

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Микола Реуцький, Михайло Коваленко, Сергій Цивінський

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів, що навчаються за освітньо-професійною
програмою підготовки бакалаврів «Електричні машини і апарати»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

**Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026**

Рецензент: *Островерхов М. Я.*, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний редактор: *Гераскін О. А.*, канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 03.04.2026 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенергетехніки та автоматики
(протокол № 9 від 30.03.2026 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Реуцький Микола Олександрович, канд. техн. наук, доц.
Коваленко Михайло Анатолійович, канд. техн. наук, доц.
Цивінський Сергій Станіславович, канд. техн. наук, доц.

ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Технологія виробництва електричних машин. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник з освітньої компоненти «Технологія виробництва електричних машин» до виконання лабораторних робіт для здобувачів, які навчаються за ОПП першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М. О. Реуцький, М. А. Коваленко, С. С. Цивінський. КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 3,43 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 100 с.

У навчальному посібнику розглянуто основні завдання лабораторних робіт: поглиблене засвоєння теоретичних положень дисципліни та набуття умінь і практичних навичок по визначенню технічного стану обмоток асинхронного двигуна, розборці двигуна та видаленню обмотки; заміру геометрії магнітопроводу та розрахунку обмотки асинхронного двигуна при ремонті; виготовленню та укладанню обмотки в пази статора асинхронного двигуна та з'єднанню схеми обмотки; складанню та випробуванню асинхронного двигуна після ремонту.

© М.О. Реуцький, М.А. Коваленко, С.С. Цивінський, 2026
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	5
ПЕРЕДМОВА.....	6
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.....	9
1.1 Техніка безпеки при виконанні лабораторних робіт.....	9
1.2 Підготовка і допуск до лабораторних занять	9
1.3 Вимоги до оформлення та захист лабораторних робіт	12
1.4 Рейтингова система оцінювання	12
РОЗДІЛ 2. БУДОВА ТА РОЗРАХУНОК ВСИПНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ.....	14
2.1 Конструктивні особливості всипних обмоток.....	14
2.2 Двошарові обмотки.....	18
2.3 Одношарові обмотки.....	21
2.4 Обмотки з дробовим числом пазів на полюс і фазу.....	24
2.5 Двофазні обмотки асинхронних мікродвигунів.....	27
2.6 Модернізація асинхронних двигунів під час ремонту.....	31
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБМОТОК.....	32
3.1 Вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками за допомогою мегомметра.....	32
3.2 Пошук несправностей ізоляції обмоток за допомогою апарату ЕЛ-1....	34
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКИ ОБМОТОК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ РЕМОНТІ.....	39
4.1 Методика перевірного розрахунку.....	39
4.2 Електромагнітний розрахунок.....	42
4.3 Перерахунок обмотки асинхронного двигуна на іншу напругу.....	46
4.4 Перерахунок асинхронного двигуна при збільшенні повітряного проміжку.....	50
4.5 Перерахунок трифазної обмотки на однофазну.....	53
4.6 Вмикання трифазних двигунів в однофазну мережу без перемотування	55

РОЗДІЛ 5. МЕТОДИКИ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	53
5.1 <i>Лабораторна робота №1</i> Вступне заняття. Встановлення причини виходу з ладу асинхронного двигуна, розбирання двигуна та видалення обмотки.....	53
5.2 <i>Лабораторна робота №2</i> Замір геометрії магнітопроводу та розрахунок обмотки асинхронного двигуна при ремонті.....	61
5.3 <i>Лабораторна робота №3</i> Виготовлення та укладання обмотки в пази статора асинхронного двигуна та з'єднання схеми обмотки.....	77
5.4 <i>Лабораторна робота №4</i> Складання та випробування асинхронного двигуна.....	86
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	97
Додаток А. Обмотувально-розрахункова карта.....	98
Додаток Б. Діаметри і розрахунковий перетин обмотувальних проводів.....	99
Додаток В. Складання можливих варіантів схем обмоток.....	100

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

<i>АД</i>	–	<i>асинхронний двигун</i>
<i>АМ</i>	–	<i>асинхронна машина</i>
<i>ЕМ</i>	–	<i>електрична машина</i>
<i>ЕРС</i>	–	<i>електрорушійна сила</i>
<i>КЗ</i>	–	<i>коротке замикання</i>
<i>ККД</i>	–	<i>коефіцієнт корисної дії</i>
<i>ОПП</i>	–	<i>освітньо-професійна програма</i>
<i>ПК</i>	–	<i>персональний комп'ютер</i>
<i>РГР</i>	–	<i>розрахунково-графічна робота</i>
<i>ХХ</i>	–	<i>холостий хід</i>
τ	–	<i>полюсна поділлка</i>
$\cos \varphi$	–	<i>коефіцієнт потужності</i>
<i>у</i>	–	<i>крок обмотки</i>

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Технологія виробництва електричних машин» відноситься до вибіркової дисципліни професійної підготовки, яка розрахована на підготовку майбутніх бакалаврів відповідно до освітньо-професійної програми (ОПП) за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати».

Знання, одержані при вивченні дисципліни «Технологія виробництва електричних машин», використовуються безпосередньо в інженерній практиці при виробництві та ремонті електричних машин.

Відповідно до вимог ОПП, здобувачі освітньо-наукового рівня підготовки бакалавр, після засвоєння матеріалів навчальної дисципліни мають продемонструвати знання конструкції, призначення та особливостей функціонування основних типів обладнання для ремонту та випробування електричних машин; вміння користуватись довідковою літературою згідно з діючими державними стандартами та навички розрахунку, ремонту, до- та післяремонтного випробування електричних машин, необхідних для уміння складати технологічні схеми виробництва та ремонту електричних машин, організації технологічного процесу.

Асинхронні машини (АМ), зокрема трифазні асинхронні електродвигуни, в теперішній час є найбільш поширеними електричними машинами (ЕМ) змінного струму. Завдяки простій конструкції, високій надійності в роботі, задовільним робочим характеристикам та відносно невеликій вартості асинхронні двигуни знайшли широке застосування практично у всіх галузях народного господарства – в промисловості, сільському господарстві, на транспорті.

Найважливіша частина будь-якої електричної машини – її обмотка, в якій відбуваються основні електромагнітні процеси перетворення енергії. В найбільш

поширених типах асинхронних двигунів застосовують наступні види обмоток: трифазні обмотки змінного струму, які застосовують в статорах, а також в роторах асинхронних двигунів з фазним ротором; однофазні обмотки статорів асинхронних однофазних двигунів з короткозамкненим ротором.

Головною причиною передчасного виходу з ладу асинхронних двигунів є різні види несправностей їх обмоток. Підвищення надійності асинхронних двигунів залежить від дотримання вимог технології обмотувальних робіт та від кваліфікації обмотувальників. На сучасних електромашинобудівних підприємствах багато операцій механізовані, але все одно дуже багато операцій виконується вручну. Тому вимоги до кваліфікації обмотувальників мають тенденцію постійно підвищуватись.

Кваліфікований електромеханік повинен не тільки вміти виявляти несправність обмоток, але і самостійно розрахувати, виготовити та укласти обмотку в пази магнітопроводу, вміти провести післяремонтні випробування електричної машини та оцінити електромеханічні характеристики відремонтованої машини.

При вивченні технології обмотувально-ізолювальних робіт необхідно враховувати, що кожна операція, яку виконує обмотувальник, є частиною загального технологічного циклу виготовлення або ремонту асинхронного двигуна. Тому від якості виконання найменшої операції залежить надійність роботи всієї електричної машини.

Метою лабораторних робіт, передбачених силябусом дисципліни «Технологія виробництва електричних машин», є поглиблення знань з конструкції, принципу дії і теорії електричних машин та трансформаторів. Виконання лабораторних робіт сприяє придбанню вмінь та практичних навичок по виготовленню, випробуванню та капітальному ремонту обмоток асинхронних двигунів.

Відповідно до мети, основними задачами лабораторних робіт є:

- обов'язкова підготовка до лабораторної роботи;

- суворе дотримання вимог техніки безпеки;
- дотримання правил і інструкцій з проведення лабораторної роботи;
- відповідне оформлення протоколу і захист результатів лабораторної роботи.

