудження [10].

Разом із тим, використання двох обмоток збудження підвищує конструктивну складність і вартість двигуна, що певною мірою звужує сферу його практичного застосування.

Двигуни змішаного збудження зазвичай використовують у випадках, коли необхідні значні пускові моменти, швидке нарощування частоти обертання під час розгону, стабільна робота та допустиме лише незначне зменшення швидкості при зростанні навантаження на вал. До таких систем належать прокатні стани, вантажопідіймальні механізми, насоси та компресори [9].

Переваги ДПС змішаного збудження [6]:

- ***універсальність***: поєднання властивостей паралельного та послідовного збудження робить двигун універсальним для різних застосувань;
- ***високий пусковий момент***: дозволяє запускати важкі навантаження;
- ***стабільність роботи***: краща стабільність швидкості обертання при зміні навантаження.

Недоліки ДПС змішаного збудження [6]:

- ***складність***: конструкція такого двигуна складніша, ніж у двигунів паралельного або послідовного збудження;
- ***більші габарити***: через наявність обох систем збудження, двигун може бути більшим за габаритами та вагою.

Із співвідношення (7.1) випливає, що частоту обертання двигуна n можна регулювати трьома основними способами [5]:

1) шляхом увімкнення додаткового реостата $R_{дод}$ у коло обмотки якоря;
2) зміною величини магнітного потоку Φ_1;
3) зміною величини напруги живлення якоря U.

Регулювальна характеристика *за зміни струму збудження $I_{зб}$ або магнітного потоку визначається співвідношенням:*

$$n = f(I_{зб}) \text{ при } U = U_{ном} = \text{const та } M_2 = \text{const}. \qquad (7.3)$$

Цей спосіб регулювання частоти обертання є найекономічнішим, проте він забезпечує зміну швидкості лише у бік значень, що перевищують номінальну [4].

Регулювальна характеристика *за умови введення додаткового реостата* $R_{\text{дод}}$ *у коло обмотки якоря визначається наступним співвідношенням:*

$$n = f(R_{\text{дод}}) \text{ при } I_{\text{зб}} = I_{\text{зб ном}} = \text{const та } M_2 = \text{const}. \qquad (7.4)$$

Застосування цього способу регулювання дозволяє зменшувати частоту обертання двигуна відносно номінального значення, однак він є малоефективним через значні втрати потужності в додатковому реостаті $R_{\text{дод}}$ [4].

Регулювальна характеристика *за зміни величини напруги живлення U визначається наступним співвідношенням:*

$$n = f(U) \text{ при } I_{\text{зб}} = I_{\text{зб ном}} = \text{const та } M_2 = \text{const}. \qquad (7.5)$$

Цей спосіб регулювання частоти обертання дає змогу знижувати швидкість двигуна відносно номінального значення. Він є енергоефективним, однак потребує використання дорогого джерела живлення з можливістю регулювання вихідної напруги постійного струму [4].

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Схема електрична принципова випробування ДПС паралельного збудження подана на рисунку 7.2. Під час виконання лабораторної роботи слід змонтувати схему електричну принципову та зафіксувати паспортні дані вимірювальних приладів і електричних машин, що застосовуються в досліді: навантажувального генератора (М1) і досліджуваного двигуна (М2).

4.1 Пуск ДПС змішаного збудження

Під час зняття характеристик обмотки збудження ДПС змішаного збудження мають бути ввімкнені ***узгоджено***, тому попередньо необхідно перевірити правильність їх з'єднання. З цією метою здійснюють пуск двигуна за довільною схемою вмикання обмоток збудження, після чого навантажують його за допомогою навантажувального генератора до певного струму якоря, меншого за номінальний, і вимірюють частоту обертання.

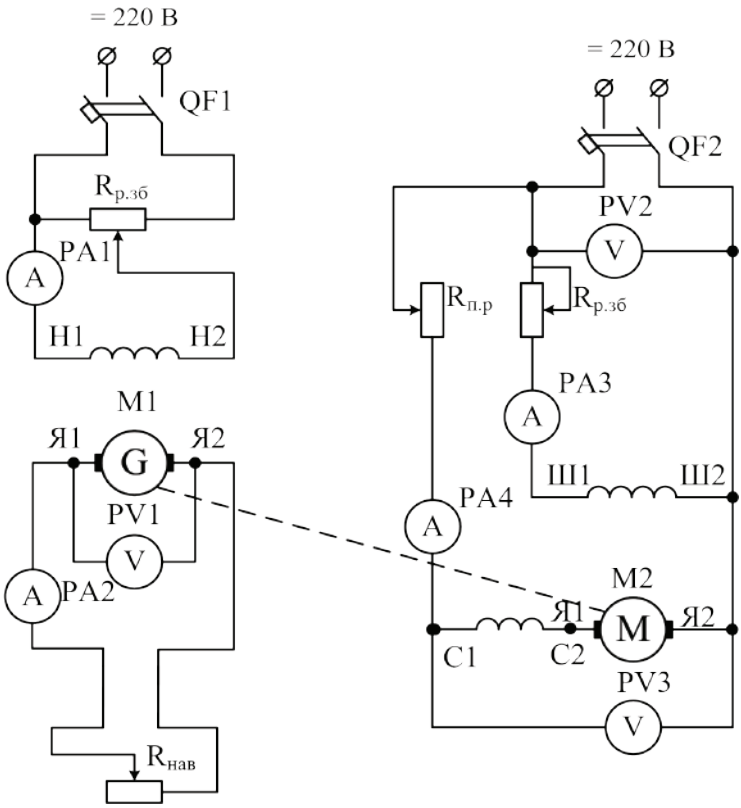


Рисунок 7.2 – Схема електрична принципова дослідження ДПС змішаного збудження

Далі двигун відключають від мережі та зупиняють. Після цього змінюють полярність послідовної обмотки, переставивши проводи, що йдуть до виводів С1–С2, знову запускають двигун і навантажують його за тих самих умов, що й під час першого випробування. Повторно вимірюють частоту обертання.

Та схема вмикання обмоток збудження, за якої частота обертання двигуна буде ***меншою***, відповідає узгодженому включенню обмоток.

Пуск ДПС змішаного збудження виконується за схемою, наведеною на рисунку 7.2, із використанням пускового реостата $R_{п.р}$. Під час пуску цей реостат має бути повністю введений у коло якоря з метою

обмеження пускового струму. Опір у колі обмотки збудження $R_{р.зб}$ повинен бути повністю виведеним, що забезпечує запуск двигуна за максимального магнітного потоку збудження.

У процесі розгону двигуна ЕРС якоря зростає, відповідно струм якоря зменшується, після чого пусковий реостат $R_{п.р}$ поступово повністю виводиться з кола.

4.2 Методика отримання робочих характеристик ДПС змішаного збудження дослідним шляхом

Для отримання робочих характеристик ДПС змішаного збудження застосовується схема електрична принципова, наведена на рисунку 7.2. Як навантаження на валу при цьому використовується ГПС незалежного збудження.

Дослід виконується у такій послідовності. Спочатку здійснюють пуск двигуна, після чого його навантажують за допомогою навантажувального генератора до номінального режиму. У цьому режимі струм якоря двигуна має відповідати номінальному значенню за умови номінальної напруги живлення на затискачах двигуна та номінальної частоти обертання. Величина струму збудження $I_{зб}$, за якого забезпечується номінальний режим, встановлюється за допомогою регулювального реостату $R_{р.зб}$ і підтримується незмінною протягом усього експерименту. При номінальній напрузі живлення на затискачах двигуна, навантаження на валу змінюють за допомогою навантажувального генератора таким чином, щоб струм якоря двигуна перебував у межах від $I_а = I_{а0}$ до $I_а = 1{,}2I_{а\,ном}$. У ході досліду знімають 5…6 експериментальних точок. Отримані дані заносять до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Експериментальні і розрахункові дані для отримання робочих характеристик ДПС змішаного збудження

Дані досліду						Дані розрахунку						
$U_а$	$I_а$	$I_{зб}$	n	$U_г$	$I_г$	$\eta_г$	$P_г$	$P_{1д}$	$P_{2д}$	$\eta_д$	$M_{ЕМ}$	ω
В	А	А	об/хв	В	А	%	Вт	Вт	Вт	%	Н·м	рад/с

Дані розрахунку в таблиці 7.1 визначаються за наступними рівняннями [7].

Потужність навантажувального ГПС:

$$P_г = U_г \cdot I_г, \tag{7.6}$$

де $U_г$ – напруга на затискачах обмотки якоря генератора, В;

$I_г$ – струм якоря генератора, А.

Потужність, що споживається ДПС з мережі постійного струму:

$$P_{1д} = U_а \cdot I_а = U_а\,(I_а + I_{зб}), \tag{7.7}$$

де $U_а$ – напруга на затискачах обмотки якоря ДПС, В;

$I_а$ – струм якоря ДПС, А;

$I_{зб}$ – струм збудження в паралельній обмотці збудження, А.

Потужність на виході ДПС, що віддається навантажувальному ГПС:

$$P_{2д} = \frac{P_г}{\eta_г}, \tag{7.8}$$

де $\eta_г$ – ККД навантажувального ГПС, в.о., визначається за графіком, представленим на рисунку 7.3.

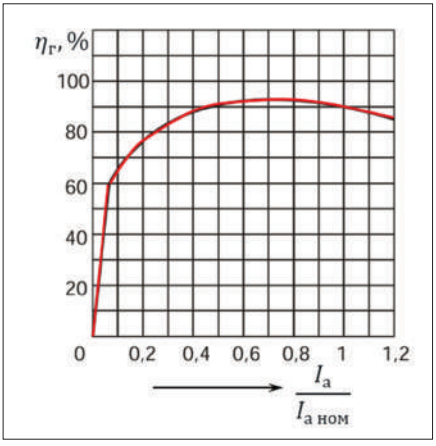


Рисунок 7.3 – Графік ККД навантажувального ГПС

Корисний момент на валу ДПС:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}, \tag{7.9}$$

де ω – кутова швидкість обертання якоря ДПС, рад/с.

Кутова швидкість обертання якоря ДПС:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \tag{7.10}$$

де n – частота обертання якоря ДПС, об/хв.

Момент холостого ходу ДПС:

$$M_0 = \frac{U \cdot I_{a0}}{\omega_0}, \tag{7.11}$$

де I_{a0} – струм холостого ходу ДПС, А.

Електромагнітний (обертовий) момент ДПС:

$$M_{EM} = M_0 + M_2. \tag{7.12}$$

4.3 Методика отримання регулювальних характеристик ДПС змішаного збудження дослідним шляхом

4.3.1 Дослідження регулювальної характеристики ДПС змішаного збудження при зміні струму збудження або магнітного потоку

Дослід проводиться у такій послідовності. Після пуску двигуна за допомогою навантажувального генератора встановлюють струм якоря двигуна $I_a = 0{,}5I_{a\,ном}$. За умови номінальної напруги на затискачах якоря двигуна М2 струм навантаження генератора М1 необхідно підтримувати незмінним протягом усього експерименту. При номінальній напрузі на затискачах якоря двигуна, поступово зменшують струм збудження двигуна М2 до тих пір, доки частота обертання не досягне значення $(1{,}2\ldots1{,}3)n_{ном}$. У процесі дослідження знімають 5…6 експериментальних точок. Отримані результати заносять до таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Експериментальні дані для побудови регулювальної характеристики $n = f(I_{зб})$ при $U_a = U_{a\,ном} = \text{const}$

№ досліду	U_a	I_a	$I_{зб}$	n
	В	А	А	об/хв
1				
2				
3				
4				
5				

4.3.2 Дослідження регулювальної характеристики ДПС змішаного збудження при зміні напруги живлення

Після пуску двигуна встановлюють струм збудження, що відповідає його номінальному режиму роботи (відповідно до даних таблиці 7.1), і підтримують це значення незмінним протягом усього досліду.

За допомогою навантажувального генератора М1 двигун М2 навантажують до струму якоря $I_{а} = 0{,}5I_{а\,ном}$ при повністю введеному пусковому реостаті $R_{п.р}$ у коло якоря. Струм навантаження генератора, встановлений на цьому етапі, необхідно підтримувати постійним упродовж дослідження. Далі, використовуючи реостат $R_{п.р}$, поступово зменшують напругу на затискачах якоря двигуна до тих пір, доки частота обертання не знизиться до значення $n = 0{,}5n_{ном}$. У ході досліду знімають 5…6 експериментальних точок. Покази вимірювальних приладів заносять до таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Експериментальні дані для побудови регулювальної характеристики $n = f(U_{а})$ при $I_{зб} = I_{зб\,ном} = \text{const}$

№ досліду	$U_{а}$	$I_{а}$	$I_{зб}$	n
	В	А	А	об/хв
1				
2				
3				
4				
5				

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову випробування ДПС змішаного збудження.
2. Технічні характеристики вимірювальних приладів та електричних машин, задіяних у досліді (досліджуваного ДПС та навантажувального ГПС).
3. Таблиці 7.1–7.3 з експериментальними даними та розрахунками.
4. Побудовані у масштабі робочі характеристики ДПС змішаного збудження.
5. Побудовані у масштабі регулювальні характеристики цього двигуна.

6. Аналіз отриманих результатів з зазначенням основних властивостей ДПС змішаного збудження.

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як класифікуються ДПС за способом збудження?
2. Приведіть схему електричну принципову підключення ДПС змішаного збудження.
3. Поясніть, з якою метою вводять пусковий реостат в колі якоря і регулювальний в колі збудження двигуна?
4. Поясніть, чому при пуску двигуна потрібно, щоб пусковий реостат був повністю введеним, а регулювальний в колі збудження – виведеним?
5. Поясніть методику отримання робочих характеристик ДПС змішаного збудження дослідним шляхом.
6. Який вигляд мають робочі характеристики ДПС змішаного збудження?
7. Поясніть якими способами і як регулюється швидкість обертання ДПС змішаного збудження?
8. У чому сутність методики дослідження регулювальної характеристики ДПС змішаного збудження при зміні струму збудження або потоку збудження?
9. Поясніть, як перевіряється узгодженість включення обмоток збудження двигуна змішаного збудження?
10. У чому сутність методики дослідження регулювальної характеристики ДПС змішаного збудження при зміні напруги живлення?
11. У чому полягають переваги і недоліки ДПС змішаного збудження?
12. Поясніть, як змінити напрямок обертання якоря двигунів змішаного збудження?
13. З якої причини заборонено приєднувати обмотку паралельного збудження після пускового реостата?
14. Проаналізуйте, що відбудеться, якщо при навантаженні на валу було розірвано коло обмотки паралельного збудження ДПС?
15. Поясніть, що відбудеться якщо у ДПС змішаного збудження обмотки паралельного і послідовного збудження при роботі включені зустрічно?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

ВИВЧЕННЯ БУДОВИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВИМІРЮВАННЯМ ОМІЧНИХ ОПОРІВ ПЕРВИННОЇ ТА ВТОРИННОЇ ОБМОТОК

Мета роботи

Засвоєння принципів дії та функціонального призначення силових трансформаторів; вивчення конструкції магнітопроводів і обмоток однофазних та трифазних трансформаторів, призначення елементів системи охолодження, пристроїв контролю й очистки трансформаторного масла, а також засобів захисту та регулювання напруги; детальне вивчення конструктивної схеми трифазного силового трансформатора та систематизації умовних позначень марок електротехнічної сталі й типів трансформаторів.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури опрацювати теоретичний матеріал за темою 5 «Основні теоретичні відомості і загальні питання будови і устрою силових трансформаторів», а саме:

- типи, конструктивні особливості, технології та матеріали виготовлення магнітопроводів однофазних і трифазних трансформаторів, а також властивості і переваги електротехнічних сталей [1; 2, с. 199–202; 3, с. 122–126; 4, с. 107–110; 5, с. 71–76; 6, с. 23–26];
- типи, конструкції та матеріали обмоток трансформаторів, а також класифікацію обмоток за схемою розташування та рівнями напруги [1; 2, с. 202–203; 3, с. 126–127; 4, с. 110–115; 5, с. 76; 6, с. 26–27];
- призначення окремих елементів та принцип дії системи охолодження силових трансформаторів [1; 2, с. 203–206; 3, с. 127–128; 4, с. 116–120; 6, с. 27–28];
- ознайомитися з приладами контролю та системами очищення трансформаторного масла, пристроями захисту та засобами регулювання напруги трансформаторів [1; 2, с. 195–198, 206–208; 3, с. 128–129; 4, с. 120; 4, с. 150–152];

- конструктивну схему будови трифазного силового трансформатора [1];
- принцип дії та функціональне призначення силових трансформаторів [1; 2, с. 156–158; 3, с. 117–121; 4, с. 105–106; 5, с. 67–71; 6, с. 17–22].

2. Ознайомитися:

- зі структурою умовного позначення марок електротехнічної сталі відповідно до вимог ДСТУ [ДОДАТОК Г];
- зі структурою умовного позначення типів трансформаторів [ДОДАТОК Д; 4, с. 106];
- з технічними характеристиками силових трансформаторів, що застосовуються у сільськогосподарському виробництві [2, с. 432–434].

3. Виконати тести з теми 5 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пунктах 1, 2.

4. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблиці для реєстрації, оброблення та подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з методикою експериментального визначення омічного опору обмоток трансформатора та вимірювання температури обмоток.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для дослідження трансформатора. Записати паспортні дані досліджуваного трансформатора і вимірювальних приладів, використаними у роботі.

5. Провести експериментальне визначення омічного опору обмоток трансформатора та вимірювання температури обмоток.

6. Розрахувати омічний опір обмоток трансформатора для заданої (розрахункової) температури.

7. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

8. Виконати тести до лабораторної роботи № 8 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Трансформатор являє собою електромагнітний статичний перетворювач електричної енергії, який містить дві або більше індуктивно зв'язані обмотки та призначений для перетворення однієї системи напруг і струмів в іншу без зміни частоти [3].

Окрім основного призначення, трансформатори застосовуються для зміни числа фаз і перетворення частоти. У сучасних енергосистемах вони використовуються на всіх етапах генерування, передавання, розподілу та споживання електричної енергії [3].

Принцип дії трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції, відкритому М. Фарадеєм у 1831 р. Під час підключення первинної обмотки до джерела синусоїдальної напруги U_1 у ній виникає струм I_1, який створює змінний синусоїдальний магнітний потік Ф, що замикається по магнітопроводу. Цей потік індукує ЕРС в обмотках трансформатора – як у первинній, так і у вторинній. При підключенні навантаження до вторинної обмотки в ній протікає вторинний струм I_2, а на її затискачах встановлюється відповідне значення напруги U_2. Результуючий магнітний потік магнітопроводу Φ_c формується сумарним впливом струмів обох обмоток [4].

Найпоширенішим і ключовим різновидом трансформаторів є силові трансформатори, які призначені для перетворення енергії змінного струму в електричних мережах енергетичних систем. Їх використовують на електростанціях, підстанціях, на промислових підприємствах, міських та сільськогосподарських мережах, забезпечуючи ефективну передачу та розподіл електроенергії [5].

Магнітні системи трансформаторів [6].

Магнітна система трансформатора забезпечує підсилення магнітного зв'язку між первинною та вторинною обмотками, а також слугує конструктивною основою для розміщення обмоток, відводів та інших елементів трансформатора.

За ***конструктивним виконанням*** магнітопроводу трансформатори поділяють на стрижньові, броньові, бронестрижневі та тороїдальні.

Стрижневий магнітопровід (рис. 8.1) характеризується тим, що ярма з'єднують кінці різних стрижнів, і кожне ярмо розташоване лише з боку торців стрижнів та обмоток. У цьому випадку магнітний потік у ярмі дорівнює потоку стрижня.

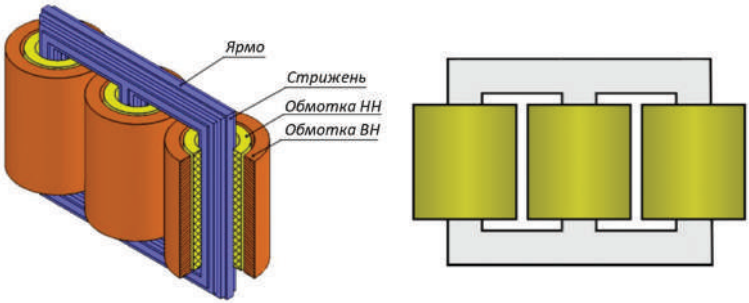


Рисунок 8.1 – Стрижньовий магнітопровід трифазного трансформатора

Броньовий магнітопровід (рис. 8.2) відрізняється тим, що обидва кінці кожного стрижня з'єднані щонайменше двома боковими ярмами. Таким чином, ярма охоплюють не лише торцеві, а й бокові поверхні обмоток. За таких умов магнітний потік у ярмі становить половину потоку стрижня, унаслідок чого площа перерізу ярма вдвічі менша від площі перерізу стрижня.

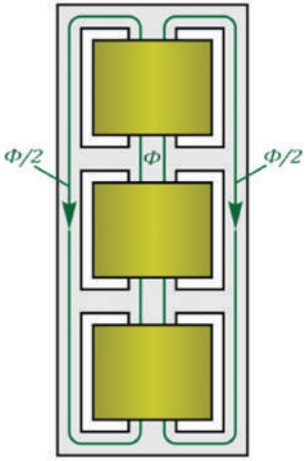


Рисунок 8.2 – Броньовий магнітопровід трифазного трансформатора

Бронестрижневий тип магнітопроводу характеризується наявністю розгалужених ярм (рис. 8.3). Застосування такої конструкції спрямоване на зменшення загальної габаритної висоти трансформатора. Для трансформаторів великої потужності це має принципове значення, оскільки під час залізничного транспортування саме висота обладнання часто є лімітуючим параметром (через обмеження висоти просвіту мостів та інших інженерних споруд). Порівняно зі стрижневим магнітопроводом, висота бронестрижневого магнітопроводу зменшена на величину, що відповідає ширині середніх стрижнів.

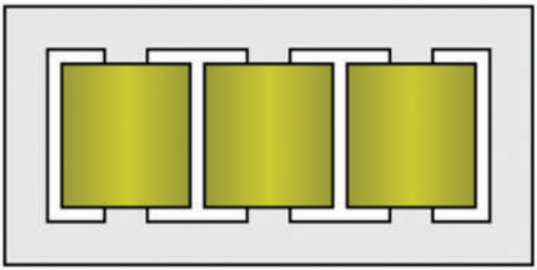


Рисунок 8.3 – Бронестрижневий магнітопровід трифазного трансформатора

У силових трансформаторах потужністю 100 000 кВА і більше застосовуються бронестрижневі магнітопроводи. Для таких магнітопроводів характерні специфічні особливості розподілу магнітного потоку. Зокрема, в однофазній конструкції кожний стрижень має одне бокове ярмо, при цьому магнітний потік у ярмі становить половину магнітного потоку стрижня. У трифазній конструкції боковими ярмами оснащені лише два зі стрижнів, і в цьому випадку магнітний потік ярма є меншим за потік стрижня у $\sqrt{3}$ рази.

Завдяки використанню бокових ярм у бронестрижневому магнітопроводі, порівняно зі стрижневим типом, стає можливим суттєве зменшення висоти торцевих ярм: у однофазних трансформаторах – приблизно удвічі, а у трифазних – приблизно у $\sqrt{3}$ рази. У результаті загальна висота магнітопроводу і трансформатора істотно зменшується, що є важливою перевагою, особливо за умов транспортних обмежень.

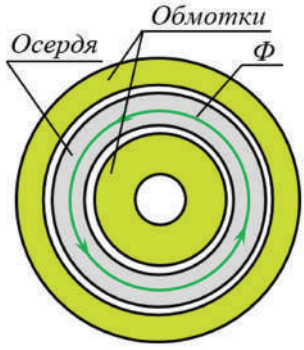


Рисунок 8.4 – Тороїдальний магнітопровід трифазного трансформатора

Тороїдальний тип магнітопроводу має форму тора (рис. 8.4), у якому магнітний потік замикається по кільцю осердя. Обмотки в таких конструкціях рівномірно розміщуються по всьому периметру стрижня, що забезпечує симетричний розподіл магнітного потоку та зменшує магнітні втрати.

Магнітопроводи силових трансформаторів традиційно виконуються з пласкою стрижньовою структурою. Незважаючи на наявність певної магнітної несиметрії між фазами, цей тип магнітопроводу набув широкого застосування завдяки високій технологічності виготовлення та надійності.