В навчальному посібнику узагальнено основні завдання лабораторних робіт: поглиблене засвоєння теоретичних положень дисципліни та набуття умінь і практичних навичок по визначенню технічного стану обмоток асинхронного двигуна, розборці двигуна та видаленню обмотки; заміру геометрії магнітопроводу та розрахунку обмотки асинхронного двигуна при ремонті; виготовленню та укладанню обмотки в пази статора асинхронного двигуна та з'єднанню схеми обмотки; складанню та випробуванню асинхронного двигуна після ремонту. Призначено для студентів, що навчаються за освітньою програмою підготовки бакалаврів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електричні машини і апарати».

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Техніка безпеки при виконанні лабораторних робіт

Студенти, що вперше приходять у лабораторію, зобов'язані прослухати інструкцію з техніки безпеки, дотримання якої є обов'язковим впродовж усього циклу лабораторних робіт.

Враховуючи, що в лабораторії використовується напруга 220 В змінного струму, а опір тіла людини становить близько 500 Ом, зазначені величини напруги є небезпечними. Забороняється проводити з'єднання та переключення в схемі, що перебуває під напругою. Слід пам'ятати, що відкриті обертові частини електричних машин мають частоту обертання до 3000 об/хв. Тому треба дотримуватися обережності, пам'ятаючи, що гладкий вал, що обертається, здатний «захоплювати» волосся та частини одягу, що звисають.

У випадку ураження струмом, обриву дротів, які знаходяться під напругою, потрібно негайно відключити напругу.

Невиконання правил техніки безпеки може призвести до травм, виходу з ладу вимірювальних приладів, допоміжних пристроїв і самої асинхронної машини, яку випробовують.

Додаткові інструкції з техніки безпеки по кожній конкретній лабораторній роботі надає викладач безпосередньо перед початком її виконання.

1.2 Підготовка і допуск до лабораторних занять

На першому (вступному) занятті студент повинен ознайомитися з інструкцією з техніки безпеки при роботі в лабораторії, з устаткуванням, з вимогами по допуску, проведення, оформлення і захисту лабораторних робіт. Підготовка полягає в усвідомленні і вмінні сформулювати студентом мету і завдання лабораторної роботи, конструкції, принципу дії, основ теорії випробуваної електричної машини, її основних характеристик і області застосування.

На момент допуску кожен студент має приготувати протокол до поточної роботи, яку планує виконувати. Протокол до роботи виконують на аркушах формату

A4, він має титульний лист, оформлення і зміст якого повинні відповідати вимогам до технічної документації. На наступних аркушах вказують мету і програму роботи. Робоча бригада студентів (не менше, ніж дві особи) повинна представити один робочий зошит, у якому підготовані таблиці для внесення довідкових даних і результатів вимірювань.

Допуск студента до заняття здійснюється після індивідуальної бесіди з викладачем. Студенти, що не пройшли інструктаж з техніки безпеки і не підготувалися до лабораторної роботи, до занять не допускаються.

Допущені до виконання лабораторної роботи студенти зобов'язані ознайомитися з робочим місцем: щитом живлення, включенням і виключенням напруги на робочому місці, з'ясувати величину напруги, що подається, та її характер, обладнанням та приладами для виконання лабораторної роботи.

Далі студенти повинні записати в робочий зошит паспортні дані асинхронної машини, з'ясувати, які затискачі машин, реостатів і допоміжних пристроїв відповідають окремим точкам електричної схеми, правильно вибрати вимірювальні прилади та обладнання для використання в робочій схемі.

Після зазначеної підготовки необхідно приступити до безпосереднього виконання роботи. Спочатку треба раціонально розташувати обладнання та прилади і допоміжні елементи.. Від цього залежить зручність і швидкість виконання роботи.

Всі операції по виявленню несправностей в обмотках, розбиранню машини, видаленню обмоток, заміру геометрії магнітопроводу, виготовленню та укладанню обмоток необхідно проводити у відповідності з рекомендаціями, наведеними в навчальному посібнику.

Особливу увагу необхідно приділити післяремонтним випробуванням асинхронної машини. Збирання схеми для проведення випробувань проводять в такій послідовності: почавши з одного затискача джерела живлення, треба зібрати спочатку струмове послідовне коло і закінчити на іншому затискачі джерела. Далі до цього кола поступово підключають всі паралельні гілки відповідно до схеми. Провідники, що з'єднують затискачі машин, реостатів і вимірювальних приладів, повинні бути щільно приєднані.

Після обов'язкової перевірки викладачем схеми студенти мають право ввімкнути напругу. Щоб переконатися в тому, що схема працює вірно, студенти повинні в момент вмикання напруги спостерігати за показаннями вимірювальних приладів. Це дозволяє вчасно виявити несправності і неточності схеми (обриви неправильне положення повзунка реостата, невідповідні вимірювальним величинам межі приладів і т.і.).

Досліди необхідно проводити швидко, але без поспіху. Показання вимірювальних приладів записують олівцем у заздалегідь підготовлені таблиці робочого зошита, коли всі необхідні умови проведення даного досліду (наприклад, постійна напруга, постійна частота мережі і т.і.) будуть виконані. Відлік показань вимірювальних приладів потрібно робити в поділках, бажано одночасно по команді одного з членів бригади, що керує дослідом. Обов'язково вказувати ціну поділки.

Раціональний розподіл обов'язків – застава організованого та швидкого проведення дослідів. Обов'язки кожного студента в різних дослідах варто міняти з таким розрахунком, щоб всі студенти бригади отримали практичні навички з випробування та ремонту електричних машин.

Після закінчення конкретного досліду студенти повинні перевести показання приладів в абсолютні величини, використовуючи ціни поділки. Результати розрахунків необхідно записати в робочий зошит. У більшості випадків саме розташування точок залежностей може вказати на неточність ряду запису, помилки у вимірах, недотримання умов проведення досліду і т.п. Точки, що випали, повинні бути перевірені ще раз. Результати досліду показують викладачу, після чого можна переходити до наступного експерименту.

Після закінчення роботи лабораторний стенд приводять в порядок, а робочий зошит із внесеними даними вимірювань підписує викладач.

1.3 Вимоги до оформлення та захист лабораторної роботи

Оформлення протоколу лабораторної роботи повинно відповідати вимогам державного стандарту ДСТУ 3008:2015 — «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання» [1].

Кожен студент індивідуально виконує звіт з виконаної лабораторної роботи на листах формату А4. Перший лист – титульний – оформлюють за зразком, прийнятим для лабораторних робіт на кафедрі електромеханіки. Другий і подальші листи містять мету роботи і її задачі, програму роботи, вихідні дані, результати роботи та обробки даних, графічні характеристики. В кінці звіту даються висновки по роботі, що містять аналіз виконаної роботи. Правильно оформлений протокол і відповіді на питання, які наведені в підрозділах питань для самоконтролю, є підставою для захисту конкретної лабораторної роботи.

1.4 Рейтингова система оцінювання

Ваговий бал – 5 (2 бали за допуск і виконання лабораторної роботи + 3 бали за розрахунок і захист лабораторної роботи). Кількість лабораторних робіт згідно з силабусами дисциплін – 4. Максимальна кількість балів за виконання та захист всіх лабораторних робіт – $5 \cdot 4 = 20$ балів.

Критерії оцінювання підготовки, допуску, виконання та захисту лабораторних робіт:

- якісна підготовка до роботи (наявність протоколу, знання мети і завдання роботи, основних теоретичних положень, знання методики виконання робіт, що перевіряються перед виконанням роботи), активна участь у роботі – 2 бали максимально;
- обробка результатів досліджень та захист лабораторної роботи – 3 бали максимально.

Лабораторні роботи слід захищати в часових межах, призначених для вивчення окремих змістових модулів дисциплін.

Згідно з силабусом дисциплін кожен студент самостійно виконує розрахунково-графічну роботу (РГР), присвячену розрахунку та складанню

можливих варіантів схем обмоток при проведенні лабораторних робіт.

Максимальна кількість балів за виконання РГР – 10. Критерії оцінювання:

- повне, точне і вчасне виконання – 10 балів;
- розрахунок та побудова схем обмоток неточні, є окремі несуттєві помилки – 7...9 балів;
- розрахунок та побудова схем обмоток неповний, є окремі суттєві помилки – 1...6 балів;
- розрахунок та побудова схем обмоток неправильний – 0 балів.

Виконання РГР здійснюється під час підготовки до проведення другої лабораторної роботи; задача РГР відбувається під час здачі лабораторної роботи.