У трансформаторах потужністю до 6300 кВА використовується просторова структура магнітопроводу, у якій осі стрижнів та ярм розташовані в різних площинах (рис. 8.5). Така конструкція забезпечує більш рівномірний розподіл магнітного потоку, що дозволяє зменшити масу магнітопроводу та скоротити втрати х.х. на 12–15 %, підвищуючи енергоефективність трансформатора.

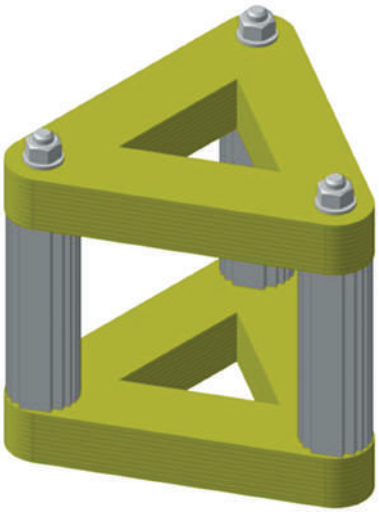


Рисунок 8.5 – Просторова структура магнітопроводу трифазного силового трансформатора

За способом з'єднання стрижнів із ярмами магнітопроводи класифікують на стикові, шихтовані та навиті.

У стикових магнітопроводах стрижні та ярма попередньо формують із пластин електротехнічної сталі окремо, після чого з'єднують їх у єдину конструкцію по площині стику вже після насадження обмоток на стрижні. Перевагою такої конструкції є відносна простота



а *б*

Рисунок 8.6 – Зони «неспівпадання» в стикових магнітопроводах трансформатора

складання. Проте значні немагнітні проміжки в зонах стику спричиняють підвищення струму х.х. Додатково, у місцях повороту листів на 90° виникають «зони неспівпадання» напрямку прокату з напрямком магнітного потоку (рис. 8.6, а), що призводить до збільшення магнітного опору, зростання втрат та локального перегріву.

Для зменшення зазначених негативних явищ застосовують пластини зі скошеними краями – так званий «косий стик» (рис. 8.6, б), який забезпечує більш плавний перехід магнітного потоку та знижує рівень втрат у зоні стику.

У шихтованих магнітопроводах пластини стрижнів та ярм укладають у взаємне переплетення (шихтування), що забезпечує істотне зменшення немагнітних проміжків і, відповідно, зниження струму х.х. Залежно від конфігурації стикування пластин стрижнів і ярм, шихтовані магнітопроводи виконують із прямими, косими та комбінованими стиками.

З появою в електромашинобудуванні холоднокатаної рулонної електротехнічної сталі стало можливим застосування навитих магнітопроводів. У таких конструкціях окремі елементи формуються шляхом навивання стрічок рулонної сталі, після чого їх об'єднують у цілісний магнітопровід.

Найбільшого поширення в силових трансформаторах набули пласкі стрижньові шихтовані магнітопроводи. Переріз стрижнів такої конструкції являє собою симетричну ступінчасту фігуру, вписану в коло. Така форма зумовлена тим, що обмотки силових трансформаторів мають циліндричну конфігурацію, а тому переріз стрижнів конструктивно наближують до кола. Діаметр кола, у яке вписується ступінчаста фігура перерізу стрижня (рис. 8.7), називають діаметром стрижня трансформатора.

Для виготовлення магнітних систем (магнітопроводів) трансформаторів використовують спеціальні тонколистові електротехнічні сталі з підвищеним вмістом кремнію (до 5 %), що забезпечує покращені магнітні властивості матеріалу.

Для виготовлення магнітопроводів силових трансформаторів використовують холоднокатану анізотропну електротехнічну сталь товщиною 0,27; 0,30 та 0,35 мм, питомі втрати якої у 2…2,5 рази менші порівняно з гарячекатаної. Застосування холоднокатаної сталі забезпечує підвищення робочої індукції в магнітопроводі до рівня 1,6…1,7 Тл, що водночас дозволяє зменшити масу його сталевих елементів і масу обмотувального проводу. У результаті суттєво скорочуються сумарні втрати в трансформаторі.

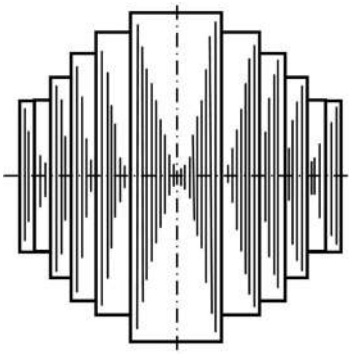


Рисунок 8.7 – Ступінчастий перетин стрижнів і ярм магнітопроводу

Обмотки трансформаторів [8]

Обмотки трансформатора є його ключовими конструктивними елементами, на частку яких припадає близько 50 % загальної вартості машини, включаючи матеріали та процес виготовлення. Конструктивні схеми обмоток можуть істотно відрізнятися залежно від номінальної потужності та рівня напруги трансформатора. Основними параметрами, що визначають тип і виконання обмотки, є кількість витків, переріз провідника та клас напруги.

Під класом напруги обмотки розуміють тривало допустиме робоче значення напруги, яке, як правило, відповідає номінальній напрузі електричної мережі, до якої ця обмотка під'єднується. Класом напруги трансформатора вважають клас напруги його обмотки вищої напруги (ВН) [9].

Обмотки силових трансформаторів виконують із мідного або алюмінієвого проводу у формі циліндрів, які розміщують на стрижнях магнітопроводу концентрично (співвісно). Як правило, обмотку низької напруги (НН) встановлюють ближче до стрижня, оскільки вона потребує меншої товщини ізоляції від магнітопроводу, тоді як обмотку ВН розташовують зовні (рис. 8.1).

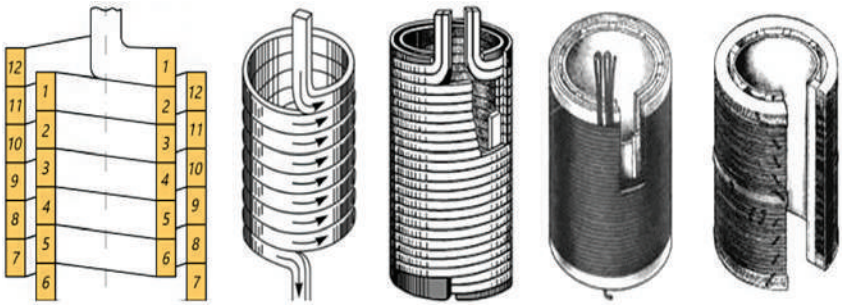
Густина струму в проводах обмоток силових трансформаторів, як правило, визначається їхнім призначенням, умовами охолодження та допустимими тепловими навантаженнями:

$$J_{Cu} = 2{,}0\ldots3{,}5 \text{ А/мм}^2 \text{ – для міді;}$$

$$J_{Al} = 1{,}2\ldots2{,}6 \text{ А/мм}^2 \text{ – для алюмінію.}$$

Концентричні обмотки в конструктивному відношенні поділяють на декілька типів:

Циліндричні одно- та двошарові обмотки (рис. 8.8,а,б) застосовують переважно як обмотки НН за значень номінального струму до 800 А. Багатошарові циліндричні обмотки (рис. 8.8,в) використовують для виконання обмоток ВН трансформаторів напругою до 35 кВ. Котушкові багатошарові циліндричні обмотки (рис. 8.8,г) конструктивно поділяють по висоті на окремі секції, що являють собою багатошарові котушки.



а) ***б)*** ***в)*** ***г)***

а – одношарова; б – двошарова; в – багатошарова; г – котушкова

Рисунок 8.8 – Циліндричні обмотки силових трансформаторів

Обмотка цього типу виготовляється з проводів з прямокутним чи коловим перерізом, розташованих уздовж стрижня в кілька концентричних шарів. Між суміжними шарами прокладається ізоляційний матеріал (кабельний папір), що забезпечує необхідну електричну міцність та термічну стійкість конструкції.

Такі обмотки застосовують у силових трансформаторах із такими параметрами:

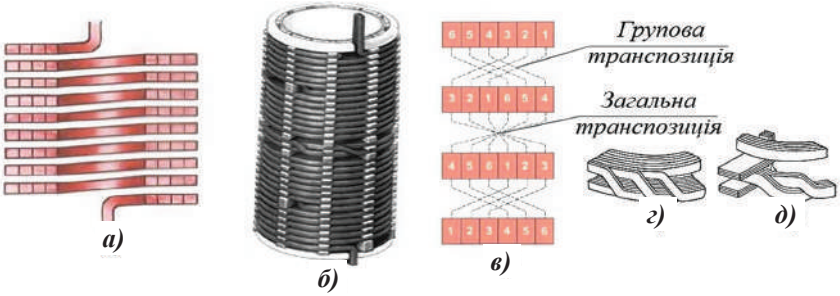
- ***середні та великі значення струмів***, коли потрібне раціональне використання площі провідника та підвищена механічна міцність;
- ***клас напруги до 35 кВ***, що обумовлює необхідність багатошарової ізоляції;
- ***потужності, характерні для розподільчих і силових трансформаторів середнього класу***, де важливі компактність, термостійкість і механічна стійкість до електродинамічних зусиль:

$S \leq 25000$ кВА	повна потужність
$U_л \leq 35$ кВ	лінійна напруга
$I_ф \leq 1200$ А	фазний струм

Переваги: проста технологія виготовлення; гарне охолодження.

Недоліки: мала механічна міцність в радіальному напрямку.

Гвинтові одно- та багатоходові обмотки (рис. 8.9) формують із кількох паралельно з'єднаних проводів і застосовують виключно як обмотки НН при струмах, що перевищують 200 А. Паралельні проводи з прямокутним перерізом щільно прилягають один до одного в радіальному напрямку, а витки укладаються по гвинтовій траєкторії з одним або кількома ходами.



а – схема; ***б*** – загальний вигляд; ***в*** – схема транспозиції провідників; ***г*** – загальна транспозиція; ***д*** –групова транспозиція

Рисунок 8.9 – Гвинтова обмотка силового трансформатора

Для забезпечення рівномірного розподілу струму між паралельними провідниками виконується їх транспозиція (рис. 8.9,в,г,д), тобто періодичне перекладання провідників таким чином, щоб у межах одного витка кожен із них послідовно займав усі можливі положення. Це дає змогу знизити додаткові втрати та вирівняти електромагнітні умови роботи провідників.

Гвинтові обмотки застосовують у трансформаторах із такими параметрами:

- ***великі номінальні струми*** (понад 200 А), що потребують високої механічної міцності обмотки;
- ***низький клас напруги*** (зазвичай для обмоток НН);

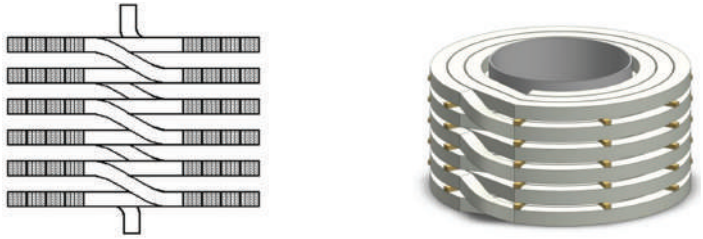
• ***середні та великі потужності*** трансформаторів, де важливо забезпечити стійкість обмотки до значних електродинамічних зусиль і мінімізувати додаткові втрати в міді:

$S \geq 100$ кВА	повна потужність
$U_л \leq 35$ кВ	лінійна напруга
$I_ф \geq 200$ А	фазний струм

Переваги: висока механічна міцність; надійна ізоляція; гарне охолодження.

Недоліки: більш висока вартість порівняно з циліндричною.

Неперервні (дискові) котушкові обмотки (рис. 8.10) формуються як послідовне з'єднання дискових котушок і застосовуються як у обмотках ВН, так і НН завдяки високій механічній міцності та експлуатаційній надійності.



а) ***б)***

а – схема; ***б*** – загальний вигляд

Рисунок 8.10 – Неперервна (дискова) котушкова обмотка силового трансформатора

Такі обмотки виготовляють з проводу з прямокутним перерізом та складають із кількох десятків дископодібних котушок. Кожна котушка намотується по спіралі та з'єднується з сусідньою без використання паяних з'єднань, що підвищує надійність і зменшує електричні втрати. Якщо один виток містить кілька паралельних проводів, застосовують їх транспозицію для забезпечення рівномірного розподілу струму.

Котушкові неперервні (дискові) обмотки використовують у трансформаторах із такими характеристиками:

• ***високі та середні рівні напруги***, де важлива підвищена електрична міцність;

- ***середні та великі потужності трансформаторів***, що потребують високої механічної стійкості до електродинамічних зусиль;
- ***необхідність надійного охолодження***, оскільки дискова структура забезпечує рівномірний розподіл потоків охолоджувального середовища між котушками:

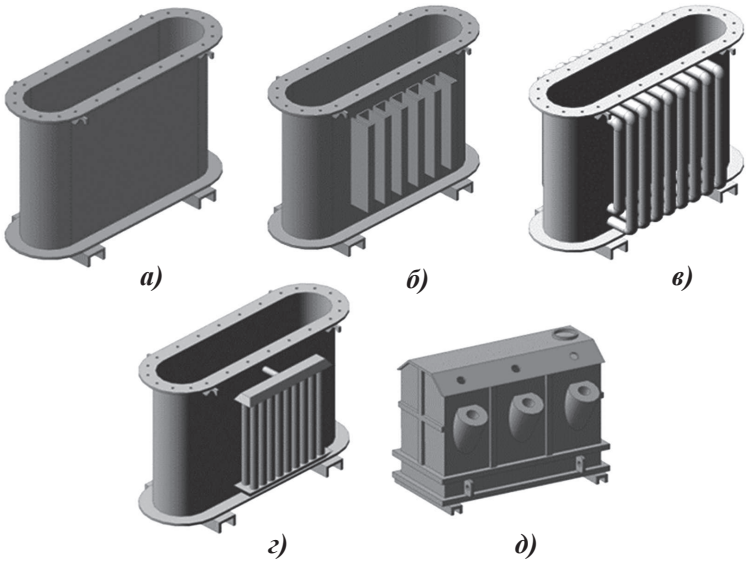
$S \geq 100$ кВА	повна потужність
3 кВ $\leq U_л \leq$ 220 кВ	лінійна напруга
$I_ф \geq 10$ А	фазний струм

Переваги: висока механічна і електрична міцність; гарне охолодження.

Недоліки: необхідність перекладання половини котушок при намотуванні.

Охолодження трансформаторів [10]

Конструкції баків трансформаторів наведені на рисунку 8.11. Система охолодження визначає спосіб відведення тепла від активної частини трансформатора та конструктивне виконання бака.



а – гладкий; ***б*** – ребристий; ***в*** – трубчастий; ***г*** – радіаторний; ***д*** – колокольний

Рисунок 8.11 – Баки силових трансформаторів

У трансформаторах з охолодженням ***типу С*** та ***СЗ*** активна частина безпосередньо контактує з навколишнім повітрям, а відведення тепла здійснюється за рахунок випромінювання та природної конвекції повітря.

У трансформаторах ***типу СГ*** активну частину розміщують у баку, заповненому газовим середовищем, що забезпечує покращені умови ізоляції та тепловідведення.

У трансформаторах ***типу СД*** для інтенсифікації процесу охолодження використовують примусове нагнітання повітря вентиляторними установками.

У трансформаторах ***типу М*** активна частина занурена в бак, заповнений трансформаторним маслом, яке виконує одночасно охолоджувальну й ізоляційну функції.

У трансформаторах ***типу Д*** (масляно-повітряне охолодження) передбачено встановлення вентиляторів, за допомогою яких забезпечують примусову циркуляцію повітря вздовж зовнішніх поверхонь радіаторів і бака, тоді як циркуляція масла в радіаторах залишається природною.

У трансформаторах ***типу МЦ*** та ***НМЦ*** на кожному радіаторі встановлюють масляні насоси, що створюють примусову циркуляцію масла. Це дозволяє підвищити інтенсивність тепловідведення, забезпечуючи ефективну роботу трансформатора при підвищених навантаженнях.

У трансформаторах з охолодженням ***типу ДЦ*** та ***НДЦ*** застосовується примусова циркуляція масла через компактні масляні охолоджувачі, у яких тепло відводиться за допомогою примусового повітряного обдування (рис. 8.12). Така система забезпечує інтенсивний тепловідвід і підвищує ефективність роботи трансформатора за високих навантажень.

У трансформаторах з охолодженням ***типу Ц*** та ***НЦ*** масло примусово прокачується через охолоджувачі з водяним охолодженням. Використання води як теплоносія забезпечує високий коефіцієнт теплопередачі, що дозволяє застосовувати цю систему в трансформаторах великої потужності.

У трансформаторах з охолодженням ***типу Н***, ***НД*** та ***ННД*** активну частину розміщують у баку, заповненому синтетичною негорючою рідиною, стійкою до окислення. Як правило, застосовують совтол,

клофен або пиранол. Такі рідини забезпечують підвищений рівень пожежної безпеки й надійної ізоляції, що дає можливість використовувати трансформатори цього типу в приміщеннях з підвищеними вимогами до вибухопожежної безпеки.

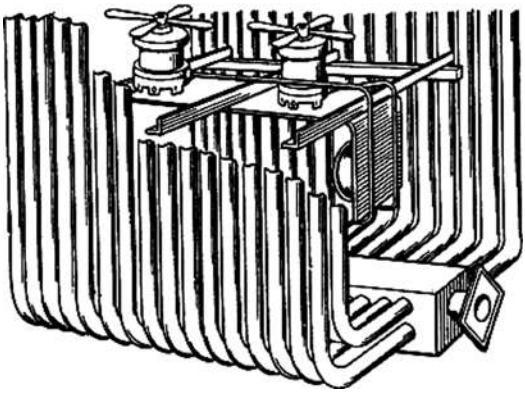


Рисунок 8.12 – Трубчастий радіатор з вентиляторами

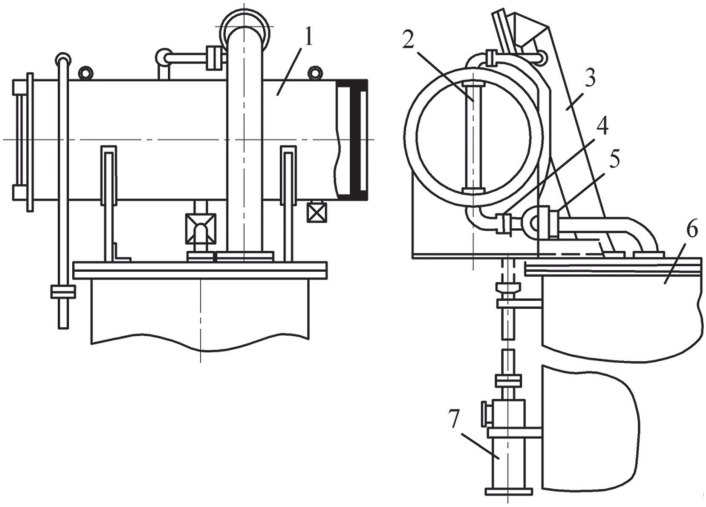
Розширювач (рис. 8.13) призначений для компенсації змін рівня масла в баку трансформатора під час експлуатаційних коливань температури, а також для запобігання безпосередньому контакту масла з навколишнім повітрям. Він встановлюється на всіх силових масляних трансформаторах класом напруги від 5 кВ і потужністю 25 кВА та більше [3].

Конструктивно розширювач являє собою горизонтально розташований циліндричний бачок, закріплений над кришкою бака трансформатора і з'єднаний із ним трубопроводом. Його об'єм становить приблизно 10 % від загального об'єму масла в баку трансформатора [3].

Застосування розширювача суттєво підвищує довговічність ізоляційного масла завдяки зменшенню інтенсивності його окислення. Це досягається завдяки таким чинникам [4]:

- ***зменшеній площі контакту масла з повітрям*** у порівнянні з відкритим дзеркалом масла в баку;
- ***нижчій температурі масла*** у розширювачі відносно температури у верхній частині активної зони трансформатора, що уповільнює хімічні процеси окиснення;

• ***відсутності циркуляції масла в розширювачі***, через що вода з повітря та продукти окислення осідають у його нижній частині і не потрапляють до бака трансформатора.



1 – розширювач; 2 – масловказівник; 3 – вихлопна труба;
4 – плаский кран; 5 – газове реле; 6 – бак; 7 – очисник повітря

Рисунок 8.13 – Допоміжне обладнання системи охолодження масляного трансформатора

Завдяки цьому розширювач забезпечує стабільність ізоляційних властивостей масла та підвищує надійність роботи трансформатора в цілому.

Покажчик рівня масла (масловказівник) призначений для візуального контролю кількості масла в баку трансформатора. Він встановлюється на торцевій стінці з боку розширювача, а у трансформаторів без розширювача – на верхній частині стінки бака. На корпусі розширювача або безпосередньо на масловказівнику наносять три контрольні позначки, що відповідають рівням масла при вимкненому трансформаторі за температур масла –45 °С, +15 °С та +40 °С [4].

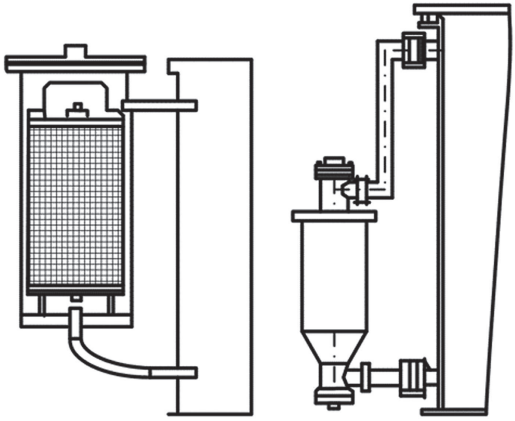
Термометр використовується для контролю температури верхнього шару масла у баку трансформатора та встановлюється на кришці бака [5]:

• у трансформаторах потужністю до 630 кВА застосовують ртутні скляні термометри зі шкалою від 0 до 150 °С;

• у трансформаторах потужністю 1000 кВА і більше, а також у герметичних трансформаторах від 160 кВА, для контролю температури масла на стінці бака використовують термометричні сигналізатори, які забезпечують не лише індикацію температури, але й подачу попереджувальних або аварійних сигналів.

Очисник повітря призначений для очищення повітря від вологи та механічних домішок, яке надходить у трансформатор під час зміни рівня масла, спричиненої температурними коливаннями. У трансформаторах потужністю до 630 кВА включно очисник повітря конструктивно вбудовується в розширювач, забезпечуючи компактність та спрощення конструкції. У трансформаторах потужністю 1000 кВА і більше очисник повітря встановлюється окремо на розширювачі, що дає змогу застосовувати більш ефективні та місткі фільтрувальні елементи [5].

Термосифонний фільтр (рис. 8.14) призначений для безперервної автоматичної регенерації трансформаторного масла та встановлюється на силових трансформаторах потужністю 1000 кВА і більше. У процесі роботи він забезпечує постійне очищення масла від продуктів старіння та вологи за рахунок термосифонної циркуляції [5].



а) ***б)***

Рисунок 8.14 – Конструкції термосифонних фільтрів масляних трансформаторів потужністю 160…630 кВА (*а*) та 1000 кВА (*б*)

Як фільтрувальний і поглинальний матеріал термосифонний фільтр заповнюється силікагелем марки КСК, який ефективно адсорбує вологу та окисні домішки, сприяючи підтриманню високої електричної міцності та подовженню терміну служби трансформаторного масла [5].

Газове реле (рис. 8.13) використовується для захисту трансформатора від внутрішніх пошкоджень, таких як виткові замикання в обмотках, пробій ізоляції або локальні перегріви магнітопроводу («пожежа в сталі»). Принцип його дії ґрунтується на фіксації газів і бульбашок, що утворюються внаслідок термічного розкладу масла або інтенсивного нагрівання при аварійних процесах усередині трансформатора [6].

Вихлопна (запобіжна) труба (рис. 8.13) призначена для захисту бака трансформатора від руйнування під час аварій, які супроводжуються виникненням електричної дуги, інтенсивним газоутворенням і різким підвищенням тиску всередині бака. У разі критичного підвищення тиску вона забезпечує відведення газів і масла, тим самим запобігаючи деформації або вибуху бака. Встановлюється на трансформаторах потужністю 1000 кВА і більше [6].