2. БУДОВА ТА РОЗРАХУНОК ВСИПНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1 Конструктивні особливості всипних обмоток

Два провідники, розташовані в пазах, віддалених один від одного на крок y і сполучені між собою, утворюють виток. Кожен виток може складатися з декількох паралельних (елементарних) провідників. Сукупність послідовно сполучених витків, укладених в одну і ту ж пару пазів, утворюють котушку (або секцію). Провідники котушки, які розташовані в одному і тому ж пази, називаються стороною котушки. Крок обмотки виражається в долях полюсної поділки або в зубцевих поділках.

Крок y який дорівнює полюсній поділці τ називається діаметральним, або повним $y = \tau$. Якщо $y < \tau$, то крок є скороченим, якщо $y > \tau$, то крок є подовженим. Сукупність котушок однієї і тієї ж фази, розташованих в сусідніх пазах і сполучених послідовно, утворює котушкову групу. Сполучені послідовно, паралельно або послідовно-паралельно котушкові групи утворюють обмотку фази. В трифазному АД обмотки фаз з'єднують в трикутник або зірку. Важливим параметром обмотки є число пазів на полюс і фазу

$$q = \frac{z}{2 \cdot p \cdot m} \quad (2.1)$$

де p – число пар полюсів двигуна;

z – число пазів (або зубців);

m – число фаз обмотки.

Числове значення q визначає ширину фазної зони і кількість котушок в котушковій групі. При $q = 1$ котушки обмотки однієї фази розташовуються тільки в одному пази на кожній полюсній поділці, таку обмотку називають зосередженою. При $q > 1$ обмотку називають розподіленою.

Електрорушійні сили (ЕРС), індуковані в активних сторонах котушок,

розташованих в двох сусідніх пазах, зміщені по фазі на кут $\alpha = \frac{p \cdot 360}{z}$ і можуть бути представлені векторами на зірці пазових ЕРС, на якій номер вектору ЕРС відповідає номеру котушки розташованій в даному пази (рис. 2.1).

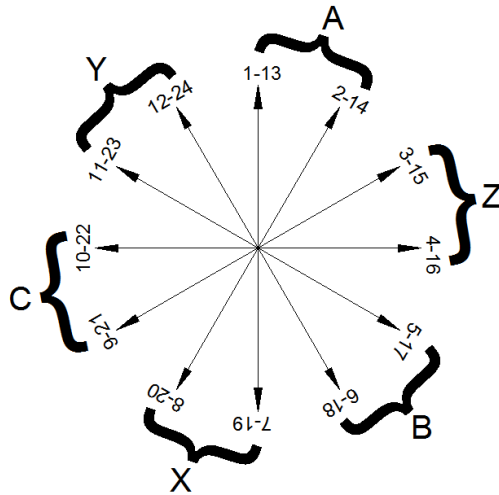


Рис. 2.1. Зірка пазових ЕРС для випадку: $p = 2$; $z = 24$; $m = 3$

Котушки всипних обмоток виготовляють з круглого ізолюваного дроту на шаблонах спеціальних верстатів. Котушки не мають форми з точно встановленими геометричними розмірами, їх укладають (всипають) в напівзакриті пази сердечників через вузькі шліци (відкриття пазу) (рис. 2.2).

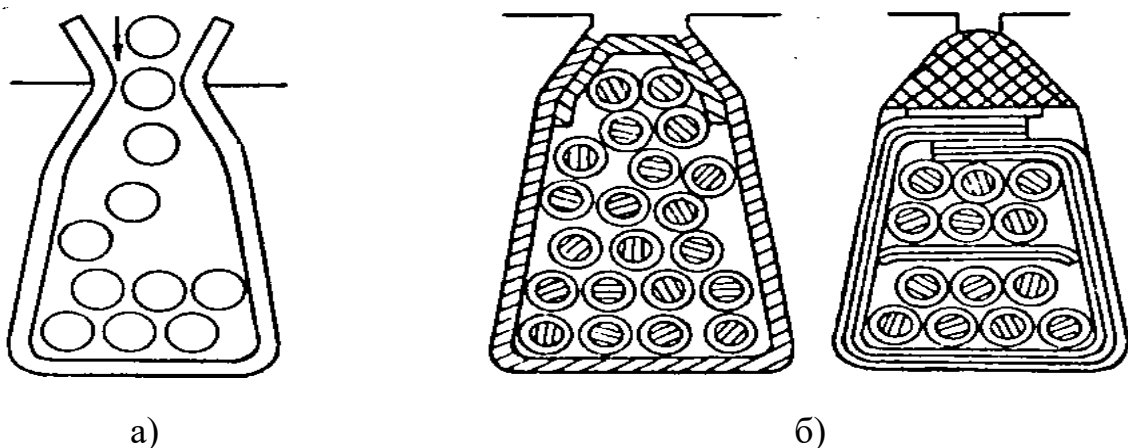


Рис. 2.2. Всипні обмотки: а) одношарові; б) двошарові

За способом розташування в пазах обмотки розділяють на одношарові (рис. 2.2 а) і двошарові (рис. 2.2 б). В одношаровій обмотці корисна площа паза

зайнята провідниками однієї активної сторони котушки, а при двошаровій двома активними сторонами, що належать різним котушкам. Число котушок в двошаровій обмотці дорівнює числу пазів, а в одношаровій половині числа пазів.

Двошарові обмотки з укороченим кроком мають ряд переваг в порівнянні з одношаровими обмотками. У двошарових обмотках витрати обмотувального дроту на 10...15% менше, ніж в одношарових за рахунок меншої довжини лобових частин. У двигунах з двошаровими обмотками форма кривої поля близька до синусоїдальної, а ККД і $\cos\varphi$ вище, ніж в двигунах з одношаровими обмотками. Двошарові обмотки використовують при будь-якому значенні q .

Асинхронні електродвигуни потужністю до 15 кВт, в основному, виконують з одношаровими обмотками. Пояснюється це тим, що в одношарових обмотках коефіцієнт заповнення паза міддю вище, ніж в двошарових, оскільки в двошарових обмотках між шарами укладається ізоляційна прокладка. Крім того, одношарові обмотки більш технологічні двошарових.

При виборі виду обмотки певну роль відіграє наявність потрібного перетину обмотувального проводу. При великих діаметрах проводу легше виконати обмотку двошаровою, оскільки товщина котушки при цьому вдвічі менше, ніж в одношаровій, що полегшує процес вигину лобових частин. При малих діаметрах проводів і необхідності виконувати обмотку в два або три паралельних проводи вигідніше застосувати одношарову обмотку, що дозволяє мати вищий коефіцієнт заповнення паза міддю.

Питання вибору типу обмотки іноді розв'язується, виходячи з конструктивних особливостей даного електродвигуна. При малій висоті спинки статора багатополюсні, тихохідні АД і невеликому просторі між підшипниковим щитом і торцем сердечника статора обмотку слід виконувати двошаровою, у якій лобові частини рівномірно розподіляються по колу статора, чому вони і мають менший виліт.

При перемотуванні електродвигунів слід прагнути до покращення їх електричних властивостей і технічних даних. У багатьох випадках можливість для цього є, особливо при перемотуванні електродвигунів старих типів. Це зв'язано із

застосуванням нових обмотувальних дротів з більш теплостійкою і тоншою ізоляцією і нового вигляду електроізоляційних матеріалів

Розташування сторін котушок в пазах сердечника, з'єднання котушок в котушкові групи, котушкових груп між собою, а також фаз зображують умовно на схемі обмотки. Схемою керуються при укладанні котушок, монтажі з'єднань і вивідних кінців. Розгорнена схема обмотки представляє собою вид з сторонами внутрішньої поверхні статора. Сторони котушок, укладені в пази, зображують в одношарових обмотках суцільними прямими лініями, а в двошарових двома поряд розташованими прямими лініями: суцільною – сторону котушки, укладену у верхню частину паза, пунктирною – сторону котушки, укладену на дно паза. Для наочності обмотки фаз можуть позначатися різними типами ліній: жирною і тонкою суцільними, пунктирними і т.і.

Всі фази обмотки в трифазних машинах сполучають однаково, тому досить побудувати схему з'єднань котушкових груп однієї фази і зробити відповідні написи (рис. 2.3).