Арматура бака призначена для виконання технологічних операцій із трансформаторним маслом: його заливу, спуску, відбору проб та фільтрації. До складу арматури належать крани, вентилі, засувки, пробки та інші допоміжні елементи [6].

У трансформаторах з масляним охолодженням активна частина (магнітопровід разом з обмотками) занурюється в бак, заповнений трансформаторним маслом. Омиваючи обмотки та магнітопровід, масло ефективно відводить тепло, а потім через стінки бака та поверхні радіаторів передає його навколишньому середовищу. Завдяки високій електричній міцності масла забезпечується підвищена надійність роботи високовольтних трансформаторів. Масляне охолодження значно інтенсивніше за повітряне, що дає змогу зменшити габаритні розміри та масу масляних трансформаторів порівняно з сухими трансформаторами тієї ж потужності.

Будова трифазного масляного трансформатора середньої потужності представлена на рисунку 8.15, а загальний вигляд найбільш поширених силових трансформаторів у ДОДАТКУ К [2].

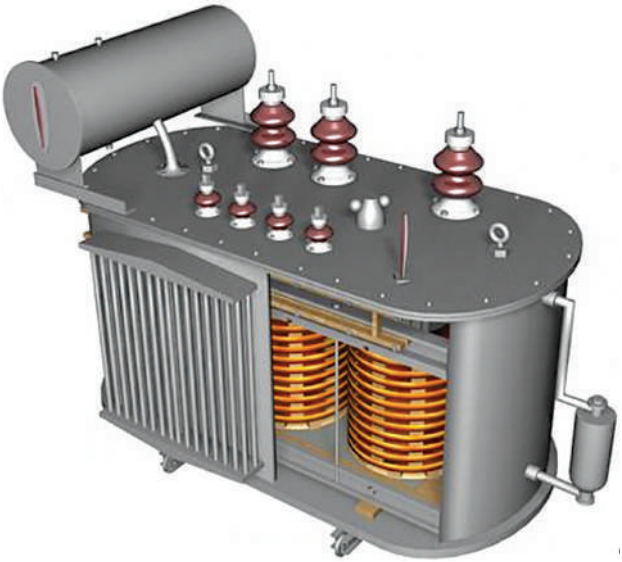


Рисунок 8.15 – Будова трифазного масляного трансформатора середньої потужності

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Вимірювання омічного опору обмоток високої та низької напруги трансформатора здійснюють із використанням вимірювального мосту, омметра, мультиметра або тестера. Під час проведення вимірювань необхідно визначити температуру трансформатора, приймаючи її рівною температурі навколишнього середовища у разі, якщо трансформатор тривалий час перебував у відключеному стані. За допомогою вимірювального обладнання виконують 2–3 повторні вимірювання опору обмоток кожної фази, після чого визначають середнє значення опору фазних обмоток ВН та НН. Додатково обчислюють середні значення опорів первинної та вторинної обмоток трансформатора, приведені до температури навколишнього середовища (20 °С) та розрахункової температури (75 °С). Отримані експериментальні та розрахункові дані заносяться до таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Результати вимірювань і розрахунків омічного опору обмоток трансформатора

Обмотки ВН			**Обмотки НН**		
A-X	***B-Y***	***C-Z***	***a-x***	***b-y***	***c-z***
$R_{1A\ \text{сер}} =$	$R_{1B\ \text{сер}} =$	$R_{1C\ \text{сер}} =$	$R_{2a\ \text{сер}} =$	$R_{2b\ \text{сер}} =$	$R_{2c\ \text{сер}} =$
$R_{1\ (20°C)} =$		$R_{1\ (75°C)} =$	$R_{2\ (20°C)} =$		$R_{2\ (75°C)} =$

Перерахунок омічного опору обмоток до розрахункової температури 75 °С (348 К) для мідних обмоток здійснюють відповідно до виразу [7]:

$$R_{(75\,^\circ\text{C})} = R_{\Theta_0}\frac{235+75}{235+Q_0}, \tag{8.1}$$

і у випадку алюмінієвих обмоток [7]:

$$R_{(75\,^\circ\text{C})} = R_{\Theta_0}\frac{245+75}{245+Q_0}, \tag{8.2}$$

де R_{Θ_0} – омічний опір обмотки при температурі навколишнього середовища;

Θ_0 – температура навколишнього середовища.

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Відомості щодо типів, конструктивних особливостей, способів виготовлення та матеріалів магнітопроводів однофазних і трифазних трансформаторів, а також властивостей і переваг електротехнічних сталей.

2. Відомості про різновиди, конструкцію та матеріали обмоток трансформаторів, їх класифікацію за функціональним призначенням і рівнем робочої напруги.

3. Опис призначення основних елементів та принципів функціонування систем охолодження силових трансформаторів.

4. Відомості про прилади контролю й очищення трансформаторного масла, засоби захисту трансформаторів та пристрої регулювання напруги.

5. Перерахунок омічного опору обмоток до розрахункової температури.

6. Заповнену таблицю 8.1 з результатами експериментальних вимірювань та проведених розрахунків.

7. Аналіз отриманих експериментальних даних (висновки).

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте визначення, що називається трансформатором?

2. Наведіть конструктивну схему трифазного силового трансформатора з позначенням позицій і елементів конструкцій, а також їх назви, призначення і матеріали виготовлення.

3. Назвіть типи і приведіть ескізи будови магнітопроводів однофазних і трифазних трансформаторів.

4. Назвіть переваги і види електротехнічних сталей, які використовуються для виготовлення магнітопроводів трансформаторів.

5. Поясніть, чим відрізняється холоднокатана і гарячекатана електротехнічні сталі, що застосовуються для виготовлення магнітопроводів трансформаторів. Назвіть переваги електротехнічних сталей.

6. Назвіть типи обмоток силових трансформаторів. Види обмоток силових трансформаторів за способом розташування.

7. Поясніть властивості металів, які використовуються для виготовлення обмоток силових трансформаторів.

8. Як позначаються за стандартом виводи обмоток ВН і НН силового трансформатора?

9. Назвіть конструктивні елементи системи охолодження силового трансформатора і поясніть їх призначення.

10. У чому полягає принцип роботи системи охолодження трансформатора?

11. Яке призначення має розширювальний бак в трансформаторі?

12. Яке призначення має термосифонний фільтр в системі охолодження?

13. Для чого використовується газове реле в трансформаторі?

14. У чому полягає сутність методики вимірювання омічного опору обмоток трансформатора?

15. Як визначити омічний опір обмоток трансформатора для розрахункової температури?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

ДОСЛІДНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТРАНСФОРМАЦІЇ ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи

Опанування методики та набуття практичних умінь щодо експериментального визначення коефіцієнта трансформації трифазних силових трансформаторів за різних схем з'єднання їх обмоток.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 214–215; 3, с. 120–121, 139–141; 4, с. 152–154; 6, с. 22, 69–70] опрацювати теоретичний матеріал, що охоплює поняття коефіцієнта трансформації трансформатора, схем з'єднання обмоток трифазних силових трансформаторів, а також засвоїти систему позначення виводів їх обмоток.

2. Виконати тести з теми 5 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблицю для реєстрації, оброблення та подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з методикою експериментального визначення коефіцієнта трансформації трифазних силових трансформаторів за різних схем їх з'єднання.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для дослідження трансформатора. Записати паспортні дані досліджуваного трансформатора і вимірювальних приладів, використаними у роботі.

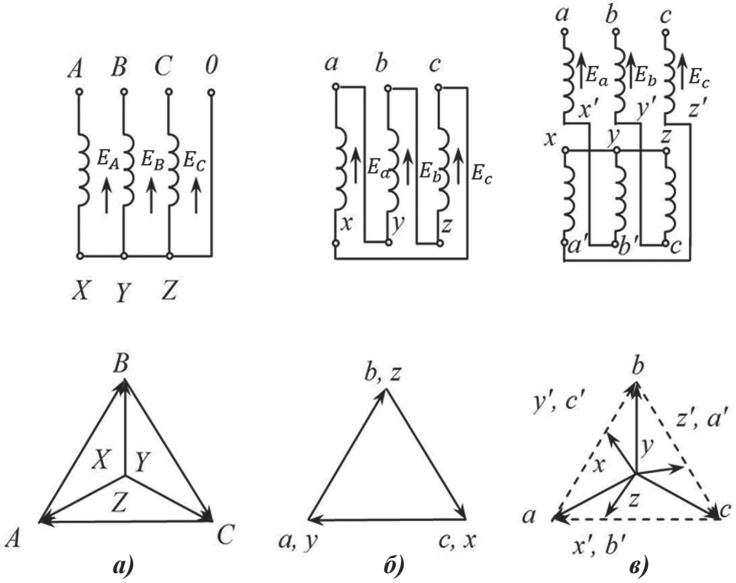
4. Виконати експериментальне визначення коефіцієнта трансформації трансформатора для різних схем з'єднання його обмоток.

5. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

6. Виконати тести до лабораторної роботи № 9 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Схема з'єднання обмоток визначає спосіб з'єднання обмоток усіх фаз, що належать до одного рівня напруги. У трифазних трансформаторах обмотки зазвичай з'днуються за такими схемами: «зірка» (Y), «зірка» з нульовим виводом (Y-0), «трикутник» (Δ) та «зигзаг» (Z) з нульовим виводом (рис. 9.1) [3].



а – зірка з нульовим проводом; ***б*** – трикутник; ***в*** – зигзаґ

Рисунок 9.1 – Електричні схеми з'єднання обмоток трифазного трансформатора і векторні діаграми ЕРС

Обмотка трансформатора, підключена до мережі з вищою напругою, називається ***обмоткою високої напруги*** (ВН); обмотка, на затискачах якої напруга є нижчою, визначається як ***обмотка низької***

напруги (НН). Трансформатори характеризуються властивістю ***оберненості***, що означає можливість використання тієї самої машини як підвищувального, так і понижувального пристрою [4].

Схеми з'єднання обмоток трансформатора позначають дробом, де у чисельнику вказується схема з'єднання обмоток ВН, а у знаменнику – схема обмоток НН. Наприклад, позначення Y/Δ означає, що обмотка високої напруги з'єднана «зіркою», а обмотка низької напруги – «трикутником».

Затискачі обмоток трансформатора прийнято позначати так:

Обмотка ВН	початки фаз	*A, B, C*
	кінці фаз	*X, Y, Z*
Обмотка НН	початки фаз	*a, b, c*
	кінці фаз	*x, y, z*

У схемах з'єднання обмоток позитивним напрямком ЕРС вважають напрям її дії від кінця обмотки до її початку, що визначається напрямом намотування проводу. У разі зміни початку та кінця обмотки напрям ЕРС змінюється на протилежний, що еквівалентно зміні напряму намотування. Хоча таке припущення є умовним, воно має суттєве значення під час роботи трифазного трансформатора, оскільки кожна фазна обмотка зчіплюється з магнітними потоками інших фаз [5].

Вибір схеми з'єднання обмоток трансформатора визначається низкою факторів. ***Основні вимоги щодо вибору схеми обмоток трансформатора*** [6]:

- вартість активних матеріалів;
- вартість ізоляційних матеріалів;
- трудомісткість технологічного процесу виготовлення;
- характер навантаження;
- режим експлуатації трансформатора.

Наприклад, з'єднання «зірка з нейтральним виводом» доцільно застосовувати за умов підвищених рівнів напруги, оскільки зменшення фазної напруги порівняно з лінійною дозволяє знизити вимоги до ізоляції та, відповідно, її вартість. Схему «трикутник» обирають з урахуванням особливостей роботи трансформатора за наявності вищих гармонік у напругах і струмах, а також при можливій несиметрії навантаження. Схема «зигзаг» зазвичай застосовується

у спеціалізованих трансформаторах або в умовах нерівномірного чи несиметричного навантаження. Проте її використання супроводжується збільшенням витрат обмотувального проводу приблизно на 15 %, що необхідно враховувати під час проєктування [6].

При з'єднанні фаз обмоток трансформатора за схемою Y спостерігаються такі переваги [8]:

1. ***Фазна напруга відносно землі*** є у √3 разів меншою порівняно зі схемою Δ, що дає змогу знизити вимоги до ізоляції та відповідно зменшити її вартість.

2. ***Кількість витків у фазній обмотці*** зменшується у √3 разів, тоді як ***площа поперечного перерізу проводу*** збільшується у √3 разів. Це спрощує конструкцію обмотки і знижує її собівартість.

Водночас більш сприятливих технічних характеристик можна досягти, якщо при з'єднанні однієї з обмоток за схемою Y іншу обмотку виконати за схемою Δ або Z (для обмотки низької напруги).

Під час виконання обмотки низької напруги за схемою Z кожну фазу розділяють на дві частини, розміщуючи їх на різних стрижнях магнітопроводу (рис. 9.1, в). Ці частини фазної обмотки з'єднують таким чином, щоб кінець однієї частини був під'єднаний до кінця другої частини тієї ж фази, розташованої на іншому стрижні. У такому разі обидві половини фазної обмотки вмикаються зустрічно, що призводить до геометричного віднімання їхніх ЕРС [8].

Якщо позначити ЕРС однієї частини фазної обмотки як $E_{\phi}^{'}$, тоді результуюча фазна ЕРС становитиме $E_{\phi} = \sqrt{3}E_{\phi}^{'}$ (рис. 9.2). Для порівняння, у фазних обмотках, з'єднаних за схемами Y та Δ, фазна ЕРС дорівнює $E_{\phi} = 2E_{\phi}^{'}$, тобто вона приблизно у 1,15 рази більша, ніж при з'єднанні за схемою Z.

Зазначена особливість з'єднання призводить до збільшення витрат провідникового матеріалу в обмотках, виконаних за схемою Z, приблизно на 15 %, що вважається її недоліком. Водночас суттєвою перевагою зигзагоподібної схеми є істотне зменшення впливу несиметрії навантаження та різного роду спотворень напруги у фазах, що забезпечує підвищення якості роботи трансформатора в умовах несиметричних режимів [9].

Коефіцієнтом трансформації трансформатора *називають відношення числа витків або фазних значень ЕРС обмоток ВН і НН* [5].

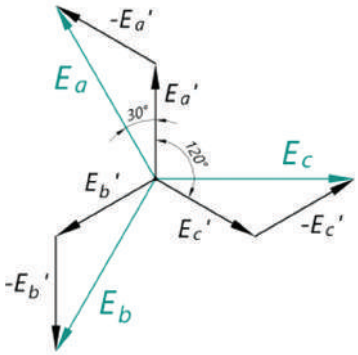


Рисунок 9.2 – Векторна діаграма ЕРС трифазного трансформатора при з'єднанні обмоток за схемою *Z*

У трифазних трансформаторах розрізняють фазний ($k_ф$) та лінійний ($k_л$) коефіцієнти трансформації. Їхні значення визначаються на основі результатів вимірювання фазних і лінійних напруг обмоток високої та низької напруги за різних схем з'єднання [5].

У режимі х.х. струм трансформатора є незначним, тому напруги його обмоток практично збігаються з відповідними ЕРС: $U_{1ф} = E_{1ф}$ і $U_{2ф} = E_{2ф}$. У результаті [5]:

$$k_ф = \frac{U_{1ф}}{U_{2ф}} = \frac{E_{1ф}}{E_{2ф}} = \frac{W_1}{W_2}, \tag{9.1}$$

де W_1 і W_2 – число витків обмоток ВН і НН.

Значення лінійного коефіцієнта трансформації визначається як співвідношення [5]:

$$k_л = \frac{U_{1л}}{U_{2л}}. \tag{9.2}$$

Якщо знехтувати активними та реактивними енергетичними втратами, то можна вважати, що $S_1 = S_2 \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2$. Із цього співвідношення отримуємо вираз для коефіцієнта трансформації, поданого через струми:

$$k_i = \frac{I_2}{I_1}. \tag{9.3}$$

Таким чином, первинна і вторинна напруги прямо пропорційні, а первинний і вторинний струми обернено пропорційні числам витків відповідних обмоток.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Методика вимірювання напруг для різних схем з'єднання обмоток передбачає таку послідовність дій. На первинну обмотку (ВН) при розімкненому колі вторинної обмотки подається напруга трифазної мережі змінного струму через індукційний регулятор (ІР) або автотрансформатор (АТ). При цьому величина напруги повинна становити 25…50 % від її номінального значення $U_{1н}$.

За допомогою вольтметра з відповідною межею вимірювання необхідно здійснити вимірювання фазних та лінійних напруг обмоток трифазного трансформатора для різних схем з'єднання (рис. 9.3). На основі отриманих даних та співвідношень (9.1) і (9.2) обчислюються значення фазного та лінійного коефіцієнтів трансформації $k_ф$ і $k_л$.

Усі результати вимірювань і розрахунків заносять до таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Результати вимірювань і розрахунків для визначення коефіцієнта трансформації трансформатора

Схема з'єднання обмоток	$\frac{U_{AB}}{U_{ab}}$	$\frac{U_{AX}}{U_{ax}}$	$k_л$	$k_ф$	$\frac{U_{BC}}{U_{bc}}$	$\frac{U_{BY}}{U_{by}}$	$k_л$	$k_ф$	$\frac{U_{CA}}{U_{ca}}$	$\frac{U_{CZ}}{U_{cz}}$	$k_л$	$k_ф$
Y/*Y*												
Y/Δ												
Δ/*Y*												

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову включення трифазного трансформатора для визначення коефіцієнта трансформації (рис. 9.3).

2. Технічні характеристики силового трансформатора, а також опис обладнання й вимірювальних приладів, застосованих під час проведення дослідів.

3. Заповнену таблицю 9.1, що містить результати експериментальних вимірювань та відповідні розрахункові значення.

4. Результати аналізу отриманих експериментальних результатів.

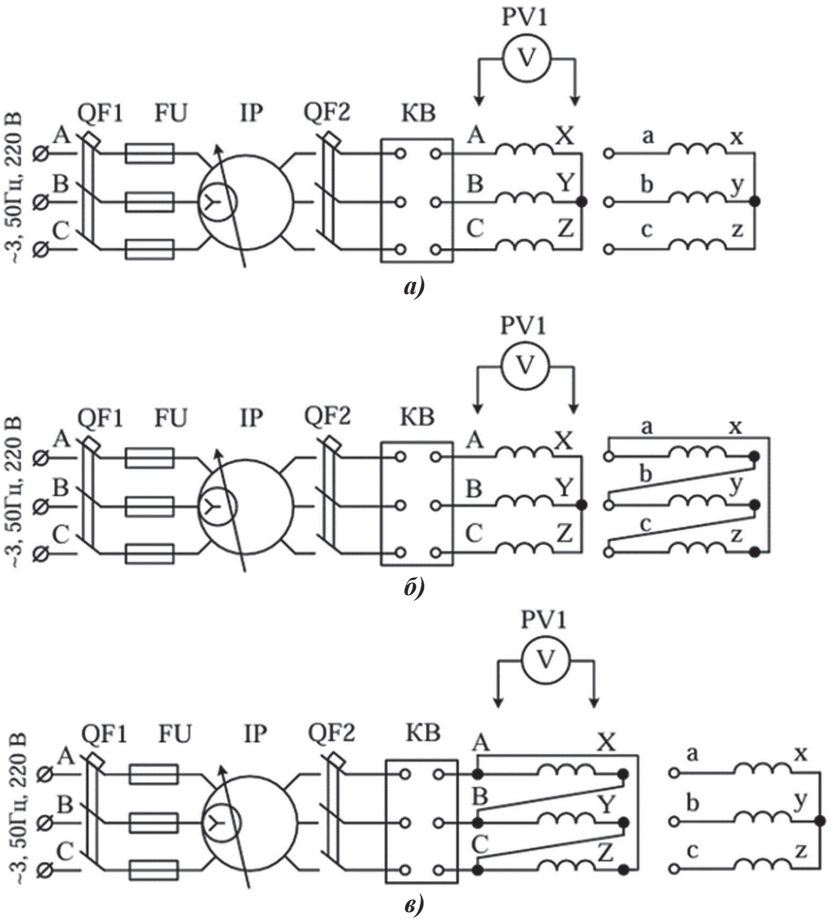


Рисунок 9.3 – Схеми електричні принципові для визначення коефіцієнта трансформації трансформатора при з'єднанні обмоток за схемами:

а *– Y/Y*; ***б*** *– Y/Δ*; ***в*** *– Δ/Y*

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які електричні схеми з'єднання обмоток трифазних силових трансформаторів існують?
2. Наведіть позначення виводів обмоток ВН і НН трифазних трансформаторів за стандартом.
3. Наведіть електричні схеми з'єднання обмоток трифазних силових трансформаторів.
4. Наведіть векторні діаграми ЕРС при різних електричних схемах з'єднання обмоток трифазних силових трансформаторів.
5. Які основні вимоги щодо вибору схеми обмоток трансформатора?
6. Які має переваги схема з'єднання фаз обмоток трансформатора «зірка»?
7. У чому переваги і недоліки схеми з'єднання фаз обмоток трансформатора «зигзаг»?
8. За яких особливостей роботи трансформатора обирають схему з'єднання фаз обмоток «трикутник»?
9. Наведіть і поясніть векторну діаграму ЕРС трифазного трансформатора при з'єднанні обмоток за схемою «зигзаг».
10. За яких особливостей роботи трансформатора обирають схему з'єднання фаз обмоток «зигзаг»?
11. Що називається коефіцієнтом трансформації трансформатора?
12. Які види коефіцієнтів трансформації існують та в чому полягає методика їх визначення?
13. Як визначити коефіцієнт трансформації через струми?
14. Наведіть методику дослідного визначення коефіцієнту трансформації трансформатора при різних схемах з'єднання обмоток ВН та НН.
15. Що таке оберненість трансформатора?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

ДОСЛІДНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ГРУПИ З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи

Засвоєння методики та набуття практичних навичок з експериментального визначення групи з'єднання обмоток трифазних силових трансформаторів за різних схем їхнього з'єднання.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 167–169, 215–217; 3, с. 141–149, 154–157; 4, с. 133–135, 154–160; 5, с. 86–89; 6, с. 45–50, 74–77] опрацювати теоретичний матеріал, що охоплює поняття групи з'єднання обмоток трансформатора.

2. Виконати тести з теми 5 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблицю для реєстрації, оброблення та подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з методикою експериментального визначення групи з'єднання обмоток трифазних силових трансформаторів за різних схем їх з'єднання.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для дослідження трансформатора. Записати паспортні дані досліджуваного трансформатора і вимірювальних приладів, використаними у роботі.

4. Виконати визначення групи з'єднання обмоток трансформатора за різних схем їх з'єднання.

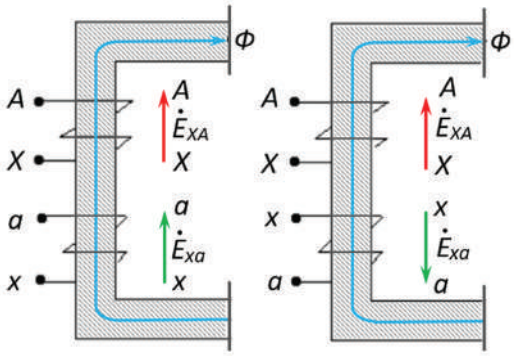
5. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

6. Виконати тести до лабораторної роботи № 10 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Під ***групою з'єднання обмоток*** трансформатора розуміють кут фазового зсуву між векторами лінійних ЕРС або напруг однойменних фаз його обмоток високої (ВН) та низької (НН) напруги. За одиницю фазового зсуву приймають кут 30° [3].

Розглянемо одну фазу трансформатора (рис. 10.1). ЕРС вважається додатною у випадку, коли її напрям спрямований від кінця обмотки до її початку. На рисунку 10.1,а обмотки ВН і НН намотані в одному напрямку, розташовані на спільному магнітопроводі та пронизуються однаковим магнітним потоком Ф. Відповідно, індуковані в них ЕРС у кожен момент часу мають однаковий напрям від кінців (*X*, *x*) до початків (*A*, *a*). Тому вектори ЕРС $\dot{E}_{XA}$ та $\dot{E}_{xa}$ є синфазними, тобто збігаються за фазою [4].