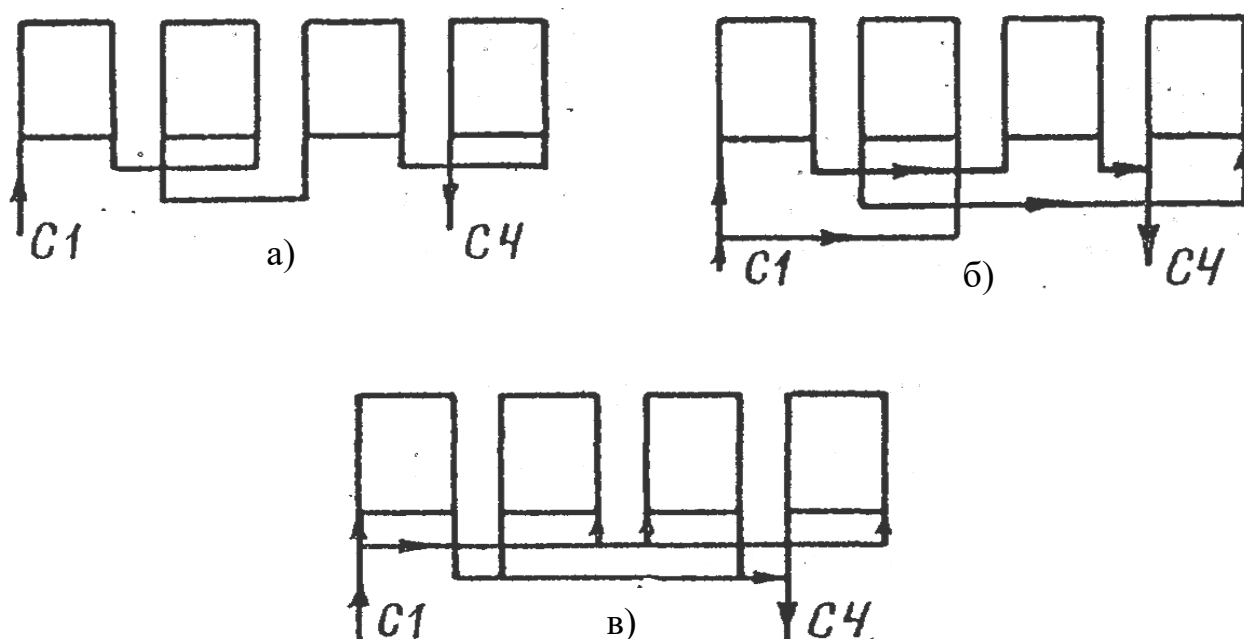


Рис. 2.3. Схеми з'єднань котушкових груп однієї фази: а) послідовне; б) в дві паралельних гілки; в) в чотири паралельні гілки

Чотири котушкові групи можна з'єднати послідовно (рис. 2.3 а), в дві паралельні гілки, кожна з яких має дві котушкові групи, сполучені послідовно (рис. 2.3 б), і в чотири паралельні гілки (рис. 2.3 в). При утворенні декількох паралельних гілок слід пам'ятати, що послідовно сполучають котушкові групи, розташовані не поряд, а діаметрально.

2.2 Двошарові обмотки

При складанні схеми двошарової обмотки зазвичай на зірці пазових ЕРС зображують вектори ЕРС сторін котушок, розташованих у верхньому шарі. По відношенню до верхнього шару розміщення сторін нижнього шару і фаза їх ЕРС визначає крок y між двома сторонами котушки. Вектори ЕРС котушок, що належать до однієї фази, на зірці пазових ЕРС розташовують у відповідних зонах.

Початок фаз трифазної обмотки зміщені один щодо одного в просторі на 120 електричних градусів, що еквівалентно зсуву на $(2/3)\tau$. В межах 120 електричних градусів розміщується $2q$ пазів. Тому відносно початку фази А початок фази В зсунутий на $2q$ пазів, а початок фази С – на $4q$ пазів. Побудову схеми обмотки зручно починати з побудови зірки пазових ЕРС (рис. 2.4).

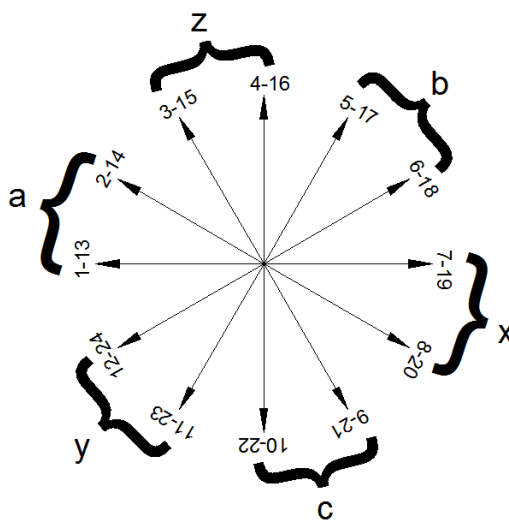


Рис. 2.4. Зірка пазових ЕРС для чотирьохполюсної машини при $2p = 4$; $z = 24$; $q = 2$

У багатополісній машині відстань, яка дорівнює двом полюсним поділкам, відповідає 360 електричних градусів. Тому кожній частині обмотки, розташованої під однією парою полюсів, відповідає одна зірка пазових ЕРС.

При цілому q (в даному випадку $q = 2$) всі зірки пазових ЕРС, що належать кожній парі полюсів, поєднуються, внаслідок чого будь-який вектор зірки відображає p ЕРС, індуктованих в кожній з p активних сторін котушок, розташованих на (рис. 2.4) відстані 2τ .

Котушки, вектори ЕРС яких розміщуються в одній зоні, сполучають послідовно (в даному випадку, котушки, розташовані в пазах 1 і 2, що належать зоні А).

Зону шестизонної обмотки (А-Z-B-X-C-Y), розташовану навпроти зони А, позначають буквою Х, навпроти зони В – буквою У, навпроти зони С – Z. Фази шестизонної обмотки складають котушки, ЕРС яких розташовані в двох протилежних зонах на зірці пазових ЕРС. Котушки, верхні сторони яких розташовані в зонах А і Х, складають фазу А, в зонах В і У – фазу В, в зонах С і Z – фазу С. Для того, щоб ЕРС окремих зон у фазі склалися, котушки різних зон сполучають зустрічно.

Побудову схеми обмотки зручно розпочати з розподілу пазів по фазах (відповідно до зірки пазових ЕРС). Верхні сторони котушкової групи кожної фази займають q пазів, відповідних одній зоні обмотки. У пазах, що мають номер від 1 до q , лежать верхні сторони секції фази А; у пазах від $1+q$ до $2q$ – верхні сторони секцій фази С; у пазах під номерами від $1+2q$ до $3q$ – верхні сторони секцій фази В.

На рис. 2.5 показана розгорнена схема двошарової обмотки з укороченим кроком. Кожна фаза обмотки має $2q = 4$ котушкових груп. Кінець другої котушкової групи сполучений з кінцем першої котушкової групи, початок другої котушкової групи сполучено з початком третьої котушкової групи і т.д. Всі котушкові групи в цій схемі сполучені послідовно, тобто обмотка має одну паралельну гілку. Число паралельних гілок в цій схемі може дорівнювати $2p$.

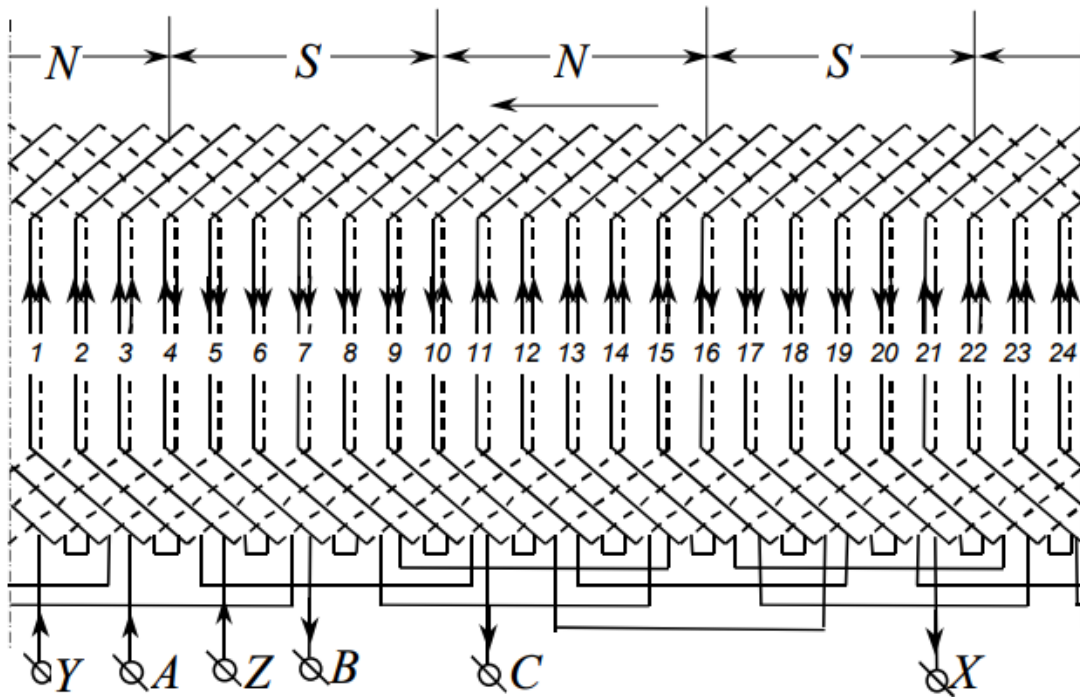


Рис. 2.5. Двошарова петльова обмотка з укороченим кроком

$$(2p = 4, a = 1, 2q = 4, y = 0,8\tau, Z = 24)$$

Зазвичай котушки двошарової обмотки укладають "з підйомом кроку". При цьому способі укладання перші котушки, число яких дорівнює кроку обмотки, укладають однією стороною на дно поряд розташованих пазів, залишаючи інші сторони котушок не укладеними в пази. Подальші котушки укладають однією стороною на дно паза, а іншою – у верхню частину паза. Причому, для укладання останніх котушок, число яких теж дорівнює кроку, доводиться відгортати вгору убік котушки, одна сторона яких не була укладена в паз. Останніми укладають ці відігнуті сторони котушок, для чого їх потрібно ще раз відігнути в лобових частинах у зворотний бік.

Укладання з "підйомом кроку" забезпечує симетричну форму лобових частин, рівність опорів всіх фаз і паралельних гілок, рівномірне охолодження, можливість утворення максимального числа паралельних гілок $a = 2p$.

Спосіб має істотні недоліки. Просочена обмотка не є ремонтпридатною, тому що заміна будь-якої котушки вимагає усунення всієї обмотки з причини

пошкодження ізоляції. При цьому способі неможливе механізоване укладання обмотки, оскільки сторони котушок, не розміщені в пазах, заважають укладанню інших котушок. Спосіб має порівняно високу трудомісткість.

Широко відоме в ремонтній практиці укладання двошарової обмотки "без підйому кроку". Порядок укладання такої обмотки: перші котушки, число яких дорівнює кроку обмотки, укладають обома сторонами на дно пазів; наступні котушки укладають однією стороною на дно паза, а іншою – у верхній частині пазів; останні котушки, число яких також дорівнює кроку, укладають обома сторонами у верхній частині пазів. Порядок з'єднання котушок в котушкові групи (по $q = z / (6 \cdot q)$ штук в кожній) і паралельні гілки точно не визначені: можна робити відлік і з'єднання, починаючи з будь-якої котушки. Зазвичай відлік починають з першої котушки в напрямку укладання. Такий порядок виникає автоматично, якщо намотування котушок роблять на одному шаблоні цілими групами.

Спосіб має ряд недоліків. Він не забезпечує рівність опорів фаз і паралельних гілок, оскільки число котушок, що знаходяться у верхніх і нижніх частинах пазів, є різним для різних паралельних гілок і фаз. Це створює вирівняльні струми і погіршує, зрештою, пускові, віброакустичні і енергетичні показники, знижує безвідмовність. Крім того, в лобових частинах обмотки утворюється розрідження і згущування проводів, що призводить до нерівномірності нагріву по колу статора і теж знижує безвідмовність машини. З цих причин зазначений спосіб застосовують тільки при ремонтах, вважаючи що потужність або безвідмовність відремонтованої машини, зменшується в порівнянні з новою.

2.3 Одношарові обмотки

Для побудови схеми одношарової обмотки будують шестизонну зірку пазових ЕРС і розподіляють пази по фазах так само, як і при побудові двошарової обмотки. Кожній стороні котушки на зірці пазових ЕРС повинен відповідати свій вектор, тоді як при двошаровій обмотці зазвичай на зірці позначають лише

вектори, що зображають ЕРС верхніх сторін котушок.

Фаза одношарової обмотки складена з послідовно сполучених котушок, активні сторони яких розташовані в протилежних зонах. Від форми лобових частин котушок залежить тип одношарової обмотки. Переважає така обмотка, при якій довжина лобових частин найменша, укладання (а у разі потреби і заміна) котушок зручна, а активні і індуктивні опори фаз однакові.

Концентрична обмотка складена з котушок, розташованих одна усередині іншої. Число котушкових груп в такій обмотці дорівнює $2pt$. На рис. 2.6 а) показана розгорнена схема концентричної обмотки, лобові частини якої розташовані в двох площинах. Таку обмотку називають двохплощинною концентричною.

У концентричній обмотці «перевальцем» (рис. 2.6 б) котушкові групи розділені на дві підгрупи. Всі котушки мають крок $y < \tau$. Лобові частини котушок кожної фази розташовують в окремій площині, тому таку обмотку називають трьохплощинною. Її, зазвичай, виконують при q більше двох, що дозволяє зменшити виліт лобових частин внаслідок раціональнішого їх розташування. Розташування лобових частин обмоток фаз в різних площинах вносить деяку несиметрію в обмотку.

Шаблонні обмотки виходять симетричними, оскільки котушки мають однакову ширину і форму. Їх поділяють на прості шаблонні (рис. 2.6 в), шаблонні «перевальцем» і ланцюгові. Котушки шаблонних обмоток зазвичай мають форму трапеції для зручнішого розміщення лобових частин.

У ланцюгових обмотках "розвал" проводять не по напівгрупах, а по котушках, внаслідок чого короткі і довгі сторони котушок чергуються. Цей тип обмотки дозволяє одержати компактніше укладання лобових частин. Ланцюгові обмотки виконують з діаметральним або укороченим кроком. У ланцюгових обмотках з укороченим кроком при q , рівному непарному числу, виходять "несуцільні" фазні зони, в таких обмотках крива поля несиметрична і тому їх прагнуть не застосовувати.