а) *б)*

Рисунок 10.1 – Визначення напрямку векторів ЕРС обмоток ВН і НН, які розташовані на одному стрижні

У разі зміни маркування затискачів вторинної обмотки на протилежне (рис. 10.1, б) між векторами ЕРС $\dot{E}_{XA}$ та $\dot{E}_{xa}$ виникає фазовий зсув у 180°. Таке саме взаємне розташування векторів спостерігатиметься і при збереженні однакового маркування затискачів, але за умови різного напрямку намотування обмоток. У подальшому

розглядаються трансформатори, у яких обмотки ВН і НН намотані в одному напрямку [4].

Таким чином, при розташуванні обмоток на одному стрижні вектори фазних ЕРС завжди будуть у фазі або в протифазі [5]:

– за однакового маркування затискачів вектори фазних ЕРС обмоток НН і ВН є синфазними (рис. 10.1, а);

– за протилежного маркування затискачів вектори фазних ЕРС обмоток ВН та НН зміщені один відносно одного на 180° (рис. 10.1, б).

В однофазному трансформаторі ЕРС первинної та вторинної обмоток можуть бути синфазними або зсунутими на 180°. Із двох теоретично можливих груп однофазних трансформаторів – I/I-0 та I/I-6 – у промисловому виробництві застосовується лише група I/I-0, для якої ЕРС первинної і вторинної обмоток збігаються за фазою [5].

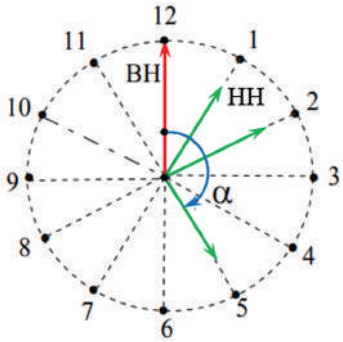


Рисунок 10.2 – Визначення групи з'єднання обмоток за циферблатом годинника

Кут фазового зсуву між векторами лінійних ЕРС додатково визначається схемою з'єднання фазних обмоток.

Для визначення фазового зсуву між векторами лінійних ЕРС обмоток використовується умовне графічне представлення у вигляді циферблата годинника (рис. 10.2). При цьому лінійний вектор ЕРС первинної обмотки (ВН) умовно приймають за хвилинну стрілку, яка завжди розташована на позначці «12». Лінійний вектор ЕРС обмотки НН розглядають як годинникову стрілку.

Номер групи визначають за величиною кута зсуву лінійного вектору ЕРС обмотки НН відносно вектору ЕРС обмотки ВН, відраховуючи його проти ходу годинникової стрілки та співвідносячи отриманий кут із мінімальною одиницею – 30° [6].

Отже, номер групи N дорівнює:

$$N = \frac{\alpha}{30^{\circ}}, \qquad (10.1)$$

де α – кут зсуву між векторами лінійних ЕРС обмотки ВЕ і НН.

У розглянутому випадку (рис. 10.1) були нульова на рисунку 10.1, а (0/30° = 0) і шоста на рисунку 10.1, б (180°/30° = 6) групи з'єднань обмоток.

Група з'єднання обмоток залежить від [8]:

– схеми з'єднання обмоток високої та низької напруги;

– прийнятого позначення (маркування) виводів обмоток трансформатора;

– напряму намотування обмоток трансформатора (за або проти годинникової стрілки).

Розглянемо приклади визначення номера групи з'єднання обмоток трансформатора [10].

1. Обмотки з'єднані за схемою $^{Y}\!/_{Y}$ (рис. 10.3).

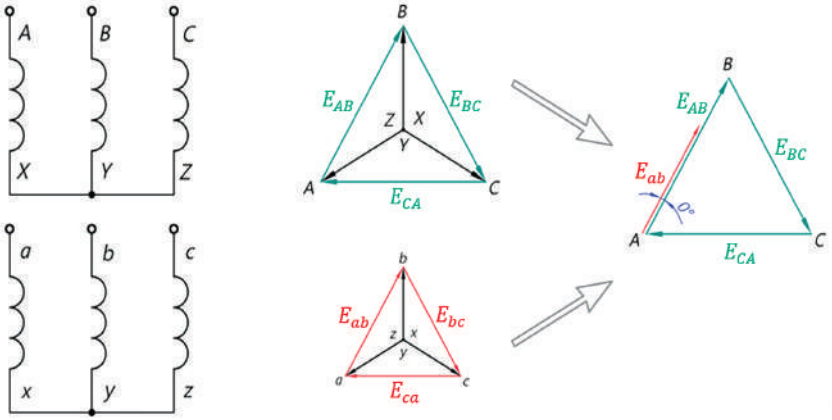


Рисунок 10.3 – Визначення групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора, з'єднаних за схемою *Y/Y*

Оскільки однойменні вектори U_{AB} і U_{ab} є синфазними, кут між ними становить 0°, а отже номер групи дорівнює:

$$N = \frac{0^o}{30^o} = 0.$$

У цьому випадку, повне позначення схеми з'єднання обмоток виглядатиме так: $^{Y}\!/_{Y} - 0$ (нульова група).

За умови використання цієї схеми з'єднання, виконання кругового перемаркування – тобто зміни місцями початків і кінців фаз – дає змогу отримати всі можливі парні групи.

2. Обмотки з'єднані за схемою Y/Y але проведене кругове перемаркування (рис. 10.4) [10].

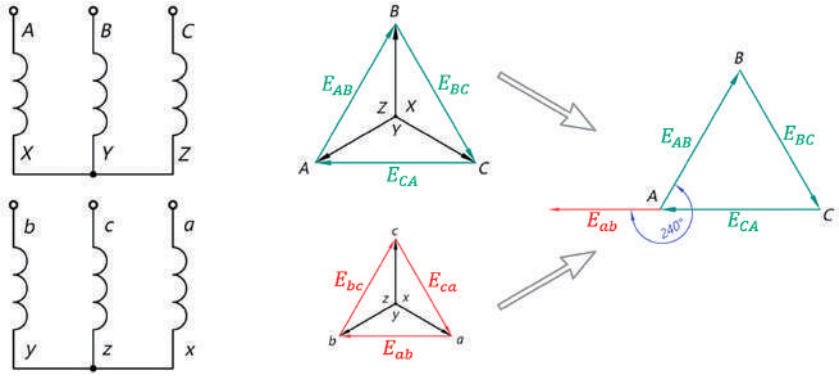


Рисунок 10.4 – Визначення групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора, з'єднаних за схемою *Y/Y* при круговому перемаркуванні

У цьому випадку кут між векторами U_{AB} і U_{ab} становить $\alpha = 240°$, отже номер групи дорівнює:

$$N = \frac{240°}{30°} = 8.$$

У цьому випадку повне позначення схеми з'єднання обмоток виглядатиме так: $Y/Y - 8$ (восьма група).

У разі з'єднання обмоток за схемою Y/Δ та виконання кругового перемаркування – тобто перестановки початків і кінців фаз – можливо отримати всі непарні групи з'єднання.

3. Обмотки з'єднані за схемою Y/Δ (рис. 10.5) [10].

У цьому випадку номер групи:

$$N = \frac{330°}{30°} = 11,$$

а позначення схеми з'єднання обмоток буде таким: Y/Δ.

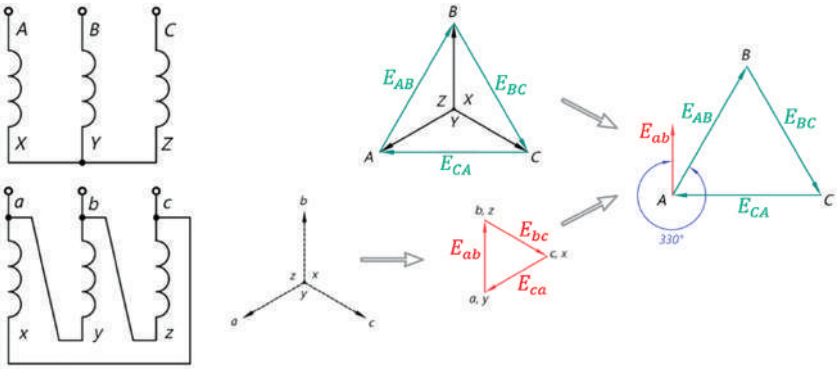


Рисунок 10.5 – Визначення групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора, з'єднаних за схемою *Y*/Δ

Зміна маркування виводів обмоток дає змогу отримати й інші групи з'єднання. Для схем $^{Y}/_{Y}$ та $^{\Delta}/_{\Delta}$ утворюються парні групи – друга, четверта тощо; для схем $^{\Delta}/_{Y}$, $^{Y}/_{\Delta}$ та $^{Y}/_{Z}$ – непарні групи, зокрема перша, третя і наступні.

Згідно з вимогами державного стандарту промисловість виготовляє трифазні силові трансформатори лише двох груп – нульової та одинадцятої, що значно спрощує їх паралельне включення в експлуатаційних умовах.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Для визначення групи з'єднання обмоток трансформатора застосовують ***метод вимірювання напруг*** за допомогою вольтметра. Принцип цього методу ґрунтується на тому, що величина напруги між однойменними первинними та вторинними затискачами трансформатора залежить від коефіцієнта трансформації та групи з'єднання його обмоток.

Схеми електричні принципові для визначення груп з'єднання обмоток трифазного трансформатора приведені на рисунку 10.6.

Експериментальне визначення групи здійснюється таким чином: на затискачі первинної обмотки подається симетрична трифазна напруга, після чого визначається лінійний коефіцієнт трансформації за співвідношенням [7]:

$$k_{л} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}}, \qquad (10.2)$$

де $U_{1л}$ – лінійна напруга на затискачах обмотки ВН;

$U_{2л}$ – лінійна напруга на затискачах обмотки НН.

Лінійна напруга обмотки ВН вимірюється вольтметром, що встановлений у комплекті вимірювальному (КВ) (рис. 10.6), лінійна напруга обмотки НН – вольтметром PV1.

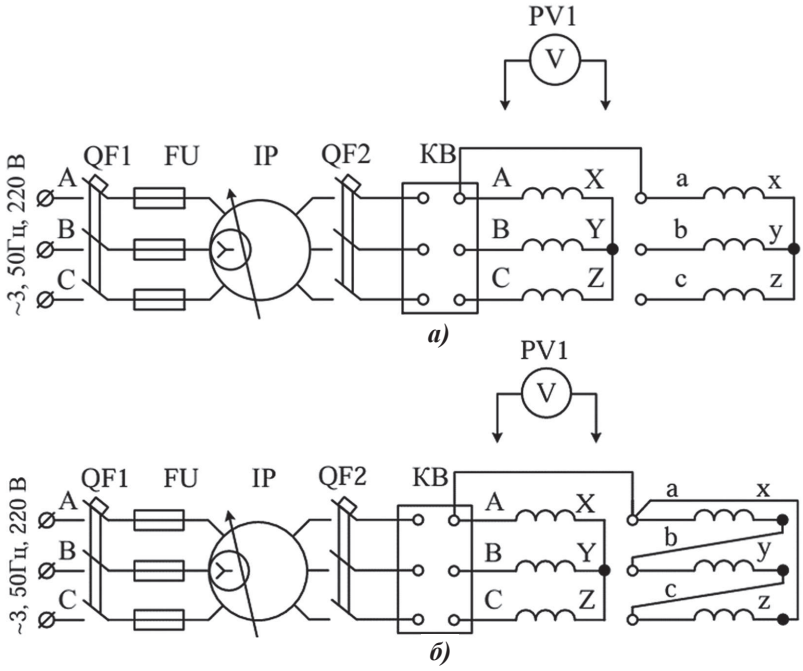


Рисунок 10.6 – Схеми електричні принципові для визначення груп з'єднання обмоток трансформатора за схемами: *Y*/*Y* (*а*) і *Y*/Δ (*б*)

Після цього електрично з'єднують два однойменні виводи трансформатора, наприклад «А» та «а». Далі виконують вимірювання напруг U_{bB}, U_{cB} та U_{cC}. Дослід проводиться для схем з'єднання обмоток Y/Y та Y/Δ (рис. 10.6). Отримані результати вимірювань заносять до таблиці 10.1.

Використовуючи спеціальну таблицю, наведену в ДОДАТКУ Ж [7], а також отримані експериментальні та розрахункові дані для вибраної схеми з'єднання обмоток, визначають групу з'єднання трансформатора.

Таблиця 10.1 – Дані вимірювань для визначення групи з'єднання

Схема з'єднання обмоток	U_{AB}	U_{ab}	U_{bB}	U_{cB}	U_{cC}	$k_л$
	В	**В**	**В**	**В**	**В**	**в.о.**
Y/Y						
Y/Δ						

Зокрема, для групи $Y/Y-0$ виміряні під час досліду напруги U_{bB} та U_{cC} повинні відповідати значенню напруги, визначеному за формулою [7]:

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{2л}\,(k_л - 1), \qquad (10.3)$$

де $U_{2л}$ – лінійна напруга на затискачах обмотки НН.

У цьому випадку виміряне значення напруги U_{cB} повинно перевищувати напругу U_{bB} за абсолютною величиною (див. таблицю ДОДАТКУ Ж).

Якщо наведена вище умови виконуються, то це група $Y/Y-0$, якщо не виконується, то розрахунок проводиться для групи 2 і схеми з'єднання обмоток трансформатора Y/Y і т. д. поки не виконається умова наведена у таблиці ДОДАТКУ И.

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схеми електричні принципові підключення трифазного трансформатора, призначені для визначення груп з'єднання його обмоток (рис. 10.6).

2. Технічні характеристики силового трансформатора, а також опис обладнання та вимірювальних приладів, використаних у ході дослідів.

3. Заповнену таблицю 10.1 з результатами вимірювань, необхідними для визначення групи з'єднання.

4. Визначений номер групи з'єднання обмоток трансформатора для різних схем їх з'єднання.

5. Результати аналізу отриманих експериментальних результатів.

6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть, що розуміють під групою з'єднання обмоток трансформатора?

2. Від чого залежить група з'єднання обмоток силового трансформатора?

3. З якими схемами з'єднання обмоток випускаються трансформатори промисловістю?

4. При визначені групи з'єднання обмоток, за одиницю кута зсуву по фазі приймають який кут?

5. Як розрахувати групу з'єднання обмоток трансформатора?

6. У чому сутність визначення групи з'єднання обмоток за циферблатом годинника?

7. За яких схем з'єднання обмоток можна отримати парні групи?

8. За яких схем з'єднання обмоток можна отримати непарні групи?

9. Які теоретично можливі групи у однофазних трансформаторів?

10. Як визначається лінійний коефіцієнт трансформації?

11. Зміна місцями початків і кінців фаз (кругове перемаркування) при схемах з'єднання Y/Y та Δ/Δ дає змогу отримати які групи?

12. Зміна місцями початків і кінців фаз (кругове перемаркування) при схемах з'єднання Δ/Y, Y/Δ та Y/Z дає змогу отримати які групи?

13. У чому полягає принцип метод вимірювання напруг?

14. Поясніть методику дослідного визначення групи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів.

15. Який прилад використовують при визначенні групи з'єднання обмоток?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

ДОСЛІД ХОЛОСТОГО ХОДУ ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи

Засвоєння методики та формування практичних навичок виконання досліду х.х. силового трансформатора, а також побудови характеристик, визначення параметрів і енергетичних показників, що характеризують роботу трансформатора в режимі х.х.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 179–182; 3, с. 158–159; 4, с. 121–126, 135–137; 5, с. 92; 6, с. 36–38, 51–54] опрацювати теоретичний матеріал, що стосується характеристик трифазних стрижневих трансформаторів у режимі х.х.

2. Виконати тести з теми 5 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблицю для реєстрації, оброблення та подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з типовою методикою виконання досліду х.х. трансформатора та порядком обробки експериментальних результатів.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для дослідження трансформатора в режимі х.х. Записати паспортні дані досліджуваного трансформатора і вимірювальних приладів, використаними у роботі.

4. Змонтувати схему електричну принципову випробування трансформатора в режимі х.х. та провести дослід відповідно до типової методики.

5. Опрацювати експериментальні дані та на основі їх аналізу надати обґрунтоване пояснення результатів досліду.

6. Побудувати х.х.х. трансформатора за отриманими дослідними даними.

7. Визначити параметри схеми заміщення трансформатора на основі результатів досліду х.х.

8. Розрахувати магнітні втрати, струм х.х. та коефіцієнт трансформації.

9. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

10 Виконати тести до лабораторної роботи № 11 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

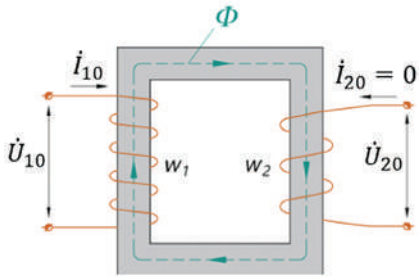


Рисунок 11.1 – Режим х.х. в однофазному трансформаторі

Режим х.х. трансформатора реалізується за умови, коли до виводів його первинної обмотки підводять змінну напругу U_{10}, у той час як вторинна обмотка залишається розімкненою (рис. 11.1). У такому режимі струм у вторинній обмотці дорівнює нулю $I_{20} = 0$, тоді як струм, що протікає через первинну обмотку, називається ***струмом холостого ходу*** і позначається як I_{10} [3].

МРС х.х. $F_{10} = I_{10}W_1$ створює в магнітопроводі трансформатора основний магнітний потік, максимальне значення якого визначається за такою залежністю [3]:

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}F_{10}}{R_\mu} = \frac{\sqrt{2}I_{10}W_1}{R_\mu}, \qquad (11.1)$$

де R_μ – магнітний опір магнітопроводу;

W_1 – кількість витків у первинній обмотці.

Унаслідок синусоїдальної зміни магнітного потоку ($\Phi = \Phi_m \sin \omega t$), магнітопровід трансформатора зазнає періодичного

перемагнічування. Це зумовлює виникнення активних енергетичних втрат у пластинах електротехнічної сталі, які отримали назву ***магнітних втрат***. Останні поділяються на дві основні складові: ***втрати на гістерезис*** та ***втрати від вихрових струмів*** [4].

Потужність цих активних втрат еквівалентна активній складовій струму х.х. I_{10a}. Реактивна складова струму х.х. являє собою струм намагнічування $I_{10p} = I_{\mu}$, який витрачається на створення магнітного потоку в магнітопроводі [4].

Загальний струм х.х. визначається як [4]:

$$I_{10} = \sqrt{I_{10a}^2 + I_{10p}^2}. \qquad (11.2)$$

Активна складова струму х.х., як правило, не перевищує 10 % від його повного значення I_{10}. Реактивна складова струму х.х., тобто струм намагнічування I_{μ}, може бути визначена шляхом розрахунку магнітного кола трансформатора. На основі результатів такого розрахунку також можливо побудувати магнітну характеристику трансформатора у вигляді залежності$\Phi = f(I_{\mu})$ [5].

Метою проведення досліду х.х. є [4]:

1) побудова характеристик х.х. трансформатору;
2) визначення параметрів х.х. трансформатору;
3) визначення магнітних втрат в трансформаторі;
4) визначення коефіцієнта трансформації трансформатора.

Методика виконання досліду х.х. трансформатора полягає в наступному. На первинну обмотку подається регульована напруга змінного струму за умови розімкненої вторинної обмотки. Частота живлення підтримується на номінальному рівні $f_{1н} = 50$ Гц. У процесі досліду напругу, що підводиться до первинної обмотки, змінюють у діапазоні $U_{10} = (0{,}25\ldots1{,}25)U_{1ном}$. Для кожного встановленого значення напруги проводяться вимірювання струму та потужності х.х. в окремих фазах трансформатора. Зазвичай знімається 5…6 експериментальних точок, причому обов'язково виконується вимірювання при номінальній напрузі, тобто за умови $U_{10} = U_{1ном}$. На основі отриманих даних визначається коефіцієнт потужності х.х. $\cos\varphi_{10}$ для всіх значень прикладеної напруги, після чого будуються характеристики х.х. трансформатора [4].

Характеристиками х.х. трансформатора називають графічні залежності:

$$I_{10} = f(U_{10});\ P_{10} = f(U_{10});\ \cos\varphi_{10} = f(U_{10}) \text{ при } I_2 = 0.$$

На рисунку 11.2 у відносних одиницях подано характеристики х.х. типового трансформатора. Їхній криволінійний характер зумовлений ступенем насичення магнітопроводу. Детальніше форму та поведінку цих характеристик можна пояснити таким чином [5]:

1. Залежність $I_{10} = f(U_{10})$ за своєю формою подібна до кривої намагнічування електротехнічної сталі $H = f(B)$. Це пов'язано з тим, що струм х.х. практично дорівнює струму намагнічування $I_{10} = I_{\mu}$, а напруга первинної обмотки в режимі х.х. пропорційна ЕРС цієї обмотки: $U_{10} \approx E_{10} \sim \Phi \sim B$ (де E_{10} – ЕРС первинної обмотки в режимі х.х.; Ф – магнітний потік в магнітопроводі трансформатора; B – магнітна індукція в трансформаторі в режимі х.х.).

2. Активна потужність у режимі х.х. P_{10} майже повністю витрачається на покриття магнітних втрат у магнітопроводі, тобто втрат на гістерезис та втрат від вихрових струмів. За умови слабкого насичення магнітопроводу ці втрати можна вважати такими, що

$$P_{10} \approx B^2 f_1^{1,25}.$$

При незмінній частоті $\left(f_1 = 50\ \text{Гц}\right)$, індукція пропорційна напрузі, тому

$$P_{10} \approx B^2 \sim \Phi^2 \sim E_{10}^2 \sim U_{10}^2.$$

Відповідно, залежність $P_{10} = f(U_{10})$ за своєю формою наближується до ***параболічної*** у випадку відсутності насичення магнітопроводу (ділянка, де криві $H = f(B)$ та $I_{10} = f(U_{10})$ є лінійними), та до ***гіперболічної –*** за умов наявності насичення [5].

За номінальної напруги $U_{10} = U_{1\text{ном}}$ величина магнітної індукції в осерді трансформатора зазвичай знаходиться в межах $B = (1{,}5 \ldots 1{,}65)$ Тл [6].

3. Коефіцієнт потужності трифазного трансформатора визначається за формулою [7]:

$$\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{\sqrt{3} U_{10} I_{10}}. \qquad (11.3)$$

Оскільки, як було зазначено вище, $P_{10} \sim U_{10}^2$, то можна вважати, що

$$\cos\varphi_{10} \sim \frac{U_{10}^2}{\sqrt{3} U_{10} I_{10}} \sim \frac{U_{10}}{\sqrt{3} I_{10}}.$$

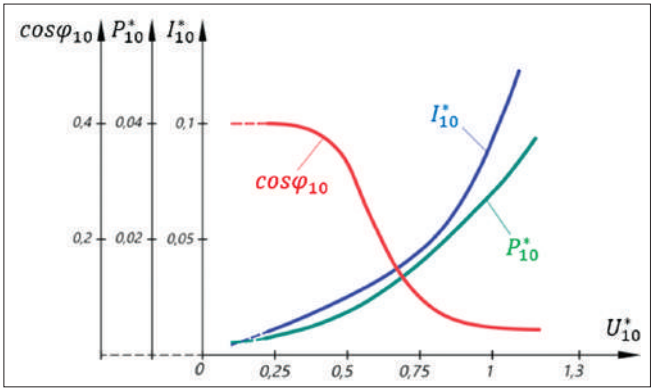


Рисунок 11.2 – Характеристики х.х. трансформатора

Отже, за малих значень прикладеної напруги магнітопровід перебуває в режимі ненасичення, унаслідок чого збільшення U_{10} супроводжується пропорційним зростанням струму х.х. I_{10}, що відповідає лінійній ділянці кривої намагнічування. У цьому діапазоні значення коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{10}$ практично залишається сталим. Починаючи з певного рівня напруги, магнітопровід переходить у режим насичення, внаслідок чого струм I_{10} збільшується швидше, ніж напруга U_{10}. Тому на цій ділянці відбувається зменшення коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{10}$ [8].

Під ***параметрами х.х.*** трансформатора розуміють його активний, індуктивний та повний опори (R_0, X_0 і Z_0), визначеними за результатами досліду х.х. Розрахункові вирази для визначення цих параметрів можуть бути отримані на основі спрощених схем заміщення трансформатора в режимі х.х. (рис. 11.3), сформованих на основі точної схеми заміщення [4].