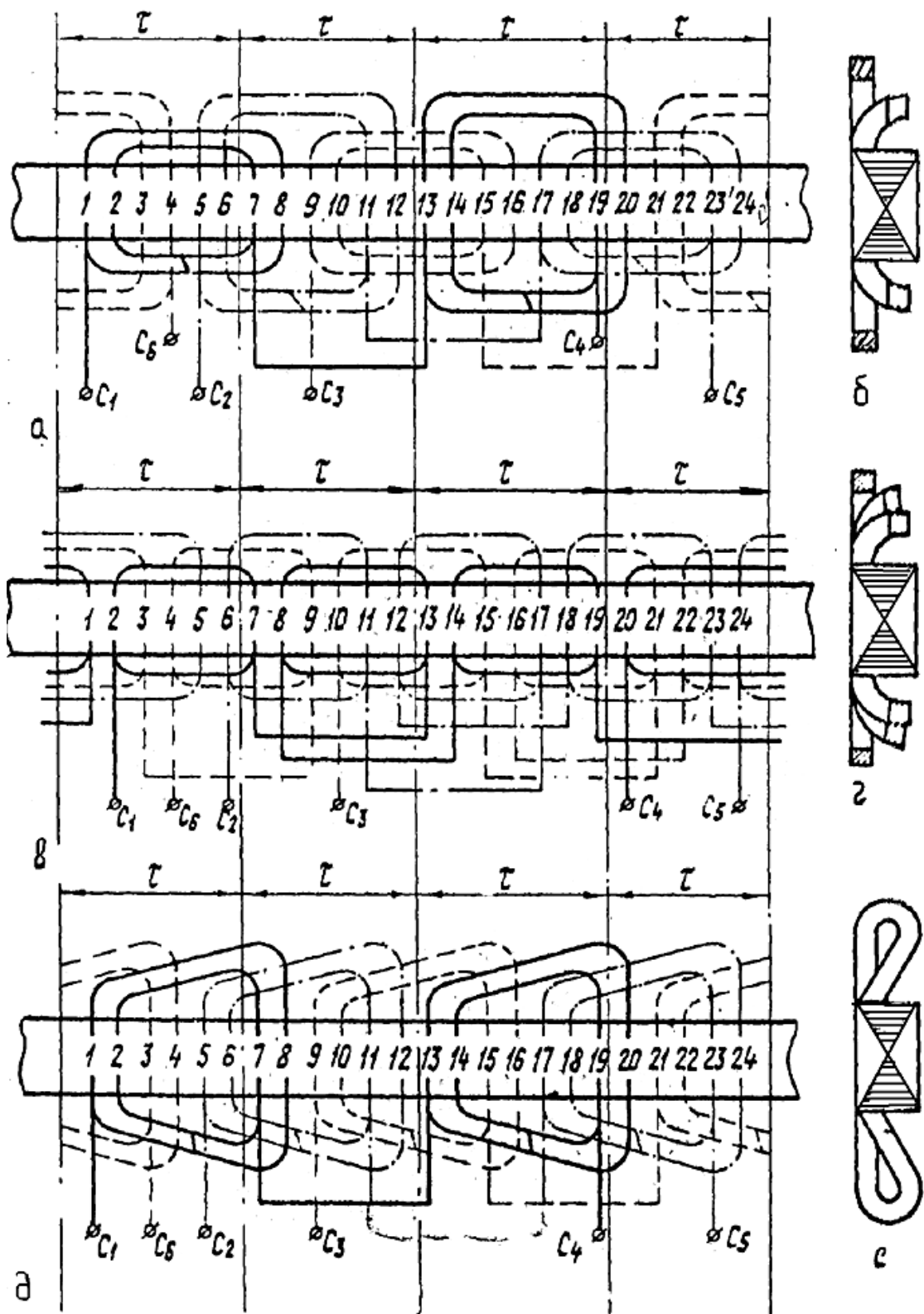


Рис 2.6. Розгорнуті схеми і лобові частини одношарових обмоток:
 а) двухплощинної концентричної; б) трьохплощинної концентричної;
 в) простої шаблонної

Крок в ланцюгових обмотках завжди рівний непарному числу. Ця умова витікає з чергування котушкових сторін. Якщо довгі сторони котушок займають непарні номери пазів, то короткі, які лежать поряд – парні. Оскільки в кожній котушці є одна довга і одна коротка сторона, то крок рівний різниці між парними і непарними номерами, тобто непарному числу.

Серед одношарових шаблонних обмоток вирізняють обмотку з концентричними котушками, в якій котушкові групи або напівгрупи складають з різних за шириною котушок, розташованих одна в іншій. При такому виконанні обмотки число перехрещень лобових частин котушок є зменшеним. Шаблонні обмотки з концентричними котушками на відміну від концентричних обмоток мають іншу форму котушок і однакові котушкові групи.

2.4 Обмотки з дробовим числом пазів на полюс і фазу

При створенні серій асинхронних двигунів, коли використовуються вирубки листів статора або ротора з однаковим числом пазів для машин з різною кількістю полюсів, величина q може бути дробовою.

Дробове число пазів на полюс і фазу може бути представлено у вигляді змішаного (цілого з правильним дробом) числа:

$$q = b + \frac{c}{d} \quad (2.2)$$

Котушкова група не може складатися з дробового числа котушок. Тому обмотку виконують з великих і малих котушкових груп. Число котушок в малій групі завжди дорівнює цілій частини числа q . У великій котушкській групі число котушок дорівнює $(b+1)$. Групи котушок з числами пазів, що відрізняються на одиницю, для кожної фази повинні бути розподілені симетрично по колу машини. Котушки розбиваються на групи, що утворюють зони обмотки, причому число зон дорівнює або кратне d . З них $(d - c)$ груп мають $(b+1)$ котушок, а c груп мають по $(b+1)$ котушок.

У трифазній обмотці для можливості рівномірного розподілу котушок знаменник d повинен відрізнятися від трьох або числа, кратного трьом. Крім

того, для можливості виконання двошарової трифазної обмотки необхідне дотримання умов

$$\frac{z}{2 \cdot m} \text{ і } \frac{2 \cdot p}{d} - \text{цілі числа.} \quad (2.3)$$

Для обмотки з дробовим q може бути побудована зірка пазових ЕРС, що має z/t векторів, де t – найбільший загальний дільник чисел пазів z і пар полюсів p . Кожен вектор зірки є t суміщених векторів пазових ЕРС, що індуктуються в пазах, віддалених один від одного на відстані, яка дорівнює z/t .

Число паралельних гілок обмотки з дробовим q може бути рівним t . Звідси витікає, що в симетричній обмотці повинна виконуватись умова

$$\frac{z}{2 \cdot m} = \text{ціле число} \quad (2.4)$$

При парному числі пазів z і найбільшому дільнику $t > 1$ t може бути $2t$ паралельних гілок.

Для побудови схеми обмотки необхідно визначити порядок чергування великих і малих котушкових груп. З цією метою складають таблицю із c рядків і d стовпців. У клітки таблиці записують числа котушок в котушкових групах. Спочатку заповнюють зверху вниз перший (лівий) стовпець таблиці, потім другий також зверху вниз і т.д. В першу чергу записують числа котушок, що містяться у великих котушкових групах, заповнюючи ними c кліток, потім $(d - c)$ клітинок заповнюють числами котушок в малих котушкових групах. Далі знову вписують c чисел котушок великих груп і $(d - c)$ малих і т.д., до заповнення всіх клітинок таблиці. Потрібне чергування читають по рядках заповненої таблиці.

Наприклад, для $q = 4 \cdot \frac{3}{5}$ отримаємо табл. 2.1, з якої видно, що всі три рядки показують одне і те ж чергування, змінюється тільки початок відліку першої котушкової групи.

Для побудови обмотки можна узяти послідовність будь-якого рядка, наприклад, першого /5 4 5 4 5/5 4 5 4 5/, або другого /5 4 5 5 4/5 4 5 5 4/.

Порядок чергування великих і малих котушкових груп

5	4	5	4	5
5	4	5	5	4
5	5	4	5	4

Приклад побудови схеми двошарової петльової обмотки при

$$2p = 4; z = 18; m = 3.$$

$$q = \frac{z}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{18}{4 \cdot 3} = 1,5$$

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{z} = \frac{2 \cdot 360^\circ}{18} = 40^\circ$$

$$\tau = \frac{z}{2 \cdot p} = \frac{18}{4} = 4,5$$

Найбільшим загальним дільником числа пазів $z = 18$ і числа пар полюсів $p = 2$ є $t = 2$. Перевіримо можливість виконання двошарової трифазної обмотки:

$$\frac{z}{2 \cdot m} = \frac{18}{6} = 3 - \text{ціле число і } \frac{2 \cdot p}{d} = \frac{4}{2} = 2 - \text{ціле число.}$$

Будуємо зірку пазових ЕРС (рис. 2.7 а). Кожен вектор зірки є два суміщених вектори пазових ЕРС, які індукуються у верхніх сторонах котушок, розташованих один від одного на відстані $\frac{z}{t} = \frac{18}{2} = 9$ пазів.

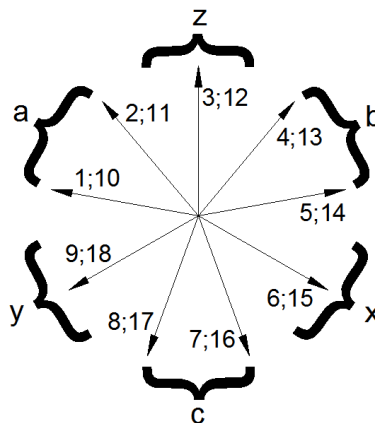


Рис. 2.7. Зірка пазових ЕРС двошарової петльової обмотки з $2p = 4; z = 18$

Початок фази А розташовано в пазу 1, початок фази В – в пазу $1 + 2 \cdot q = 1 + 2 \cdot \frac{3}{2} = 4$, початок фази С – в пазу $1 + 4 \cdot q = 1 + 4 \cdot \frac{1}{2} = 7$.

Зірку пазових ЕРС ділимо на шість зон. Зони А, В, С, що становлять початки фаз обмоток, містять два пази; зони Х, У і Z кінці фаз обмоток, що становлять один паз. Таким чином, кожна фаза обмотки містить дві симетричні зони по два пази і дві симетричні зони по одному пазу, внаслідок чого обмотка є симетричною. Приймаємо скорочений крок $y = 4$. Виконуємо розгорнуту схему обмотки (рис. 2.2).

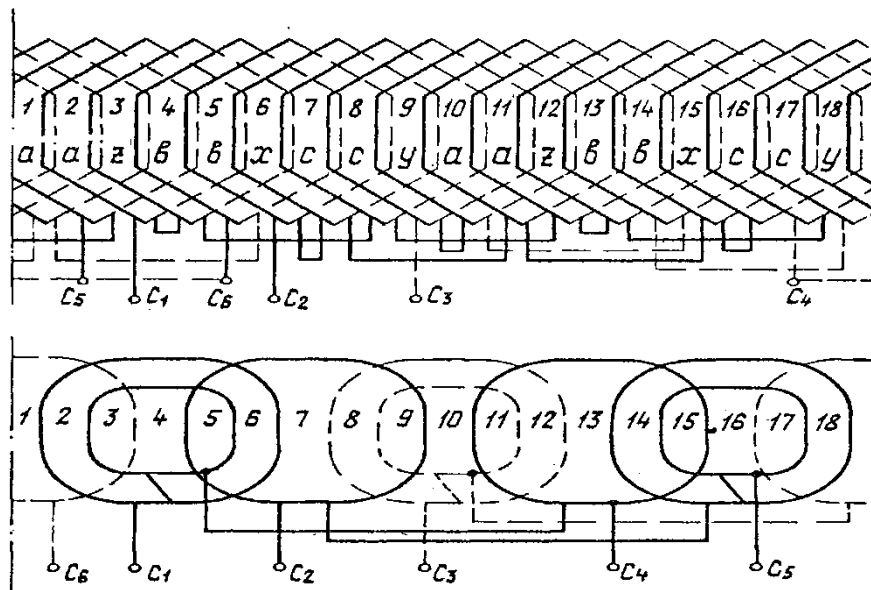


Рис. 2.2. Розгорнута схема двохшарової петльової обмотки з $2p = 4$; $z = 18$

2.5 Двофазні обмотки асинхронних мікродвигунів

Асинхронні мікродвигуни, призначені для включення в однофазну мережу, мають дві обмотки на статорі (дві фази): головну (робочу) А і допоміжну (пускову) В (рис. 2.3 а).

Фаза В вмикається тільки на період пуску. Для отримання зсуву струмів у фазах в часі вона має або підвищений опір, або пусковий конденсатор. Підвищений опір забезпечується малим перетином проводу обмотки або виконанням частини обмотки біфілярними котушками. Такі двигуни називають електродвигунами з пусковою обмоткою.

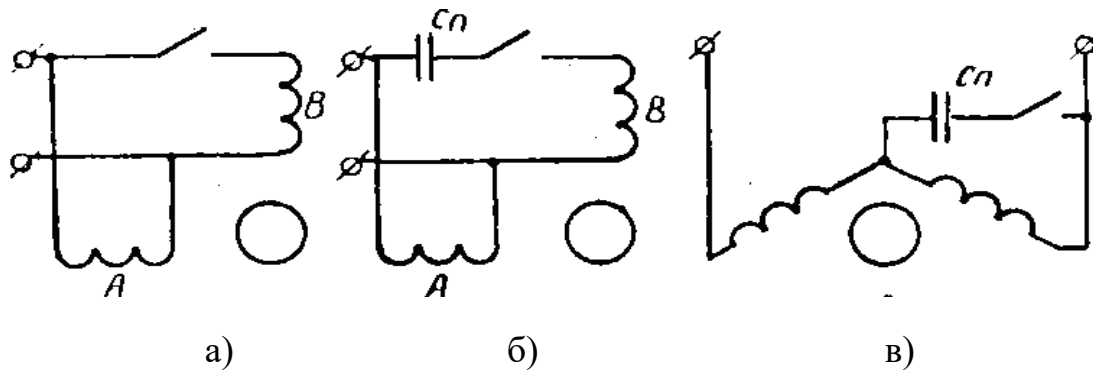


Рис. 2.3. Пускова обмотка асинхронних мікродвигунів: а) з підвищеним активним опором; б) з конденсатором; в) спеціальна

Виготовляють також асинхронні мікродвигуни без пускової фази (рис. 2.3 в), у яких обмотка розподілена приблизно на $2/3$ кола статора. На час пуску конденсатор шунтує частину обмотки.

Кращі техніко-економічні показники мають асинхронні трифазні мікродвигуни для роботи від однофазної мережі, в яку постійно включені обидві фази. Для забезпечення зсуву струмів послідовно з фазою В або паралельно фазі А вмикають робочий конденсатор C_p (рис. 2.4).

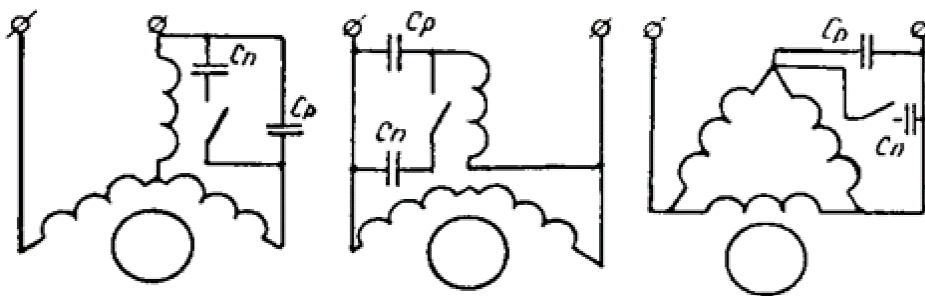


Рис. 2.4. Однофазні конденсаторні мікродвигуни

Якщо потрібно отримати високий пусковий момент, на час пуску додатково підключається до робочого пусковий конденсатор C_n . Такі мікродвигуни за принципом дії відносять до двофазних, але оскільки їх включають в однофазну мережу, а до допоміжної фази зазвичай постійно включений конденсатор, то вони і називаються однофазними конденсаторними мікродвигунами на відміну від

однофазних двигунів з пусковими обмотками.

У конденсаторних мікродвигунах використовують також трифазні обмотки на статорі. Вони можуть працювати і від трифазної мережі при сполученні обмоток зіркою або трикутником без конденсаторів. Техніко-економічні показники таких двигунів вищі, ніж у аналогічних конденсаторних з двома фазами.

У двофазних обмотках асинхронних мікродвигунів з пусковими обмотками фаза А займає $2/3$, а фаза В – $1/3$ загального числа пазів. У конденсаторних мікродвигунах кожна з фаз займає половину пазів. У асинхронних мікродвигунах найбільше застосування знайшли одношарові обмотки, завдяки простоті їх виконання і більшому коефіцієнту заповнення паза міддю. Типові схеми двофазних одношарових обмоток асинхронних мікродвигунів з пусковими елементами зображені на рис. 2.5.