Відповідно до рисунку 11.3, в:

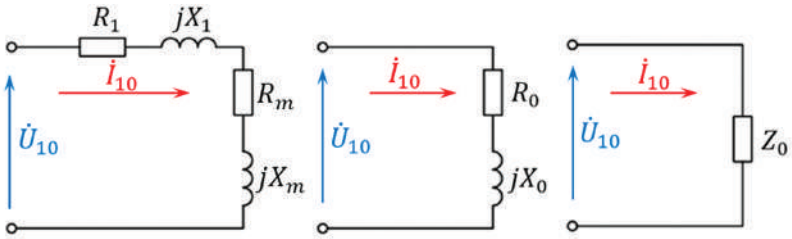
$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}, \tag{11.4}$$

при цьому $Z_0 = R_0 + jX_0$.

Із схеми на рисунку 11.3, б виходить, що активний опір х.х. трансформатора дорівнює [4]:

$$R_0 = \frac{P_{10}}{3I_{10}^2}, \tag{11.5}$$

при цьому $R_0 = R_1 + R_m$, де R_1 – активний опір первинної обмотки; R_m – активний опір гілки намагнічування, що враховує магнітні втрати в магнітопроводі трансформатора.



а – точна; ***б*** – розрахункова; ***в*** – спрощена

Рисунок 11.3 – Схеми заміщення трансформатора в досліді х.х.

Значення індуктивного опору х.х. визначається за відомим співвідношенням [4]:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \qquad (11.6)$$

Відповідно до стандарту, за величину ***магнітних втрат*** у трансформаторі приймають потужність х.х. P_{10}, виміряну при номінальному значенні прикладеної напруги $U_{10} = U_{1ном}$. Таким чином, у досліді х.х. потужність магнітних втрат $\Delta P_{мг}$ визначається як [5]:

$$\Delta P_{мг} = P_{10ном},$$

де $P_{10ном}$ – активна потужність, що споживається трансформатором в режимі х.х. при $U_{1ном}$.

Значення потужності $P_{10ном}$, що відповідає номінальній напрузі, наводиться в паспорті силового трансформатора. Магнітні втрати належать до сталих втрат, тобто таких, що не залежать від струмів навантаження трансформатора [5].

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Схема електрична принципова випробування трансформатора в режимі х.х. подана на рисунку 11.4. Під час виконання лабораторної роботи слід змонтувати схему електричну принципову та зафіксувати паспортні дані вимірювальних приладів і електричних машин, що застосовуються в досліді.

4.1 Методика проведення досліду х.х. трансформатора

Схема електрична принципова підключення трансформатора у досліду х.х. наведена на рисунку 11.4. Первинна обмотка через індукційний регулятор напруги (ІР) під'єднується до мережі змінного струму, тоді як вторинна обмотка залишається розімкненою. Підведена до первинної обмотки напруга регулюється в діапазоні $U_{10} = (0{,}25\ldots1{,}25)U_{1\text{ном}}$, яка вимірюється вольтметром, що встановлений у комплекті вимірювальному (КВ).

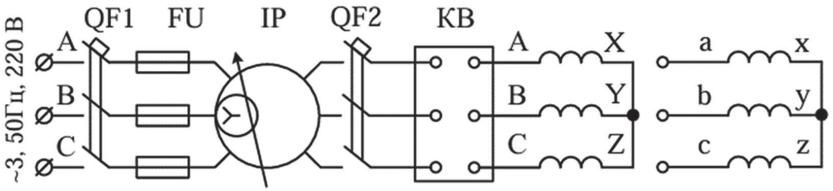


Рисунок 11.4 – Схема електрична принципова дослідження трансформатора в режимі х.х.

Для кожного значення прикладеної напруги здійснюються вимірювання струмів та потужності х.х. у фазах трансформатора, після чого отримані дані заносяться до таблиці 11.1. Загалом фіксується 5…6 експериментальних точок. Обов'язковим є проведення вимірювання при номінальній напрузі ($U_{10} = U_{1\text{ном}}$). На основі експериментальних даних визначається коефіцієнт потужності х.х. ($\cos\varphi_{10}$) для всіх значень напруги, а також будуються відповідні характеристики х.х. трансформатора.

У таблиці 11.1 значення U_{10}, I_{10}, P_{10} та $\cos\varphi_{10}$ обчислюються згідно з установленими формулами [7]:

$$U_{10} = \frac{1}{3}\left(U_{0A} + U_{0B} + U_{0C}\right); \tag{11.7}$$

$$I_{10} = \frac{1}{3}\left(I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}\right); \tag{11.8}$$

$$P_{10} = P_{0A} + P_{0B} + P_{0C}; \tag{11.9}$$

$$\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{3U_{10}I_{10}}. \tag{11.10}$$

Таблиця 11.1 – Експериментальні та розрахункові дані досліду х.х.

№ досліду	U_{0A}	U_{0B}	U_{0C}	U_{10}	I_{0A}	I_{0B}	I_{0C}	I_{10}	P_{0A}	P_{0B}	P_{0C}	P_{10}	$\cos\varphi_{10}$
	В	В	В	В	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	в.о.
1													
2													
3													
4													
5													
6													

4.2 Побудова характеристик х.х. трансформатора

Х.х.х. будуються за даними наведеними у таблиці 11.1. Приблизний вигляд х.х.х. трансформатора представлено на рисунку 11.2.

4.3 Визначення параметрів х.х. трансформатора

Параметри х.х. трансформатора розраховуються за рівняннями (11.4)–(11.6). Розрахунок параметрів R_0, X_0, Z_0 виконується тільки для номінальної точки ($U_{10} = U_{1ном}$).

4.4 Визначення потужності магнітних втрат в трансформаторі

Потужність магнітних втрат в трансформаторі $\Delta P_{мг}$ визначається в досліді х.х. шляхом розрахунку за (11.9) потужності P_{10} при живленні трансформатора номінальною напругою ($U_{10} = U_{1ном}$).

4.5 Визначення струму х.х. трансформатора

Струм х.х. трансформатора визначається шляхом розрахунку за (11.8) при напрузі $U_{10} = U_{1ном}$. Зазвичай струм х.х. трансформатора прийнято виражати у відсотках від номінального значення струму трансформатора $I_{1ном}$ [7]:

$$i_{0\%} = \frac{I_{10}}{I_{1ном}} 100\ \%, \qquad (11.11)$$

де $I_{1н}$ – номінальний струм первинної обмотки трансформатора, який дорівнює:

$$I_{1н} = \frac{S_{ном}}{3U_{1ном}} 100\ \%, \qquad (11.12)$$

де $S_{ном}$ – повна номінальна потужність трансформатора, що задається в його паспорті.

Значення струму х.х. $i_{0\%}$ силових трансформаторів приводиться в паспортних даних і знаходиться у межах $i_{0\%} = 2…3\ \%$ для трансформаторів малої потужності [4].

4.6 Визначення коефіцієнта трансформації трансформатора

Фазний коефіцієнт трансформації трансформатора за даними досліду х.х. визначається співвідношенням [7]:

$$k_{\text{ф}} = \frac{U_{10}}{U_{20}}, \tag{11.13}$$

де U_{10} – первинна напруга х.х. трансформатора визначена за (11.7);

U_{20} – фазна напруга вторинної обмотки на х.х. трансформатора.

При цьому величина $k_{\text{ф}}$ визначається при значенні $U_{10} \le 0{,}5U_{1\text{ном}}$.

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову дослідження трансформатора в режимі х.х. (рис. 11.4).
2. Технічні характеристики випробуваного силового трансформатора, а також перелік обладнання та вимірювальних приладів, застосованих під час досліду х.х.
3. Заповнену таблицю 11.1 із результатами експериментальних вимірювань і проведених розрахунків.
4. Х.х.х. трансформатора, побудовані за даними експерименту, з поясненням фізичного сенсу та форми кожної характеристики.
5. Розраховані параметри схеми заміщення трансформатора в режимі х.х.
6. Визначену величину магнітних втрат у режимі х.х.
7. Значення струму х.х. трансформатора, наведене у відсотках $i_{0\%}$
8. Результати аналізу отриманих експериментальних результатів.

6 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть, що означає режим х.х. силового трансформатора?
2. Яка мета проведення досліду х.х. трансформатора?
3. У чому сутність методики проведення досліду х.х. трансформатора?
4. Що називають х.х.х. силового трансформатора і який їх вигляд?

5. Наведіть та поясніть схеми заміщення трансформатора в досліді х.х.

6. Поясніть, які опори називають параметрами х.х. трансформатора?

7. Який фізичний сенс параметрів х.х. трансформатора?

8. Наведіть методику визначення параметрів х.х. трансформатора за даними досліду х.х.

9. Яка потужність за стандартом приймається за потужність магнітних втрат трансформатора?

10. З якої причини магнітні втрати відносять до сталих (незмінних) втрат трансформатора?

11. Що називається коефіцієнтом потужності х.х. силового трансформатора і яке його приблизне значення при номінальній напрузі?

12. Поясніть, на що витрачається активна (P_{10}) та реактивна (Q_{10}) потужності, споживані трансформатором в режимі х.х.?

13. Наведіть методику визначення струму х.х. трансформатора та його приблизну величину у відсотках.

14. Яка причина обов'язкового проведення в досліді х.х. трансформатора експерименту при номінальному значенні напруги?

15. Дайте визначення, що називається коефіцієнтом трансформації трансформатора і як його визначити дослідним шляхом?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

ДОСЛІД КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи

Опанування методики та закріплення практичних навичок виконання досліду к.з. силового трансформатора, а також побудова характеристик, визначення параметрів та енергетичних показників, що характеризують його роботу в режимі к.з.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 182–188; 3, с. 160–161; 4, с. 137–142; 5, с. 90–91; 6, с. 54–58] опрацювати теоретичний матеріал, що стосується особливостей роботи трифазних стрижневих трансформаторів у режимі к.з.

2. Виконати тести з теми 5 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблицю для реєстрації, оброблення та подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з типовою методикою проведення досліду к.з. трансформатора та порядком обробки експериментальних результатів.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для дослідження трансформатора в режимі к.з. Записати паспортні дані досліджуваного трансформатора і вимірювальних приладів, використаними у роботі.

4. Змонтувати схему електричну принципову випробування трансформатора в режимі к.з. та провести дослід відповідно до типової методики.

5. Опрацювати експериментальні дані та на основі їх аналізу надати обґрунтоване пояснення результатів досліду.

6. Побудувати х.к.з. трансформатора за отриманими дослідними даними.

7. Визначити параметри схеми заміщення трансформатора на основі результатів досліду к.з.

8. Розрахувати електричні втрати та напругу к.з. трансформатора.

9. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

10 Виконати тести до лабораторної роботи № 12 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Характеристики режиму к.з. отримують на основі досліду к.з., який проводять за умови замикання вторинної обмотки, тоді як на первинну обмотку подається напруга к.з. [3].

Під ***напругою к.з.*** розуміють таке мінімальне значення напруги, яке необхідно підвести до первинної обмотки при замкненій вторинній, щоб у обох обмотках протікали номінальні струми. Зазвичай напруга к.з. $U_{1к}$ становить приблизно 5…10 % від номінальної напруги первинної обмотки $U_{1ном}$ [3].

Мета проведення досліду к.з. трансформатора [4]:

1) побудова характеристик к.з. трансформатору;
2) визначення параметрів к.з. трансформатору;
3) визначення електричних втрат в трансформаторі;
4) визначення напруги короткого замикання трансформатора.

Методика проведення досліду к.з. трансформатора передбачає таку послідовність дій. В досліді к.з. знижена напруга, що підводиться до первинної обмотки, змінюється в таких межах, щоб струм к.з. дорівнював $I_{1к} = (0{,}5…1{,}5)I_{1ном}$. Як правило, знімають 5…6 експериментальних точок.

Для кожного встановленого значення струму к.з. $I_{1к}$ здійснюються вимірювання фазних струмів, потужностей к.з. $P_{1к}$ та напруг $U_{1к}$. Обов'язковим є проведення вимірювань при номінальному значенні струму, тобто за умови $I_{1к} = I_{1ном}$.

На основі отриманих експериментальних даних обчислюють коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{1к}$ для всіх значень струму $I_{1к}$, після чого будують характеристики к.з. трансформатора [5].

Характеристиками к.з. трансформатора називають графічні залежності:

$$I_{1к} = f\left(U_{1к}\right);\ P_{1к} = f\left(U_{1к}\right);\ \cos\varphi_{1к} = f\left(U_{1к}\right) \text{ при } U_2 = 0\,.$$

На рисунку 12.1 подано характеристики к.з. типового трансформатора, виражені у відносних одиницях. Вигляд наведених залежностей можна пояснити таким чином [5]:

1. Струм к.з. $I_{1к}$ визначається рівнянням:

$$I_{1к} = \frac{U_{1к}}{Z_к}, \qquad (12.1)$$

де $Z_к$ – повний опір к.з. трансформатора, і має лінійний характер, оскільки активний опір обмоток трансформатора не змінюється зі зміною прикладеної напруги. За сталої температури величина активного опору к.з. $R_к$ залишається сталою. Крім того, індуктивний опір первинної обмотки X_1 та приведений індуктивний опір вторинної обмотки $X_2^{'}$, що визначаються потоками розсіювання, які замикаються у повітрі, також є практично сталими ($X_к$ = const (індуктивний опір к.з. трансформатора)). Відповідно, повний опір к.з. зберігається незмінним ($Z_к$ = const).

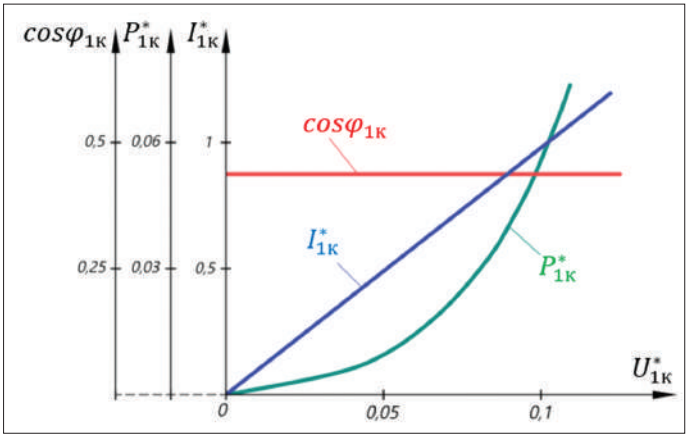


Рисунок 12.1 – Характеристики к.з. трансформатора

2) Активна потужність (втрати) у режимі к.з. $P_{1к}$ є величиною, пропорційною квадрату прикладеної напруги, оскільки:

$$P_{1к} = 3I_{1к}^2 \cdot R_к,\ P_{1к} \sim I_{1У}^2 \sim U_{1к}^2, \qquad (12.2)$$

у зв'язку з цим залежність $P_{1к} = f\ (U_{1к})$ має ***параболічний*** характер.

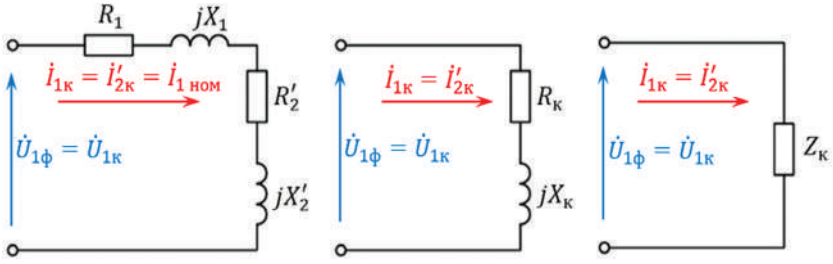
3) Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{1к}$ у режимі к.з. залишається практично незмінним за умови, що параметри обмоток трансформатора не змінюються:

$$\cos\varphi_{1к} = \frac{P_{1к}}{3U_{1к} \cdot I_{1к}} = \frac{3I_{1к}^2 \cdot R_к}{3U_{1к} \cdot I_{1к}} = \frac{I_{1к} \cdot R_к}{U_{кф}} = \frac{R_к}{Z_к} = \text{const}. \qquad (12.3)$$

Зазвичай значення $\cos\varphi_{1к}$ знаходиться в межах 0,4…0,5.

Параметрами к.з. трансформатора називають його активний, індуктивний та повний опори к.з. трансформатора: $R_к$, $X_к$ і $Z_к$, визначені за результатом досліду к.з.[8].

Схема заміщення трансформатора в режимі к.з. наведена на рисунку 12.2. Оскільки напруга к.з. $U_{1к}$ має дуже мале значення, відповідно, і величина основного магнітного потоку Ф є незначною. Для формування такого мінімального магнітного потоку потрібний настільки малий струм намагнічування I_μ, що ним можна знехтувати, тобто $I_\mu \to 0$.



а) ***б)*** ***в)***

а – точна; ***б*** – розрахункова; ***в*** – спрощена

Рисунок 12.2 – Схеми заміщення трансформатора у досліді к.з.

Відповідно, опір гілки намагнічування можна вважати $Z_m \to \infty$. Тоді струми обмоток $I_{1к} = I'_{2к} = I_{1\,ном}$, (де $I'_{2к}$ – приведений струм к.з. вторинної обмотки) [9].

Отже, результати досліду к.з. дозволяють аналітично визначити основні параметри к.з. трансформатора [7]:

$$Z_{\text{к}} = R_{\text{к}} + jX_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{к}}}{I_{1\text{к}}}; \tag{12.4}$$

$$R_{\text{к}} = \frac{P_{1\text{к}}}{3I_{1\text{к}}^2}; \tag{12.5}$$

$$X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2}. \tag{12.6}$$

На підставі отриманих значень параметрів к.з. можливе подальше визначення відповідних параметрів обмоток трансформатора [7]:

$$R_{\text{к}} = R_1 + R_2^{'}; \tag{12.7}$$

$$X_{\text{к}} = X_1 + X_2^{'}. \tag{12.8}$$

Параметри к.з. розраховуються для значень $P_{1\text{к}}$ і $U_{1\text{к}}$ при $I_{1\text{к}} = I_{1\text{ном}}$ [9].

Електричні втрати в трансформаторі належать до категорії змінних втрат. Каталожні дані силових трансформаторів містять значення потужності $P_{1\text{к ном}}$. Згідно з чинним стандартом, за величину електричних втрат приймається потужність к.з. $P_{1\text{ном}}$, виміряна при струмі к.з., що дорівнює номінальному значенню, тобто за умови $I_{1\text{к}} = I_{1\text{ном}}$. При цьому [10]:

$$\Delta P_{\text{e1}} = mI_1^2 R_1;\ \Delta P_{\text{e2}} = m\left(I_2^{'}\right)^2 R_2^{'} = mI_2^2 R_2;\ P_{\text{к ном}} = mI_{1\text{ном}}^2 R_{\text{к}}, \tag{12.9}$$

де m – число фаз трансформатора.

Напругою к.з. трансформатора називають таку напругу $U_{1\text{к}}$, яку необхідно подати на первинну обмотку за умови замкненої накоротко вторинної обмотки, щоб забезпечити протікання номінальних струмів у його обмотках ($I_{1\text{к}} = I_{1\text{ном}}$) [5].

Зазвичай значення напруги к.з. подається у відсотковому відношенні до номінальної напруги первинної обмотки трансформатора [5]:

$$u_{\text{к}\%} = \frac{U_{1\text{к}}}{U_{1\text{ ном}}} \cdot 100\ \%. \tag{12.10}$$

Значення напруги к.з. силових трансформаторів зазвичай лежить у діапазоні $u_{\text{к}\%} = 3\ldots8\ \%$. Цей параметр наводиться в паспортних даних трансформатора та належить до ключових показників, що визначають його експлуатаційні характеристики.

Напруга к.з. може бути подана у вигляді активної ($u_{ка\%}$) та реактивної ($u_{кр\%}$) складових, що відображають відповідно внесок активного та індуктивного опорів у величину повної напруги к.з. трансформатора [7]:

$$u_{к\%} = \sqrt{u_{ка\%}^2 + u_{кр\%}^2}. \tag{12.11}$$

При цьому

$$u_{ка\%} = u_{к\%} \cdot \cos\varphi_{1к},\ u_{кр\%} = u_{к\%} \cdot sin\varphi_{1к}. \tag{12.12}$$

Крім того, величина напруги к.з., а також її активна та реактивна складові можуть бути визначені через параметри к.з. трансформатора на основі таких аналітичних співвідношень [7]:

$$u_{к\%} = \frac{I_{1ном} \cdot Z_к}{U_{1ном}} \cdot 100\ \%; \tag{12.13}$$

$$u_{ка\%} = \frac{I_{1ном} \cdot R_к}{U_{1ном}} \cdot 100\ \%; \tag{12.14}$$

$$u_{кр\%} = \frac{I_{1ном} \cdot X_к}{U_{1ном}} \cdot 100\ \%. \tag{12.15}$$

У формулах (12.13)–(12.15) $U_{1ном}$ – це фазна номінальна напруга.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Схема електрична принципова випробування трансформатора в режимі к.з. подана на рисунку 12.3. Під час виконання лабораторної роботи слід змонтувати схему електричну принципову та зафіксувати паспортні дані вимірювальних приладів і електричних машин, що застосовуються в досліді.

4.1 Методика проведення досліду к.з. трансформатора

Первинна обмотка трансформатора через індукційний регулятор напруги ІР під'єднується до мережі змінного струму з напругою, значно нижчою за номінальну. Вторинна обмотка при цьому замкнена накоротко. Підведену до первинної обмотки напругу змінюють у таких межах, щоб струм к.з. у первинному колі становив $I_{1к} = (0{,}5\ldots1{,}5)I_{1ном}$. Зазвичай знімають 5…6 експериментальних точок. Для кожного значення струму $I_{1к}$ проводять вимірювання фазних

струмів, потужностей к.з. $P_{1к}$ та напруг $U_{1к}$. Обов'язковою є реєстрація вказаних величин при $I_{1к} = I_{1ном}$. На основі отриманих даних обчислюють коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{1к}$ для всіх значень струму та будують характеристики к.з. трансформатора. Усі результати вимірювань і розрахунків заносять до таблиці 12.1.

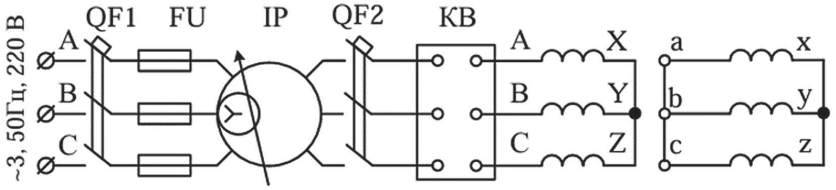


Рисунок 12.3 – Схема електрична принципова дослідження трансформатора в режимі к.з.

У таблиці 12.1 величини $U_{1к}$, $I_{1к}$, $P_{1к}$ і $\cos\varphi_{1к}$ визначаються за формулами [7]:

$$U_{1к} = \frac{1}{3}\left(U_{кA} + U_{кB} + U_{кC}\right). \tag{12.16}$$

$$I_{1к} = \frac{1}{3}\left(I_{кA} + I_{кB} + I_{кC}\right). \tag{12.17}$$

$$P_{1к} = P_{кA} + P_{кB} + P_{кC}. \tag{12.18}$$

$$\cos\varphi_{1к} = \frac{P_{1к}}{3U_{1к}I_{1к}}. \tag{12.19}$$

Таблиця 12.1 – Експериментальні та розрахункові дані досліду к.з.

№ досліду	$U_{кA}$	$U_{кB}$	$U_{кC}$	$U_{1к}$	$I_{кA}$	$I_{кB}$	$I_{кC}$	$I_{1к}$	$P_{кA}$	$P_{кB}$	$P_{кC}$	$P_{1к}$	$\cos\varphi_{1к}$
	В	В	В	В	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	в.о.
1													
2													
3													
4													
5													
6													

4.2 Побудова характеристик к.з. трансформатора

Характеристики к.з. трансформатора будуються на основі експериментальних даних, поданих у таблиці 12.1. Орієнтовний графічний вигляд характеристик к.з. трансформатора наведено на рисунку 12.1.

4.3 Визначення параметрів к.з. трансформатора

Параметри к.з. трансформатора розраховуються за рівняннями (12.4)–(12.6). Розрахунок параметрів $R_к$, $X_к$, $Z_к$ виконується тільки для номінальної точки ($I_{1к} = I_{1ном}$).

4.4 Визначення параметрів схеми заміщення трансформатора

До параметрів схеми заміщення трансформатора відносяться опори: R_1, X_1, Z_1, R_2', X_2', Z_2', R_m, X_m, Z_m.

Зазвичай при аналізі роботи трансформатору використовують симетричну схему заміщення, вважаючи, що $Z_1 = Z_2' = 0,5Z_к$. Це припущення дуже близько до реального припущення і не вносить помітних похибок в розрахунки [3].

Згідно (12.7), (12.8) $R_к = R_1 + R_2'$ і $X_к = X_1 + X_2'$, то виходячи з вищенаведеного припущення приймаємо, що

$$R_1 = R_2' = \frac{R_к}{2},\ X_1 = X_2' = \frac{X_к}{2},\ Z_1 = Z_2' = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}. \quad (12.20)$$

Неприведені значення активного та індуктивного опорів вторинної обмотки трансформатора визначаються за рівняннями:

$$R_2 = \frac{R_2'}{k_ф^2},\ X_2 = \frac{X_2'}{k_ф^2}, \quad (12.21)$$

де $k_ф$ – фазний коефіцієнт трансформації трансформатора, який визначений за даними досліду х.х. (приймається з лабораторної роботи № 11).

Активний (R_m), індуктивний (X_m) і повний (Z_m) опори контуру, що намагнічує, схеми заміщення дорівнюють:

$$R_m = R_0 - R_1, X_m = X_0 - X_1,\ Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2}. \quad (12.22)$$

Значення параметрів R_0 та X_0 використовуються з досліду х.х. трансформатора (лабораторна робота № 11).

4.5 Визначення потужності електричних втрат в трансформаторі

Потужність електричних втрат $R_{1к}$ визначають у досліді к.з. шляхом розрахунку за (12.18) при струмі $I_{1к} = I_{1ном}$.

4.6 Визначення напруги короткого замикання трансформатора

Напруга короткого замикання трансформатора $U_{1к}$ визначається у досліді к.з. шляхом прямого вимірювання напруги, прикладеної до первинної обмотки за умови замикання накоротко вторинної обмотки та протікання по обмотках номінальних струмів ($I_{1к} = I_{1ном}$, $I_{2к} = I_{2ном}$).

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову дослідження трансформатора в режимі к.з. (рис. 12.3).
2. Технічну характеристику силового трансформатора, а також обладнання і вимірювальних приладів, що використовувалися в досліді к.з.
3. Заповнену таблицю 12.1 з даними вимірювань та розрахунків.
4. Характеристики к.з. трансформатора, побудовані за даними досліду к.з. з поясненням вигляду характеристик.
5. Розраховані значення параметрів к.з. і схеми заміщення трансформатора.
6. Значення потужності втрат к.з. трансформатора.
7. Значення напруги к.з. трансформатора $u_{к\%}$ та його активної $u_{ка\%}$ та реактивної $u_{кр\%}$ складових.
8. Результати аналізу отриманих експериментальних результатів.

6 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть, що означає режим к.з. силового трансформатора?
2. Проаналізуйте, чим відрізняється дослід к.з. від режиму раптового к.з. трансформатора?
3. В чому полягає мета проведення досліду к.з. трансформатора?
4. Поясніть методику проведення досліду к.з. трансформатора.
5. Що називаються характеристиками к.з силового трансформатора і наведіть їх вигляд?
6. Наведіть та поясніть схеми заміщення трансформатора в досліді к.з.

7. Поясніть, які опори називають параметрами к.з. трансформатора?

8. Який фізичний сенс параметрів к.з. трансформатора?

9. Поясніть, яка потужність за стандартом приймається за потужність магнітних втрат трансформатора?

10. З якої причини магнітні втрати відносять до сталих (незмінних) втрат трансформатора?

11. Що називається коефіцієнтом потужності к.з. силового трансформатора?

12. Поясніть, яка потужність за стандартом приймається за потужність електричних втрат трансформатора?

13. З якої причини електричні втрати відносять до змінних втрат трансформатора?

14. Що називається напругою к.з. трансформатора?

15. Як визначити напругу к.з. трансформатора і її активну та реактивну складові?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13

ДОСЛІД НАВАНТАЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи

Експериментальне отримання робочих характеристик силового трансформатора та визначення його параметрів у сталому режимі роботи за умов симетричного навантаження.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 189–198; 3, с. 162–171; 4, с. 143–152; 5, с. 83–85; 6, с. 58–67] опрацювати теоретичний матеріал, що стосується особливостей роботи трифазних стрижневих трансформаторів у режимі навантаження.

2. Виконати тести з теми 5 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

2 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблиці для реєстрації, оброблення та подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з типовою методикою проведення досліду навантаження трансформатора та порядком обробки експериментальних результатів.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для дослідження трансформатора в режимі навантаження. Записати паспортні дані досліджуваного трансформатора і вимірювальних приладів, використаними у роботі.

4. На основі паспортних характеристик визначити номінальні значення струмів обмоток вищої та нижчої напруги трансформатора ($I_{1ном}$, $I_{1к} = I_{2ном}$).

5. Змонтувати схему електричну принципову випробування трансформатора в режимі навантаження та провести.

6. Провести досліди для двох типів навантаження: активного ($\cos\varphi_2 = 1$) та індуктивного ($\cos\varphi_2 = 0{,}8$) відповідно до типової методики.

7. Опрацювати отримані експериментальні дані та побудувати робочі характеристики трансформатора для активного ($\cos\varphi_2 = 1$) та індуктивного ($\cos\varphi_2 = 0{,}8$) навантажень, зокрема: зовнішні характеристики $U_2 = f(\beta)$, струмові характеристики $I_1 = f(\beta)$, характеристики коефіцієнта потужності $\cos\varphi_1 = f(\beta)$, а також залежності коефіцієнта корисної дії $\eta = f(\beta)$.

8. Виконати аналіз побудованих робочих характеристик та у висновках до лабораторної роботи чітко сформулювати основні експлуатаційні властивості трансформатора в режимі навантаження.

9. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

10. Виконати тести до лабораторної роботи № 13 на освітньому порталі ТДАТУ.

3 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Після підключення навантаження до вторинної обмотки трансформатора на її затискачах встановлюється напруга U_2. Значення цієї напруги визначається як величиною струму навантаження, так і його характером. Кількісну характеристику зміни напруги під дією навантаження подає показник, відомий як ***«зміна напруги трансформатора»***. Цей показник може бути виражений у відсотках ($\Delta u_{\%}$) або у відносних одиницях (Δu в.о.) [4]:

$$\Delta u_{\%} = \frac{U_{1\text{ном}} - U_2^{'}}{U_{1\text{ном}}} 100\ \% \quad \textit{або} \quad \Delta u = \frac{U_{1\text{ном}} - U_2^{'}}{U_{1\text{ном}}}, \tag{13.1}$$

де $U_2^{'}$ – напруга вторинної обмотки приведена до числа витків первинної обмотки ($U_2^{'} = k_{\text{ф}} U_2$) [4].

Зміну напруги трансформатора прийнято визначати через напруги к.з. Для випадку номінального навантаження відповідний вираз має такий вигляд [4]:

$$\Delta u_{\%} = u_{\text{ка}\%} \cos\varphi_2 + u_{\text{кр}\%} \sin\varphi_2, \tag{13.2}$$

де $u_{\text{ка}\%}$ та $u_{\text{кр}\%}$ – активна та реактивна складові напруги к.з. трансформатора $u_{\text{к}\%}$.

При не номінальному навантаженні вираз (13.2) потрібно помножити на коефіцієнт навантаження [5]:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\,\text{ном}}} = \frac{I_2^{'}}{I_{2\,\text{ном}}^{'}},$$

де $I_2^{'}$ – струм вторинної обмотки приведений до числа витків первинної обмотки ($I_2^{'} = I_2 / k_{\phi}$);

$I_{2\,\text{ном}}^{'}$ – номінальний струм вторинної обмотки приведений до числа витків первинної обмотки ($I_{2\,\text{ном}}^{'} = I_{2\,\text{ном}} / k_{\phi}$).

Тоді, остаточно, маємо:

$$\Delta u_{\%} = \beta\left(u_{\text{ка}\%}\cos\varphi_2 + u_{\text{кр}\%}\sin\varphi_2\right). \qquad (13.3)$$

На рисунку 13.1 подано залежності $\Delta u_{\%} = f(\beta)$. З наведеного графіка видно, що величина $\Delta u_{\%}$ визначається не лише рівнем навантаження, але й його характером, який задається коефіцієнтом потужності $\cos\varphi_2$. Зокрема, для активно-ємнісного навантаження зміна напруги набуває від'ємного значення. Це свідчить про те, що за такого типу навантаження напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора може навіть зростати (рис. 13.2), що можна побачити на зовнішній характеристиці трансформатора [6].

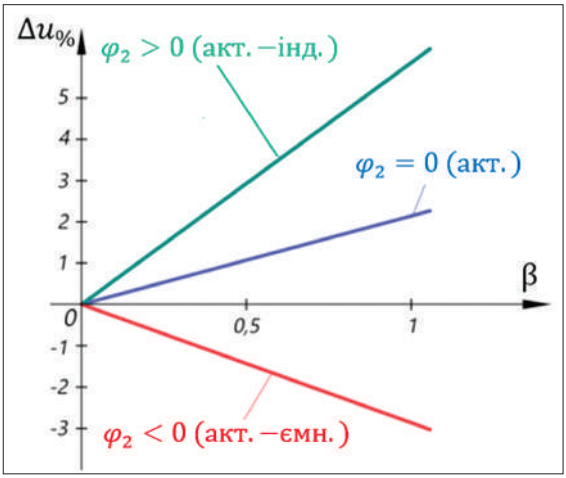


Рисунок 13.1 – Залежності зміни вторинної напруги трансформатора від коефіцієнта навантаження при різному характері навантаження

Зовнішньою характеристикою трансформатора називають залежність вторинної напруги від величини навантаження в усьому діапазоні його зміни – від режиму х.х. ($I_2 = 0$) до номінального режиму ($I_2 = I_{2ном}$) [6].

Зовнішня характеристика трансформатора описується наступним виразом [6]:

$$U_2 = U_{2\,ном}\left(1 - \Delta u\right). \qquad (13.4)$$

де Δu – зміна вторинної напруги трансформатора.

Графічно зовнішні характеристики можуть бути представлені у двох видах:

$$U_2 = f(\beta) \text{ або } U_2 = f(I_2)$$

Залежність $U_2 = f(\beta)$ представлена на рисунку 13.2.

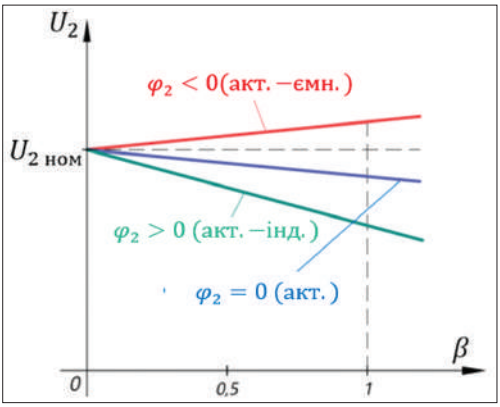


Рисунок 13.2 – Зовнішні характеристики трансформатора при різному характері навантаження

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора визначається як відношення активної потужності, що віддається у вторинне коло, до активної потужності, споживаної з первинного кола [3]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1}, \qquad (13.5)$$

де P_1 – активна потужність, що споживається трансформатором з мережі в режимі навантаження;

P_2 – активна потужність, що віддається трансформатором до навантаження;

Σp – сумарні втрати в трансформаторі в режимі навантаження.

Використання виразу (13.5) для визначення ККД супроводжується значною похибкою, оскільки трансформатор є високоефективним енергетичним пристроєм (ККД досягає 92…99 %).

Тому для точнішого визначення коефіцієнта корисної дії доцільно застосовувати вираз, що враховує втрати та ступінь навантаження β [3]:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{0\,\text{ном}} + \beta^2 P_{\text{к ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos\varphi_2 + P_{0\,\text{ном}} + \beta^2 P_{\text{к ном}}}\right) \cdot 100\ \%, \qquad (13.6)$$

де $P_{0\,\text{ном}}$ – потужність х.х. трансформатора при $U_{10} = U_{1\,\text{ном}}$;

$P_{\text{к ном}}$ – потужність к.з. трансформатора при $I_{1\text{к}} = I_{\text{н}}$;

$S_{\text{ном}}$ – номінальна повна потужність трансформатора.

Із наведених формул випливає, що коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається як рівнем навантаження (значенням β), так і його характером (величиною $\cos\varphi_2$). Графічна залежність ККД від цих параметрів подана на рисунку 13.3 [4].

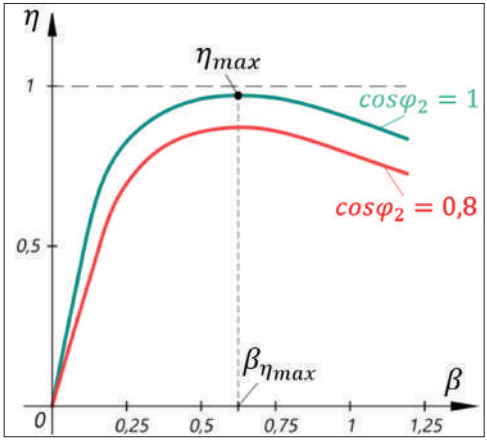


Рисунок 13.3 – Залежності ККД трансформатора від коефіцієнта навантаження при різному характері навантаження

Максимальне значення ККД трансформатора досягається за такого рівня навантаження, за якого постійні (магнітні) втрати дорівнюють змінним (електричним) втратам. Іншими словами, умова максимального ККД виконується тоді, коли величини магнітних та електричних втрат є рівними [5]:

$$P_{0\,\text{ном}} = \beta^2 P_{\text{к ном}}. \qquad (13.7)$$

Звідси коефіцієнт навантаження, що відповідає максимальному ККД:

$$\beta_{\eta_{max}} = \sqrt{\frac{P_{0\,\text{ном}}}{P_{\text{к ном}}}}. \qquad (13.8)$$

З огляду на те, що для більшості силових трансформаторів виконується співвідношення $P_{\text{к ном}} = (5\ldots7)P_{0\,\text{ном}}$, то максимальне значення ККД досягається за коефіцієнта навантаження $\beta = 0{,}5\ldots0{,}7$, тобто при роботі трансформатора на рівні 50…70 % від номінального навантаження [6].

При $\beta < \beta_{\eta_{max}}$ ККД зростає (рис. 13.3), що пояснюється зменшенням частки втрат у балансі потужностей трансформатора. За умови $\beta > \beta_{\eta_{max}}$ зниження ККД зумовлено інтенсивним збільшенням електричних втрат, величина яких пропорційна β^2, тоді як корисна потужність зростає пропорційно β.

Для різних характерів навантаження ($\varphi_2 = \text{var}$) залежність $\Delta u_{\%} = f(\varphi_2)$ при незмінних значеннях $U_{1\text{ном}} = \text{const}$ та $I_2 = \text{const}$ наведена на рисунку 13.4. Приклад характеристики подано для трансформатора зі значеннями $u_{\text{ка}\%} = 1{,}2\,\%$ та $u_{\text{кр}\%} = 5{,}36\,\%$ [8].

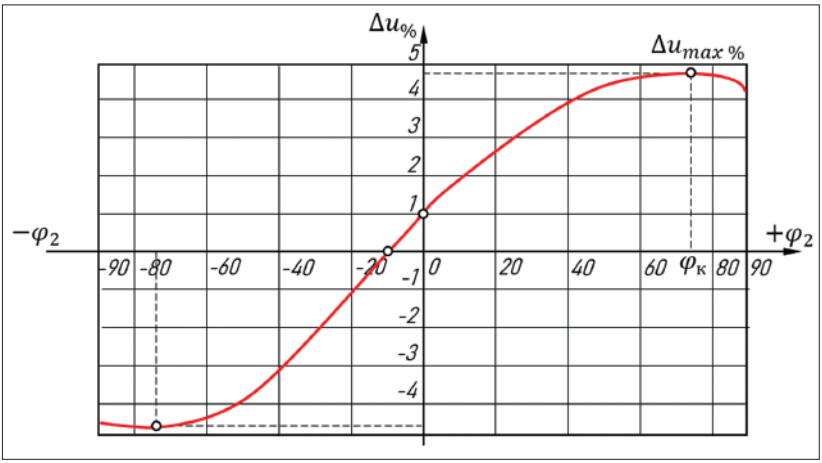


Рисунок 13.4 – Залежність зміни вторинної напруги трансформатора при різних характерах навантаження ($U_{1\text{ном}} = \text{const}$; $I_2 = \text{const}$)

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Схема електрична принципова підключення трансформатора для проведення досліду навантаження наведена на рисунку 13.5. Первинна обмотка трансформатора під'єднується до мережі змінного струму через індукційний регулятор напруги (IP), що забезпечує подавання номінальної напруги, та вимірювальний комплект (КВ). До вторинної обмотки трансформатора підключається регульоване трифазне навантаження, сформоване рідинним реостатом (ТРР). Для контролю величини струму та напруги вторинної обмотки в одну з її фаз встановлюються амперметр (PA1) та вольтметр (PV1).

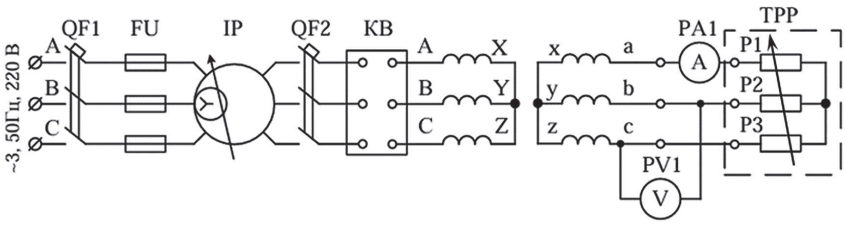


Рисунок 13.5 – Схема електрична принципова дослідження трифазного силового трансформатора в режимі навантаження

4.1 Методика проведення досліду навантаження трансформатора

У процесі проведення досліду напруга, прикладена до первинної обмотки, підтримується незмінною та дорівнює номінальному значенню, тобто $U_1 = U_{1ном} = \text{const}$. Активний опір навантаження ТРР змінюється таким чином, щоб струм вторинної обмотки змінювався в діапазоні $I_2 = (0…1{,}25)I_{2ном}$. Загалом реєструється 6…8 експериментальних точок. Під час випробування здійснюється контроль значень струмів I_1 та I_2, напруг U_1 та U_2, а також активної потужності P_1. Обов'язковим є проведення вимірювання при номінальних струмах обмоток трансформатора $I_1 = I_{1ном}$ та $I_2 = I_{2ном}$, що відповідає коефіцієнту навантаження $\beta = 1$.

Аналогічна методика застосовується для досліду при індуктивному характері навантаження. Експериментальні та обчислені результати заносяться до таблиці 13.1.

Таблиця 13.1 – Експериментальні та розрахункові дані досліду навантаження силового трансформатора при $\cos\varphi_2 = 1{,}0$

№	U_{1A}	U_{1B}	U_{1C}	U_1	I_{1A}	I_{1B}	I_{1C}	I_1	P_{1A}	P_{1B}	P_{1C}	P_1	U_2	I_2	β	$\cos\varphi_1$	η
	В	В	В	В	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	В	В	А	в.о.	в.о.	%
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	

при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$

№	U_{1A}	U_{1B}	U_{1C}	U_1	I_{1A}	I_{1B}	I_{1C}	I_1	P_{1A}	P_{1B}	P_{1C}	P_1	U_2	I_2	β	$\cos\varphi_1$	η
	В	В	В	В	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	В	В	А	в.о.	в.о.	%
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	

У таблиці 13.1:

$$U_1 = \frac{1}{3}\left(U_{1A} + U_{1B} + U_{1C}\right); \tag{13.9}$$

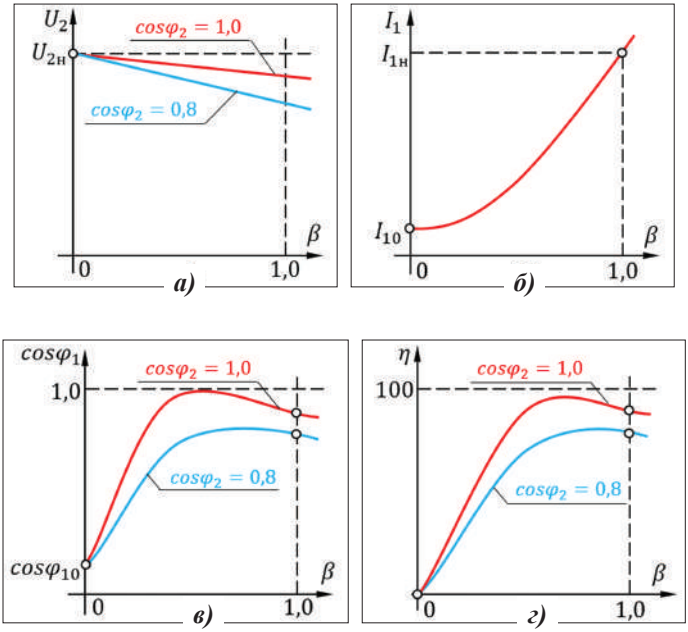
$$I_1 = \frac{1}{3}\left(I_{1A} + I_{1B} + I_{1C}\right); \tag{13.10}$$

$$P_1 = P_{1A} + P_{1B} + P_{1C}; \tag{13.11}$$

$$P_2 = \sqrt{3}U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2; \tag{13.12}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\ \%. \tag{13.13}$$

Графічні залежності будуються на основі експериментальних даних, поданих у таблиці 13.1. Приблизний вигляд робочих характеристик силового трансформатора наведено на рисунку 13.6 [9].



а – зовнішні; ***б*** – струмова; ***в*** – коефіцієнту потужності; ***г*** – ККД

Рисунок 13.6 – Робочі характеристики силового трансформатора

У разі, якщо випробування трансформатора за індуктивного характеру навантаження ($cos\varphi_2 = 0,8$) не виконувалися, зовнішню характеристику $U_2 = f(\beta)$ та графік ККД при $cos\varphi_2 = 0,8$ слід побудувати за результатами аналітичного розрахунку з використанням відповідних розрахункових рівнянь [10]:

$$U_2 = U_{2\,ном}\left(1 - \frac{\Delta u_{\%}}{100}\right). \qquad (13.14)$$

Значення зміни напруги $\Delta u_{\%}$ визначається за формулою (13.2). Значення $u_{ка\%}$, $u_{кр\%}$ та $P_{к\,ном}$ беруться з досліду короткого замикання трансформатора, який проводився у лабораторній роботі № 12. Величину втрат х.х. $P_{0\,ном}$ можна взяти з таблиці 13.1 цієї роботи за умов $I_2 = 0$ та $U_1 = U_{1ном}$. Отримані розрахункові значення вносять до таблиці 13.2.

Розрахунок графіків ККД ($\eta = f(\beta)$) при різному характері навантаження $\cos\varphi_2 = 1{,}0$ і $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ виконується за рівнянням (13.6) і результати розрахунків заносяться до таблиці 13.3.

Таблиця 13.2 – Розрахункові дані для побудови зовнішніх характеристик при $\cos\varphi_2 = 1{,}0$

β, в.о.	0	0,4	0,6	0,8	1,0	1,25	$u_{ка\%}$,%	$u_{кр\%}$,%
$\Delta u_{\%}$, %								
U_2, В								

при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$

β, в.о.	0	0,4	0,6	0,8	1,0	1,25	$u_{ка\%}$,%	$u_{кр\%}$,%
$\Delta u_{\%}$, %								
U_2, В								

Таблиця 13.3 – Розрахункові дані для побудови графіків ККД при $\cos\varphi_2 = 1{,}0$

β, в.о.	0	0,4	0,6	0,8	1,0	1,25
η, %						

при $\cos\varphi_2 = 0{,}8$

β, в.о.	0	0,4	0,6	0,8	1,0	1,25
η, %						

5 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову дослідження трансформатора в режимі навантаження (рис. 13.5).
2. Технічні характеристики силового трансформатора, а також обладнання і вимірювальних приладів, що використовувалися в досліді.
3. Заповнені таблиці 13.1–13.3 з даними вимірювань та розрахунків.
4. Робочі характеристики силового трансформатора (приблизний вигляд представлено на рис. 13.6).
5. Результати аналізу отриманих експериментальних результатів.

6 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Пояснити, що називається режимом навантаження силового трансформатора?
2. Що називається номінальним режимом навантаження силового трансформатора?
3. Які номінальні величини вказуються в паспорті силового трансформатора та які одиниці їх вимірювання?
4. Як розрахувати номінальні струми обмоток ВН та НН трансформатора за паспортними даними?
5. Що називається зміною вторинної напруги силового трансформатору?
6. Як визначається зміна вторинної напруги і приблизне її значення?
7. Яка напруга вторинної обмотки силового трансформатора приймається за номінальну?
8. Що називається ККД трансформатора і яка приблизна його величина при номінальному навантаженні?
9. Записати та пояснити умову отримання максимального ККД трансформатора.
10. Що називається коефіцієнтом потужності силового трансформатора і яке приблизне його значення?
11. Що називається напругою к.з. трансформатора і яке приблизне її значення для трансформаторів середньої та малої потужності?
12. Що називається робочими характеристиками силового трансформатора і який вигляд вони мають?
13. Який вигляд мають зовнішні характеристики трансформатора при різних характерах навантаження?
14. Яка мета проведення досліду навантаження силового трансформатора?
15. У чому полягає сутність методики проведення досліду навантаження силового трансформатора?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ

Мета роботи

Дослідження паралельної роботи силових трансформаторів за умови дотримання усіх необхідних технічних вимог, а також за наявності відмінностей у коефіцієнтах трансформації та напругах к.з.

1 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. На основі рекомендованої літератури [1; 2, с. 218–223; 3, с. 182–186; 4, с. 165–176; 5, с. 92–96; 6, с. 78–86] опрацювати теоретичний матеріал, що стосується особливостей роботи трифазних трансформаторів включених на паралельну роботу.

2. Виконати тести з теми 5 на освітньому порталі ТДАТУ відповідно до питань, зазначених у пункті 1.

3. Надати відповіді на контрольні питання, пов'язані з лабораторною роботою.

1 ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Підготувати матеріали, необхідні для оформлення звіту з лабораторної роботи, включаючи таблицю для реєстрації, оброблення та подання експериментальних даних.

2. Ознайомитися з методикою проведення експериментальних досліджень паралельної роботи трансформаторів та з процедурами обробки отриманих даних.

3. Ознайомитись зі складом, оснащенням та вимірювальними приладами стенда для дослідження трансформаторів включених на паралельну роботу. Записати паспортні дані досліджуваних трансформаторів і вимірювальних приладів, використаними у роботі.

4. Змонтувати схему електричну принципову для дослідження двох трансформаторів включених на паралельну роботу.

5. Провести експериментальні випробування двох трансформаторів включених на паралельну роботу за такими режимами: при дотриманні

усіх умов паралельної роботи, за різних коефіцієнтів трансформації та за різних значень напруг к.з. – згідно з типовою методикою.

6. Експериментально визначити коефіцієнти трансформації, напруги к.з. та групи з'єднання обмоток досліджуваних трансформаторів.

7. Проаналізувати характер і розподіл навантаження між трансформаторами, що працюють паралельно, за різних умов їх підключення.

8. Побудувати графічні залежності струмів трансформаторів для різних варіантів їх включення на паралельну роботу.

9. Виконати аналіз побудованих характеристик та у висновках до лабораторної роботи чітко сформулювати основні експлуатаційні властивості трансформаторів при паралельній роботі.

10. Оформити звіт з лабораторної роботи згідно розділу 5 та захистити його.

11. Виконати тести до лабораторної роботи № 14 на освітньому порталі ТДАТУ.

2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Необхідність включення трансформаторів на паралельну роботу:

а) для забезпечення надійного резервування електропостачання споживачів у разі виникнення аварійних ситуацій, виконання ремонтних робіт або планового профілактичного обслуговування трансформаторів та пов'язаного з ними обладнання;

б) для зниження енергетичних втрат у періоди знижених навантажень підстанції шляхом відключення частини трансформаторів, що працюють паралельно, таким чином, щоб коефіцієнт корисної дії решти трансформаторів був максимально можливим [4].

Для забезпечення ***оптимальних умов*** паралельної роботи силових трансформаторів необхідно, щоб сумарне навантаження підстанції розподілялося між трансформаторами ***пропорційно їх номінальним потужностям***. Такий принцип розподілу навантаження реалізується за умови дотримання таких вимог [4]:

а) групи з'єднань обмоток трансформаторів ***однакові;***

б) первинні і вторинні номінальні напруги чи, що практично те саме, ***коефіцієнти трансформації*** трансформаторів ***рівні;***

в) напруги короткого замикання рівні.

Якщо перші дві умови виконуються, то напруги відповідних фаз вторинних обмоток трансформаторів у режимі х.х. будуть ідентичними за величиною та фазою. У разі порушення цих умов навіть за відсутності навантаження виникатимуть зрівнювальні струми, які циркулюватимуть у замкнених контурах, утворених вторинними обмотками, та перетворюватимуться у первинні кола. Це зумовлює нерівномірний розподіл струмів, збільшення додаткових втрат і надлишкове нагрівання трансформаторів.

Дотримання третьої умови забезпечує пропорційний розподіл навантаження між трансформаторами відповідно до їх номінальних потужностей, що сприяє підвищенню ККД підстанції та збільшенню її навантажувальної здатності [5].

1. Паралельна робота трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток при дотриманні інших умов

Припустімо, що трансформатори підключені до паралельної роботи та мають групи з'єднання «0» і «11». У такому разі ЕРС відповідних фаз їхніх вторинних обмоток матимуть однакові амплітуди, проте будуть зсунуті за фазою на 30° (рис. 14.1). На рисунку 14.1 позначено: $\dot{E}_{2I}, \dot{E}_{2II}$ – відповідно, вектори ЕРС вторинних обмоток першого (*I*) і другого (*II*) трансформаторів; $\dot{I}_{зрI}, \dot{I}_{зрII}$ – вектори зрівнювальних струмів у вторинних обмотках трансформаторів.

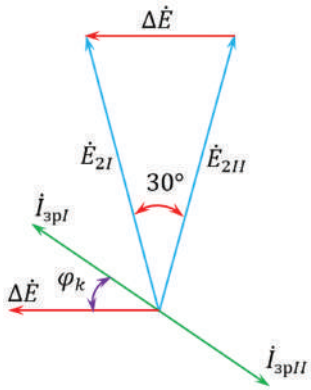


Рисунок 14.1 – Спрощена векторна діаграма ЕРС вторинних обмоток при паралельній роботі трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток

У замкненому контурі, утвореному вторинними обмотками, виникатиме різниця ЕРС, величина якої визначатиметься як [6]:

$$\Delta E = 2E_2 \sin 15° = 0{,}518E_2, \qquad (14.1)$$

де $E_2 = E_{2I} = 0{,}518E_{2II}$ – ЕРС вторинної обмотки трансформаторів, і у вторинних обмотках, при х.х. трансформаторів протікатиме зрівнювальний струм:

$$I_{зр} = \frac{\Delta E}{Z_{kI} + Z_{kII}}, \qquad (14.2)$$

де Z_{kI} і Z_{kII} – опори короткого замикання першого і другого трансформатора.

Припустімо, що напруги к.з. обох трансформаторів однакові та становлять по 5 %, тобто $u_{kI\%} = u_{kII\%} = 5\,\%$.

Якщо величини ΔE, $Z_{кI}$ та $Z_{кII}$ подати у відносних одиницях, тоді за умови, що відносні значення опорів к.з. дорівнюють їхнім відносним напругам к.з., тобто $Z^*_{kI} = u^*_{kI}$ і $Z^*_{kII} = u^*_{kII}$, відносна величина зрівнювального струму у вторинній обмотці визначатиметься як [6]:

$$\frac{I_{зр}}{I_{2\,ном}} = \frac{\text{”}\,E^*}{Z^*_{kI} + Z^*_{kII}} = \frac{0{,}518}{0{,}05 + 0{,}05} = 5{,}18. \qquad (14.3)$$

Отже, величина зрівнювального струму перевищує номінальний у 5,18 рази. Це підтверджує, що ***паралельна робота трансформаторів із різними групами з'єднання є недопустимою***. Такий висновок стосується всіх випадків, коли трансформатори належать до парних і непарних груп з'єднання обмоток. Водночас, якщо обидва трансформатори мають парні або, відповідно, непарні групи з'єднання, то шляхом корекції маркування виводів обмоток їх можна привести до однієї групи. Це дозволяє забезпечити виконання необхідної умови для коректного підключення трансформаторів на паралельну роботу [6].

2. Паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації: $k_I < k_{II}$ і, відповідно, $E_{2II} > E_{2II}$ при дотриманні інших умов

У цій лабораторній роботі приймається, що фазний ($k_ф$) і лінійний ($k_л$) коефіцієнти трансформації трансформаторів рівні, тобто $k_ф = k_л$, тому індекси «ф» і «л» не використовуються.

У даному випадку в контурі вторинних обмоток трансформаторів виникає ненульова різниця ЕРС, що визначається як

$\Delta E = E_{2I} - E_{2II}$ (рис. 14.2). Під дією цієї різниці у вказаних обмотках при х.х. трансформатора протікає зрівнювальний струм, величина якого визначається рівнянням (14.3). Напрямок зрівнювального струму у вторинних обмотках трансформаторів є протилежним: у першому трансформаторі він спрямований від початку обмотки до її кінця, тоді як у другому – від кінця до початку. При цьому зрівнювальний струм $I_{зр}$ має індуктивний характер для першого трансформатора та ємнісний – для другого [8].

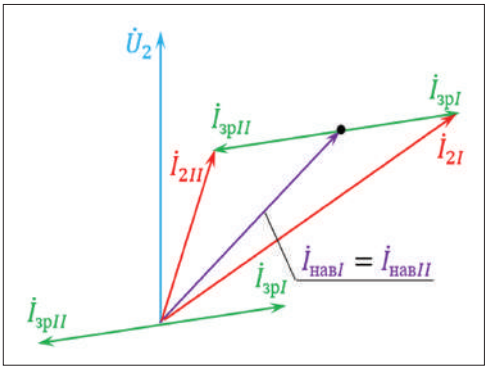


Рисунок 14.2 – Спрощена векторна діаграма струмів вторинних обмоток трансформаторів при паралельній роботі з різними коефіцієнтами трансформації

Протікання зрівнювальних струмів спричиняє додаткові падіння напруги, унаслідок чого встановлюється певне співвідношення між напругами вторинних обмоток: $E_{2I} > U_2 > E_{2II}$ Після підключення навантаження струми навантаження $I_{навI}$ та $I_{навII}$ алгебраїчно додаються зі зрівнювальними струмами, що призводить до нерівності результуючих струмів у вторинних обмотках I_{2I} та I_{2II} (рис. 14.2) і, відповідно, до нерівномірного розподілу навантаження між трансформаторами. Величина зрівнювального струму визначається ступенем різниці між коефіцієнтами трансформації трансформаторів [7].

При паралельній роботі трансформаторів ***ДСТУ допускає відмінність коефіцієнтів трансформації на 0,5 %, для трансформаторів з k < 3 і для трансформаторів власних потреб електростанцій – на 1,0 %*** [3].

3. Паралельна робота трансформаторів з різними напругами короткого замикання при дотриманні інших умов включення

Нехтуючи струмами намагнічування та використовуючи спрощену схему заміщення трансформатора, схему паралельного включення трьох трансформаторів можна подати у вигляді, наведеному на рисунку 14.3 [6].

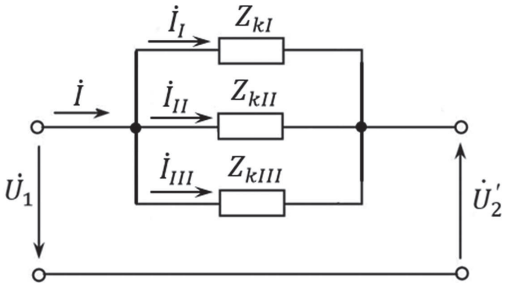


Рисунок 14.3 – Спрощена схема електрична принципова паралельної роботи трансформаторів

На рисунку 14.3 позначено: Z_{kI}, Z_{kII}, Z_{kIII} – відповідно, повні опори к.з. першого, другого і третього трансформаторів; $\dot{I}_I$, $\dot{I}_{II}$, $\dot{I}_{III}$ – відповідно, струми навантаження трансформаторів; $\dot{U}_1$ – напруга живлення трансформаторів; $\dot{U}_2'$ – напруга вторинної обмотки трансформатора приведена до числа витків первинної обмотки ($U_2' = kU_2$).

Із наведеної схеми (рис. 14.3) випливає, що падіння напруги на кожному з трансформаторів є однаковими та визначаються співвідношенням [6]:

$$\Delta\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2' = \dot{U}_{20}' - \dot{U}_2' = \dot{I} \cdot Z_k, \tag{14.4}$$

де $\dot{I}$ – загальний струм навантаження;

$\dot{U}_{20}'$ – напруга х.х. вторинної обмотки трансформатора приведена до числа витків первинної обмотки;

Z_k – еквівалентний повний опір к.з. трансформаторів:

$$Z_k = \frac{1}{\frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}}} = \frac{1}{\sum\limits_n \frac{1}{Z_{kn}}}. \tag{14.5}$$

Струми окремих трансформаторів будуть дорівнювати [6]:

$$\dot{I}_I = \frac{\Delta\dot{U}}{Z_{kI}} = \frac{\dot{I}}{Z_{kI}\sum_n \frac{1}{Z_{kn}}};\ \dot{I}_{II} = \frac{\Delta\dot{U}}{Z_{kII}} = \frac{\dot{I}}{Z_{kII}\sum_n \frac{1}{Z_{kn}}};$$

$$\dot{I}_{III} = \frac{\Delta\dot{U}}{Z_{kIII}} = \frac{\dot{I}}{Z_{kIII}\sum_n \frac{1}{Z_{kn}}}. \qquad (14.6)$$

У загальному випадку ці струми не збігаються за фазою, тому що аргументи комплексів опорів к.з. можуть бути неоднаковими. Однак за звичайних умов різниці фаз незначні, тому з достатньою мірою точності можна вважати, що з $\dot{I} = \dot{I}_I + \dot{I}_{II} + \dot{I}_{III}$, виходить

$$I = I_I + I_{II} + I_{III}, \qquad (14.7)$$

звідки

$$S = S_I + S_{II} + S_{III}. \qquad (14.8)$$

Внаслідок цього комплексні величини у формулах (14.6) можна замінити їх модулями. Із відносного опору:

$$Z^*_{kI} = \frac{Z_{kI}}{Z_I},\ a\ Z_I = \frac{U_{1\,ном\,I}}{I_{1\,ном\,I}},\ то\ Z^*_{kI} = Z_{kI}\frac{I_{1\,ном\,I}}{U_{1\,ном\,I}} \rightarrow Z_{kI} = Z^*_{kI}\frac{U_{1\,ном\,I}}{I_{1\,ном\,I}}.$$

За умови, що відносні значення опорів к.з. дорівнюють їхнім відносним напругам к.з., тобто $Z^*_{kI} = u^*_{kI} = u_{kI\%}/100$, отримаємо:

$$Z_{kI} = \frac{u_{kI\%}}{100}\frac{U_{1\,ном\,I}}{I_{1\,ном\,I}}.$$

Аналогічно

$$Z_{kII} = \frac{u_{kII\%}}{100}\frac{U_{1\,ном\,II}}{I_{1\,ном\,II}};$$

$$Z_{kIII} = \frac{u_{kIII\%}}{100}\frac{U_{1\,ном\,III}}{I_{1\,ном\,III}}.$$

Помноживши (14.6) на $mU_{1\,ном}$ і прийнявши, що

$$U_{1\,ном} = U_{1\,ном\,I} = U_{1\,ном\,II} = U_{1\,ном\,III},$$

одержимо

$$mU_{1\text{ном}}I_I = \frac{mU_{1\text{ном}}I}{\dfrac{u_{kI\%}}{100}\dfrac{U_{1\text{ном}}}{I_{1\text{ном}I}}\displaystyle\sum_n \frac{100I_{\text{ном}n}}{u_{kI\%}U_{1\text{ном}}}},$$

звідки, з огляду на те, що $mU_{1\,\text{ном}}I_I = S_I;\ \ mU_{1\,ном}I = S,$

$$\frac{u_{kI\%}}{100}\frac{U_{1\,\text{ном}}}{I_{1\,\text{ном}\,I}}\sum_n \frac{100I_{\text{ном}\,n}}{u_{kn\%}U_{1\,\text{ном}}} =$$

$$= \frac{u_{kI\%}}{mI_{1\,\text{ном}\,I}U_{1\,\text{ном}}}\sum_n \frac{mU_{1\,\text{ном}}I_{\text{ном}\,n}}{u_{kn\%}} =$$

$$= \frac{u_{kI\%}}{S_{\text{ном}\,I}}\sum_n \frac{S_{\text{ном}\,n}}{u_{kn\%}}.$$

Знаходимо

$$S_I = \frac{S}{\dfrac{u_{kI\%}}{S_{\text{ном}I}}\displaystyle\sum_n \frac{S_{\text{ном}n}}{u_{kn\%}}};\ \ S_{II} = \frac{S}{\dfrac{u_{kII\%}}{S_{\text{ном}II}}\displaystyle\sum_n \frac{S_{\text{ном}n}}{u_{kn\%}}};\ \ S_{III} = \frac{S}{\dfrac{u_{kIII\%}}{S_{\text{ном}III}}\displaystyle\sum_n \frac{S_{\text{ном}n}}{u_{kn\%}}}.$$

У відносних одиницях:

$$S_I^* = \frac{S_I}{S_{\text{ном}I}} = \frac{S}{u_{kI\%}\displaystyle\sum_n \frac{S_{\text{ном}n}}{u_{kn\%}}};\ \ S_{II}^* = \frac{S_{II}}{S_{\text{ном}II}} = \frac{S}{u_{kII\%}\displaystyle\sum_n \frac{S_{\text{ном}n}}{u_{kn\%}}};$$

$$S_{III}^* = \frac{S_{III}}{S_{\text{ном}III}} = \frac{S}{u_{kIII\%}\displaystyle\sum_n \frac{S_{\text{ном}n}}{u_{kn\%}}}.$$

З виразів повних потужностей у відносних одиницях зрозуміло, що відносні навантаження паралельно ввімкнених трансформаторів обернено пропорційні до їх напруг к.з., тому що

$$S_I^* : S_{II}^* : S_{III}^* = \frac{1}{u_{kI\%}} : \frac{1}{u_{kII\%}} : \frac{1}{u_{kIII\%}}. \qquad (14.9)$$

Із наведеного співвідношення випливає, що розподіл навантаження між трансформаторами, які працюють паралельно, є обернено пропорційним їхнім напругам к.з. Це означає, що за умови ***нерівності напруг к.з. паралельно працюючих трансформаторів більше***

навантажується трансформатор з меншою напругою к.з. У підсумку це спричиняє перевантаження трансформатора з нижчим значенням $u_{k\%}$ та недовантаження іншого трансформатора з вищим $u_{k\%}$. Щоб уникнути перевантаження, загальну величину навантаження необхідно зменшити. Таким чином, ***нерівність напруг к.з. обмежує можливість повного використання встановленої потужності паралельно працюючих трансформаторів*** [10].

Зважаючи на те, що на практиці не завжди можливо забезпечити однакові значення напруги к.з., чинний ***ДСТУ допускає паралельну роботу трансформаторів за умови, що їх розбіжність за напругою к.з. не перевищує 10 % від середнього арифметичного значення***. Відмінність напруг к.з. зростає зі збільшенням різниці у номінальних потужностях трансформаторів. У зв'язку з цим ***ДСТУ рекомендує, щоб відношення номінальних потужностей трансформаторів, які працюють паралельно, не перевищувало 3:1*** [10].

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

3.1 Визначення коефіцієнта трансформації трансформаторів

Коефіцієнтом трансформації трансформатора називають відношення числа витків або фазних ЕРС обмоток ВН і НН, тобто [2]

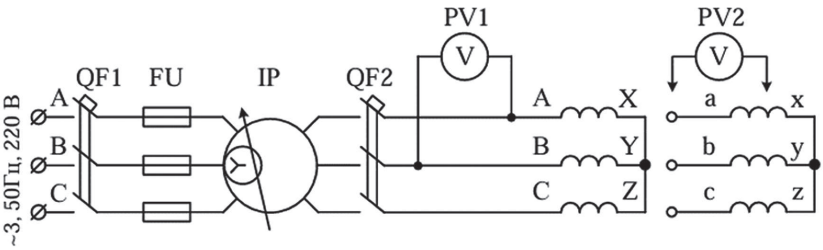


Рисунок 14.4 – Схема електрична принципова для визначення коефіцієнта трансформації трансформатора

$$k_{\text{ф}} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_{1\text{ф}}}{E_{2\text{ф}}}. \qquad (14.10)$$

У режимі х.х. можна прийняти, що [3]:

$$E_{1\text{ф}} = U_{1\text{ф}} \text{ і } E_{2\text{ф}} = U_{2\text{ф}} . \qquad (14.11)$$

Для експериментального визначення коефіцієнта трансформації досліджуваних трансформаторів, незалежно від схеми з'єднання їх обмоток високої та низької напруги, на первинну обмотку в режимі х.х. подається фазна напруга, значення якої наближене до номінального $U_{1ф}$. У такому випадку коефіцієнт трансформації трансформатора визначається за співвідношенням [7]:

$$k_{ф} = \frac{U_{1ф}}{U_{2ф}}. \qquad (14.12)$$

Схема електрична принципова, що використовується для експериментального визначення коефіцієнта трансформації трансформатора, подана на рисунку 14.4.

Якщо на високовольтній обмотці одного з трансформаторів передбачено відпайки, необхідно визначити значення коефіцієнта трансформації для кожної з цих відпайок. Це дає змогу встановити відповідність фактичного значення коефіцієнта трансформації паспортним даним та оцінити вплив відпайок на параметри трансформатора.

3.2 Визначення напруги короткого замикання трансформаторів

Напруга к.з. кожного трансформатора визначається за результатами досліду короткого замикання, який проводять при суттєво зниженій напрузі на первинній обмотці U_{1k}. Значення цієї напруги підвищують до того моменту, поки струм к.з. I_{1k} не досягне номінального значення, тобто $I_{1k} = I_{1ном}$. У таких умовах напруга к.з. розраховується за співвідношенням [5]:

$$u_{k\%} = \frac{U_{1k}}{U_{1\,ном}} \cdot 100\ \%. \qquad (14.13)$$

Схема електрична принципова для визначення напруги к.з. трансформатора приведена на рисунку 14.5.

3.3 Дослідне визначення групи з'єднання обмоток трансформатора

Методика визначення групи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів детально подана в лабораторній роботі № 10. Оскільки в межах даної роботи передбачається використання трансформаторів із однаковими групами з'єднання, процедура визначення групи з'єднання не проводиться.

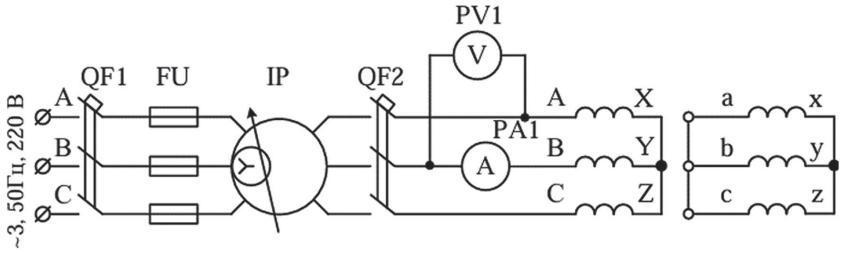


Рисунок 14.5 – Схема електрична принципова для визначення напруги к.з. трансформатора

3.4 Паралельна робота трансформаторів з однаковими групами з'єднання при $k_I = k_{II}$, $u_{k\%I} = u_{k\%II}$

Схема електрична принципова підключення двох трансформаторів на паралельну роботу наведена на рисунку 14.6. Первинні обмотки трансформаторів через індукційний регулятор напруги (ІР) підключаються до мережі живлення. Вторинні обмотки з'єднуються на спільне активне навантаження у вигляді трифазного рідинного реостата (ТРР).

Підключення трансформаторів на паралельний режим роботи виконується за умов х.х, коли навантажувальний реостат ТРР повністю виведений. Перед замиканням автоматичного вимикача *QF*2 необхідно впевнитися у правильності фазування та відповідності полярностей обмоток. Для цього тимчасовим («летучим») провідником з'єднують однойменні затискачі вторинних обмоток, наприклад «а», після чого вимірюють напругу між затискачами «b» та «c» відповідних трансформаторів. За умови правильного увімкнення ці напруги повинні дорівнювати нулю.

Після виконання перевірки дозволяється вмикати *QF*2 та поступово збільшувати навантаження трансформаторів від х.х. до величини $1{,}2I_{1\text{ном}}$ одного з трансформаторів. У процесі досліду фіксуються значення струмів у первинних і вторинних колах кожного трансформатора, а також загальний струм навантаження. За умови симетрії навантаження допускається реєстрація струму лише однієї фази. Отримані експериментальні дані заносять до таблиці 14.1.

За виміряними даними у досліді будуються графічні залежності струмів окремих трансформаторів від величини сумарного струмового навантаження I_{aI}, $I_{aII} = f(I_{\text{нав}})$.

3.5 Паралельна робота двох трансформаторів з однаковими групами з'єднання при $k_I \neq k_{II}$, $u_{k\%I} = u_{k\%II}$

У цьому режимі в обмотках трансформаторів виникають зрівнювальні струми навіть за відсутності зовнішнього навантаження. Різниця між коефіцієнтами трансформації створюється шляхом відключення частини витків первинної або вторинної обмотки одного з трансформаторів. У лабораторній установці така можливість реалізується за рахунок використання відгалужень обмотки, виведених на затискачі x', y', z' одного з трансформаторів.

Паралельне ввімкнення трансформаторів здійснюється за електричною схемою, наведеною на рисунку 14.6, з урахуванням зазначених конструктивних особливостей. За такого ввімкнення зрівнювальний струм з'являється вже в режимі х.х. При навантаженні кожного трансформатора його фактичний струм визначається як геометрична сума зрівнювального струму та струму, що припадає на навантаження.

У ході досліду навантаження обох трансформаторів поступово збільшують до моменту, коли струм в одному з них досягає значення $1{,}2I_{1\text{ном}}$. У процесі досліду фіксуються значення струмів у первинних і вторинних колах кожного трансформатора, а також загальний струм навантаження. За умови симетрії навантаження допускається реєстрація струму лише однієї фази. Отримані експериментальні дані заносять до таблиці 14.1.

За виміряними даними у досліді будуються графічні залежності струмів окремих трансформаторів від величини сумарного струмового навантаження I_{aI}, $I_{aII} = f(I_{\text{нав}})$.

3.6 Паралельна робота двох трансформаторів з однаковими групами з'єднання при $k_I = k_{II}$, $u_{k\%I} \neq u_{k\%II}$

Відмінність у величинах напруг к.з. трансформаторів створюється шляхом переведення одного з них на роботу з використанням затискачів A', B', C' та a', $в'$, c', що відповідають відпайкам з меншою кількістю витків. Це приводить до зменшення напруги к.з. за умови збереження коефіцієнта трансформації основної обмотки. Паралельне підключення трансформаторів здійснюється відповідно до електричної схеми, наведеної на рисунку 14.6, з урахуванням зазначеної особливості застосування затискачів одного з трансформаторів, позначених штрихами.

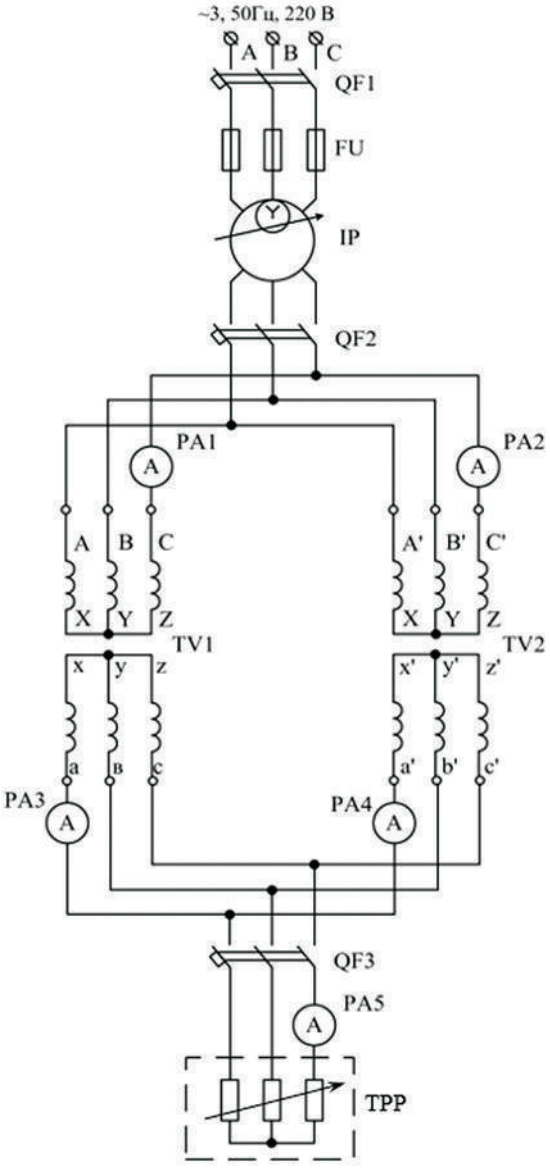


Рисунок 14.6 – Схема електрична принципова включення трифазних трансформаторів на паралельну роботу

Таблиця 14.1 – Результати експериментальних досліджень трансформаторів на паралельній роботі

Умови включення трансформаторів	U_{AB}	U_{ab}	I_{AI}	I_{AII}	I_{aI}	I_{aII}	$I_{нав}$
	В	В	А	А	А	А	А
Всі умови виконано							
$k_I \neq k_{II}$,							
$u_{k\%I} \neq u_{k\%II}$							

У процесі досліду навантаження поступово збільшується від режиму х.х. до моменту, коли струм одного з трансформаторів досягає значення $1{,}2I_{1ном}$. У процесі досліду фіксуються значення струмів у первинних і вторинних колах кожного трансформатора, а також загальний струм навантаження. За умови симетрії навантаження допускається реєстрація струму лише однієї фази. Отримані експериментальні дані заносять до таблиці 14.1.

За виміряними даними у досліді будуються графічні залежності струмів окремих трансформаторів від величини сумарного струмового навантаження I_{aI}, $I_{aII} = f(I_{нав})$.

4 ВКАЗІВКИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Звіт з лабораторної роботи має включати наступні розділи:

1. Схему електричну принципову включення трифазних трансформаторів на паралельну роботу (рис. 14.6).

2. Технічні характеристики силових трансформаторів, а також обладнання і вимірювальних приладів, що використовувалися в досліді.

3. Заповнену таблицю 14.1 з даними вимірювань.

4. Графічні залежності струмів окремих трансформаторів від величини сумарного струмового навантаження I_{aI}, $I_{aII} = f(I_{\text{нав}})$ для таких умов:

– виконанні всіх умов вмикання;
– при нерівності $k_I \neq k_{II}$;
– при нерівності $u_{k\%I} \neq u_{k\%II}$.

5. Результати аналізу отриманих експериментальних результатів.

5 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

1. Опрацювати теоретичний матеріал з теми 7 «Енергетика силових трансформаторів», зокрема питання, що стосуються паралельної роботи силових трансформаторів.

2. Виконати тестові завдання до теми 7 на освітньому порталі ТДАТУ.

3. Надати відповіді на контрольні запитання, передбачені для даної лабораторної роботи.

4. Оформити звіт з лабораторної роботи відповідно до встановлених вимог щодо структури та оформлення.

5. Пройти тестування до лабораторної роботи № 14 на освітньому порталі ТДАТУ.

6 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Пояснити, що розуміють під групою з'єднання обмоток трансформатора?

2. У чому сутність методики визначення дослідним шляхом групи з'єднання обмоток трансформаторів?

3. Дати визначення, що таке напруга к.з. трансформатора і як вона визначається дослідним шляхом?

4. У чому полягає необхідність включення трансформаторів на паралельну роботу?

5. Які умови потрібно виконати при включенні трансформаторів на паралельну роботу?

6. Пояснити, що значить «найбільш сприятливі умови паралельної роботи трансформаторів»?

7. Яка розбіжність коефіцієнтів трансформації допускається у паралельно працюючих силових трансформаторів?

8. Яка розбіжність значень напруг к.з. допускається у паралельно працюючих силових трансформаторів?

9. Чи можна включати на паралельну роботу трансформатори з різними групами з'єднання обмоток?

10. Який трансформатор і з якої причини завантажується більше при паралельній роботі, якщо в них відрізняються коефіцієнти трансформації?

11. Який трансформатор і з якої причини завантажується більше при паралельній роботі, якщо в них відрізняються напруги к.з.?

12. Що відбудеться, якщо включити на паралельну роботу трансформатори з різними групами з'єднання обмоток?

13. При не виконанні яких умов включення на паралельну роботу трансформаторів в обмотках виникають зрівнювальні струми?

14. У чому сутність методики дослідження паралельної роботи трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації?

15. У чому сутність методики дослідження паралельної роботи трансформаторів з різними напругами к.з.?

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ЗРАЗОК ТИТУЛЬНОГО АРКУША ЗВІТУ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО
ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ І КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра «Електротехніка і електромеханіка
імені професора В. В. Овчарова»

ВИВЧЕННЯ БУДОВИ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ВИМІРЮВАННЯМ ОМІЧНОГО ОПОРУ ОБМОТОК ЯКОРЯ І ЗБУДЖЕННЯ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

з дисципліни «Електричні машини»

ЗВІТ

Здобувач вищої
освіти _____ групи _____ _____
(підпис) (ПІБ)

Службові примітки
_____
_____
_____

Робота захищена з оцінкою_____
Викладач _____ _____
(підпис) (ПІБ)

Запоріжжя, 202___р.

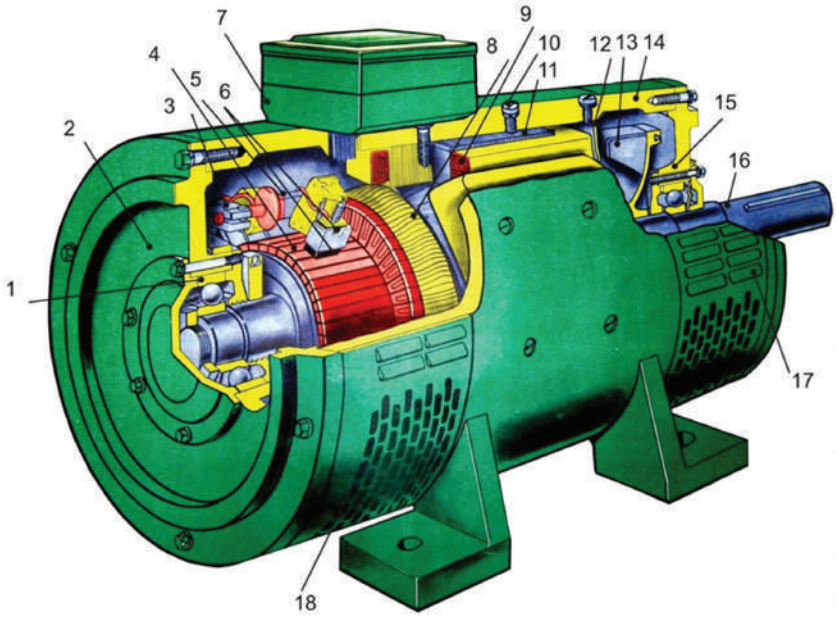
ДОДАТОК Б

ТЕХНІЧНІ ДАНІ ЩІТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Марки щіток	**Перехідне падіння напруги на пару щиток, В**	**Допустима щільність струму, А/мм²**	**Допустима швидкість, м/с**	**Тиск на щитку, кПа**	**Рекомендована галузь застосування**
Графітні					
ГЗ	1,9	11	25	20–25	Для генераторів та двигунів з полегшеними умовами комутації та для контактних кілець. Потужність до 10 кВт
611М	2,0	12	40	20–25	
610М	2,0	15	90	12–22	
Електро-графітовані					
ЭГ2А	2,2	10	45	20–25	Для генераторів та двигунів з середніми умовами комутації та для контактних кілець. Потужність більше 10 кВт при напрузі до 1000 В
ЭГ2АФ	2,2	15	90	15–21	
ЭГ4	2,0	12	40	15–20	
ЭГ8	2,4	10	40	20–40	
ЭГ14	2,5	11	40	20–40	
ЭГ51	2,2	12	60	20–25	
ЭГ61	3,0	13	60	35–50	
ЭГ71	2,2	12	40	20–25	
ЭГ74	2,7	15	50	17,5–25	
ЭГ74АФ	2,3	15	60	15–21	
ЭГ85	2,3	15	50	17,5–35	
Метало-графітні					
МГ2	0,5	20	20	18–23	Для низьковольтних генераторів

ДОДАТОК В

ЗАГАЛЬНА БУДОВА МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ



1 – підшипники; 2 – задній підшипниковий щит; 3 – траверса щіткоутримувачів; 4 – колектор; 5 – палець щіткоутримувача; 6 – щітки; 7 – коробка виводів; 8 – обмотка якоря; 9 – обмотка збудження; 10 – болтове кріплення полюса; 11 – осердя полюса; 12 – повітронапрявляючий щиток; 13 – вентилятор; 14 – корпус; 15 – передній підшипниковий щит; 16 – вал; 17 – жалюзі для виходу повітря; 18 – жалюзі для входу повітря

Рисунок В – Загальна будова МПС

ДОДАТОК Г

СТРУКТУРА УМОВНОГО ПОЗНАЧЕННЯ МАРОК ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СТАЛЕЙ

$$\frac{\mathbf{X}}{\mathbf{1}}\,\frac{\mathbf{X}}{\mathbf{2}}\,\frac{\mathbf{X}}{\mathbf{3}}\,\frac{\mathbf{X}}{\mathbf{4}}$$

Перша цифра – клас по структурному стану та виду прокатки:

1 – гарячекатана сталь;

2 – холоднокатана ізотропна сталь, що має однакові магнітні властивості вздовж та поперек напрямку прокату;

3 – холоднокатана анізотропна сталь, у якої магнітні властивості вздовж напрямку прокату кращі, ніж поперек.

Друга цифра – клас за змістом кремнію:

0 – зміст кремнію до 0,4 %;

1 – зміст кремнію від 0,4 до 0,8 %;

2 – зміст кремнію від 0,8 до 1,8 %;

3 – зміст кремнію від 1,8 до 2,8 %;

4 – зміст кремнію від 2,8 % до 3,8 %;

5 – зміст кремнію від 3,8 % до 4,8 %.

Третя цифра – група за основною нормованою характеристикою:

0 – питомі магнітні втрати при B = 1,7 Тл та f_1 = 50 Гц ($p_{1,7/50}$);

1 – питомі магнітні втрати при B = 1,5 Тл та f_1 = 50 Гц ($p_{1,5/50}$);

7 – індукція в середніх магнітних полях при напруженості поля 10 А/м (B_{10}).

Четверта цифра – порядковий номер сталі:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 – покращення магнітних властивостей по мірі збільшення номеру.

У відповідності з ДСТУ вітчизняними заводами випускається холоднокатана анізотропна електротехнічна сталь у вигляді листів, рулонів та різаної стрічки наступних марок: 3411, 3412, 3413, 3414, 3415, 3404, 3405, 3406, 3407, 3408, 3471 та 3472.

ДОДАТОК Д

СТРУКТУРА УМОВНОГО ПОЗНАЧЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ

$$\frac{\mathbf{X}}{\mathbf{1}}\ \frac{\mathbf{XXX}}{\mathbf{2}}\ \frac{\mathbf{X}}{\mathbf{3}}\ -\ \frac{\mathbf{XXXX}}{\mathbf{4}}\ \frac{\mathbf{XX}}{\mathbf{5}}\ \frac{\mathbf{X}}{\mathbf{6}}\ -\ \frac{\mathbf{XXX}}{\mathbf{7}}$$

1 – кількість фаз і призначення трансформатора:

О – однофазний трансформатор;

Т – трифазний трансформатор;

А – автотрансформатор;

Р – трансформатор з розщепленою обмоткою НН;

Э – трансформатор для дугових електропечей.

2 – умовне позначення видів охолодження трансформаторів.

3 – позначення особливостей виконання трансформаторів:

Т – триобмотковий. При відсутності знаку – двохобмотковий;

Н – трансформатор з РПН (регулювання вихідної напруги під навантаженням). При відсутності знаку – з ПБЗ (регулювання вихідної напруги без збудження, тобто з відключеним трансформатором від мережі живлення);

З – трансформатор з захистом за допомогою азотної подушки без розширювача;

Л – трансформатор з литою ізоляцією;

Ф – трансформатор з боковим розташуванням вводів;

С – трансформатор для власних потреб електростанції;

П – трансформатор для ліній передач постійного струму;

В – трансформатор вибухобезпечний;

Ш – трансформатор для шахт;

М – трансформатор багатоцільового призначення для живлення кіл керування, місцевого освітлення, сигналізації станків, електроінструмента.

4 – номінальна потужність трансформатора, кВА.

5 – клас напруги обмотки ВН, кВ.

6 – додаткові літерні позначення, які характеризують галузі використання спеціальних силових трансформаторів:

А – для частотно-регулюємого асинхронного електропривода;

Б – для побутового обладнання;

В – для збуджувачів синхронних генераторів;

Г – для гальваностегії;

Ж – для електрифікованого залізничного транспорту;

И – для інверторних агрегатів тягових підстанцій залізниць;

М – для підстанцій метрополітену;

Р – для перетворювачів, які працюють з перехресною схемою електроприводів постійного струму;

С – для частотно-регулюємого синхронного двигуна;

ЭК – для електроприводів екскаваторів.

7 – кліматичне виконання (У; УХЛ; Т; О) і категорія розміщення (1, 2, 3, 4, 5).

ДОДАТОК Е

УМОВНЕ ПОЗНАЧЕННЯ ВИДУ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Умовне позначення	Вид системи охолодження
СУХІ ТРАНСФОРМАТОРИ	
С	Природне повітряне при відкритому виконанні
СЗ	Природне повітряне при захищеному виконанні
СГ	Природне повітряне при герметичному виконанні
СД	Повітряне з примусовою циркуляцією повітря
МАСЛЯНІ ТРАНСФОРМАТОРИ	
М	Природна циркуляція повітря і масла
Д	Примусова циркуляція повітря і природна циркуляція масла
МЦ	Природна циркуляція повітря і примусова циркуляція масла з ненаправленим потоком масла
НМЦ	Те ж з направленим потоком масла
ДЦ	Примусова циркуляція повітря і масла з ненаправленим потоком масла
НДЦ	Те ж з направленим потоком масла
МВ	Примусова циркуляція води і природна циркуляція масла
Ц	Примусова циркуляція води і масла з ненаправленим потоком масла
НЦ	Те ж з ненаправленим потоком масла
ТРАНСФОРМАТОРИ З НЕГОРЮЧИМ РІДКИМ ДІЕЛЕКТРИКОМ (СОВТОЛОМ)	
Н	Природне охолодження з негорючим рідким діелектриком
НД	Охолодження негорючим рідким діелектриком з дуттям і з ненаправленим потоком рідкого діелектрика
ННД	Те ж з направленим потоком рідкого діелектрика

ДОДАТОК Ж

ПРИКЛАДИ УМОВНОГО ПОЗНАЧЕННЯ ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

ТМ-250/10 – У1 – трифазний двохобмотковий трансформатор з природнім масляним охолодженням з ПБВ, номінальна потужність 250 кВА, класом напруги обмотки ВН – 10 кВ, для помірного клімату і встановлення на відкритому повітрі.

ТМН-630/35 – У1 – трифазний двохобмотковий трансформатор з природнім масляним охолодженням з РПН, номінальна потужність 630 кВА, класом напруги обмотки ВН – 35 кВ, для помірного клімату і встановлення на відкритому повітрі.

ТСЗ-100/10 – У3 – трифазний сухий трансформатор з природнім повітряним охолодженням при захищеному виконанні, двохобмотковий, номінальна потужність 100 кВА, класом напруги обмотки ВН – 10 кВ, для помірного клімату і встановлення в закритому приміщенні з природною вентиляцією.

До технічних характеристик трансформаторів відносяться наступні величини:

– номінальна потужність трансформатора $S_н$, кВА;
– номінальна лінійна напруга обмоток ВН та НН трансформатора $U_{1н}$ та $U_{2н}$, кВ;
– номінальний струм обмоток ВН та НН трансформатора $I_{1н}$ та $I_{2н}$, А;
– номінальна частота мережі живлення $f_{1н}$ = 50 Гц;
– напруга короткого замикання $u_{к\%}$;
– струм холостого ходу $i_{0\%}$;
– схема та група з'єднання.

ДОДАТОК И

ДАНІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГРУПИ З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

Група з'єднання	**Кутовий зсув**	**Можлива схема з'єднання**	$U_{bB} = U_{cC}$	U_{cB}
0	0°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$U_{2л} \cdot (k_л - 1)$	більше
1	30°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 - \sqrt{3}k_л + k_л^2}$	більше
2	60°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 - k_л + k_л^2}$	більше
3	90°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 + k_л^2}$	більше
4	120°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 + k_л + k_л^2}$	більше
5	150°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{3}k_л + k_л^2}$	дорівнює
6	180°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$U_{2л} \cdot (k_л + 1)$	менше
7	210°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{3}k_л + k_л^2}$	менше
8	240°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 + k_л + k_л^2}$	менше
9	270°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 + k_л^2}$	менше
10	300°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 - k_л + k_л^2}$	менше
11	330°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$U_{2л} \cdot \sqrt{1 - \sqrt{3}k_л + k_л^2}$	дорівнює

ДОДАТОК К

ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД ТРИФАЗНИХ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ



1. Потужність 630 кВА і напруга 10 кВ (тип ТМ-630/10)



2. Потужність 630 кВА і напруга 10 кВ (тип ТМГ-630/10)



3. Потужність 1000 кВА і напруга 10 кВ із литою ізоляцією (тип ТСЗЛ-1000/10)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кевшин А. Г., Федосов С. А, Галян В. В. Електричні машини : конспект лекцій. Луцьк, 2020. 62 с.
2. Електричні машини і апарати : навчальний посібник / Ю. М. Куценко та ін. Київ : Аграрна освіта, 2013. 449 с.
3. Загірняк М. В., Невзілін Б. І. Електричні машини : підручник. Київ : Знання, 2009. 399 с.
4. Бєлікова Л. Я., Шевченко Л. Я. Електричні машини : навчальний посібник. Одеса : Наука і техніка, 2012. 480 с.
5. Електричні машини : навчальний посібник. Ч.1 / А. Ю. Букарос, В. Т. Беліков, О. М. Герега. Дніпро : Арбуз, 2021. 101 с.
6. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навчальний посібник, за ред. В. І. Мілих. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 452 с.
7. Електричні машини: машини постійного струму і трансформатори : начальний посібник для виконання лабораторних робіт / С. О. Квітка та ін. Мелітополь : ВПЦ «Люкс», 2019. 167 с.
8. Яцун М. А. Електричні машини: підручник. Львів: Львівська політехніка, 2001. 428 с.
9. Андрієнко В. М., Куєвда В. П. Електричні машини : навчальний посібник. Київ : НУХТ, 2010. 366 с.
10. Електричні машини : навчальний посібник / Г. Г. Півняк та ін. Дніпропетровськ : Видавництво Національного гірничого університету, 2003. 329 с.

Наукове видання

ГАЛЬКО Сергій Віталійович
НОСАНЬ Сергій Вікторович
МІРОШНИК Олександр Олександрович

ПРАКТИКУМ З ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН: МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ І ТРАНСФОРМАТОРИ

Навчальний посібник

Дизайн обкладинки – *В. Савельєва*
Технічний редактор – *О. Гринюк*
Верстка – *Ю. Семенченко*

Підписано до друку 11.11.2026 р. Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Гарнітура Times. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 10,46. Наклад 300. Замовлення № 1026-97.
Ціна договірна. Віддруковано з готового оригінал-макета.

Українсько-польське наукове видавництво “Liha-Pres”
79000, м. Львів, вул. Технічна, 1
87-100, м. Торунь, вул. Лубіцка, 44
Телефон: +38 (050) 658 08 23
E-mail: editor@liha-pres.eu
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи
ДК № 6423 від 04.10.2018 р.