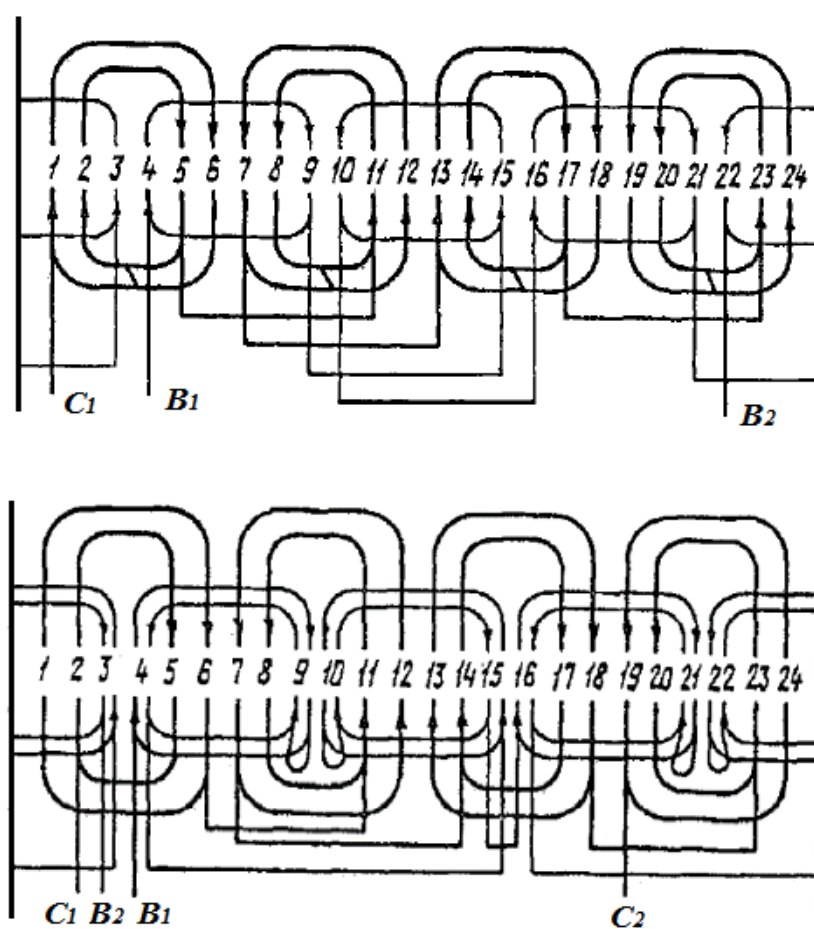


Рис. 2.5. Типова схема однофазної одношарової обмотки асинхронного мікродвигуна

Біфілярну котушку можна одержати, якщо укласти в одні і ті ж пази дві котушки, одна з яких повертається на 180° навколо паралельної пазам вісі. Права і ліва сторони поверненої секції при цьому міняються місцями (рис. 2.12).

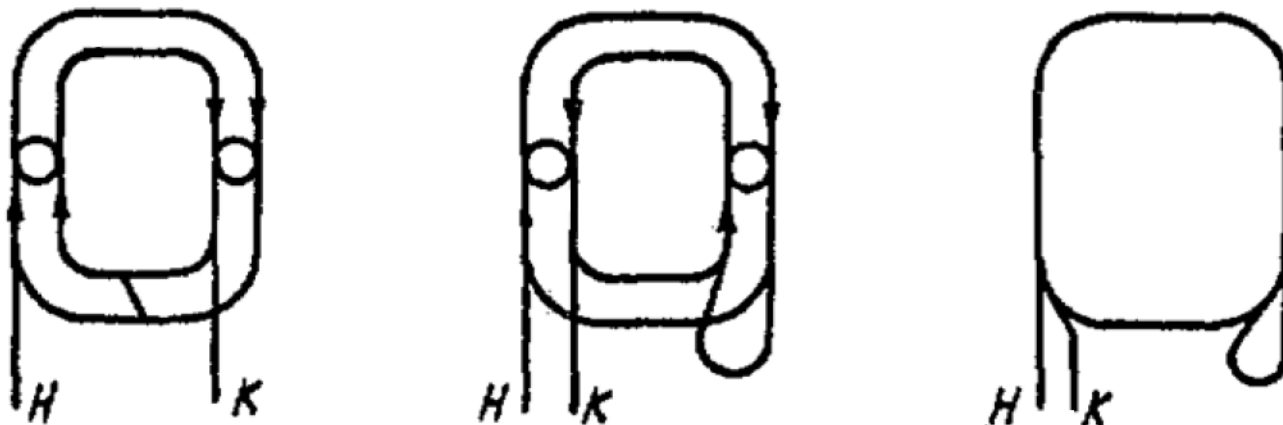


Рис. 2.12. Біфілярна котушка

У пазах, де розташована біфілярна котушка, струм проходить по одній секції в одному напрямку, по іншій – в протилежному. Полярність полюсів визначається напрямом струму в котушці з великим числом витків, тому котушку з великим числом витків умовно називають основною, а з меншим – біфілярною. Зазвичай біфілярні котушки на схемах показують у вигляді цілої котушки з петлею, в якій змінюється напрям струму.

Типові схеми обмоток однофазних конденсаторних мікродвигунів показані на рис. 2.13.

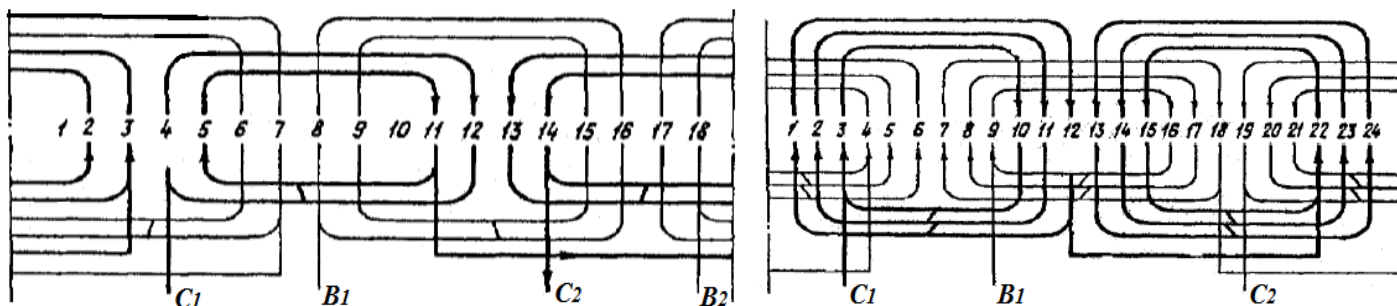


Рис. 2.13. Типові схеми обмоток однофазних конденсаторних мікродвигунів

2.6 Модернізація асинхронних двигунів під час ремонту

Під час ремонту серійних АД можливим є застосування іншого типу обмотки, що дозволяє змінити і підвищити техніко-економічні показники відремонтованого АД. Наприклад, укорочення лобових частин при виконанні одношарових обмоток "перевальцем" або двошарової обмотки замість концентричної одношарової обмотки дає до 15% економії міді обмотувального проводу. При цьому зменшується активний опір і опір розсіювання, що сприяє підвищенню ККД і пускового моменту АД при зменшенні температури нагріву. Ресурс роботи АД зростає.

Одним зі шляхів зниження матеріаломісткості і підвищення потужності АД є збільшення технологічного коефіцієнту заповнення обмоткою напівзакритих пазів до приблизно 0,72 і удосконалення якості процесу просочення. Зростання коефіцієнта заповнення паза на 1% дозволяє збільшити потужність АД на 0,75%, а при підвищенні якості просочування, зберегти той же нагрів або понизити його, оскільки зростає коефіцієнт теплопровідності обмотки в пазу.

3. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБМОТОК

3.1 Вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками за допомогою мегаомметра

Передремонтні випробування АД потрібні для визначення їх несправності. Спочатку проводять зовнішній огляд АД і визначають справність всіх видимих деталей і складальних одиниць. Провертаючи рукою вал, можна виявити несправності підшипників або торкання ротора об статор. Далі мегаомметром перевіряють опір ізоляції обмоток відносно корпусу і між фазами, що дозволяє виявити пробій ізоляції на корпус і між фазами, або сильне зволоження ізоляції, що не дозволяє експлуатацію двигуна. Для проведення цього контролю заздалегідь відмикають всі кінці двигуна від вивідної колодки. В трифазних електричних машинах з шістьма виводами обмоток стан корпусної і міжфазної ізоляції кожної фази обмотки визначають при заземлених двох інших фазах. При цьому опір ізоляції визначається двома складовими: опором ізоляції фази на заземлений корпус і опором ізоляції між вимірюваною обмоткою і обмотками заземлених фаз.

Допустимі значення опорів ізоляції обмоток АД потужністю до 40кВт повинні бути при робочій температурі

$$R_{из} \geq \frac{U_{1ном}}{1000 + 0,01 \cdot S_{ном}}, \text{МОм} \quad (3.1)$$

де: $U_{1ном}$ – номінальна напруга, B ;

$S_{ном}$ – номінальна потужність, кВА .

Слід зазначити, що виміряне $R_{из}$ при робочій температурі не повинно бути менше $0,5\text{МОм}$. Вимірювання опору ізоляції слід проводити мегомметром класу напруги $500B$ для двигунів з $U_{ном} \leq 500B$ і класу $1000B$ для двигунів з $U_{ном} \geq 500B$.

У випадку відмінності опорів ізоляції фаз в 1,5-2 рази має місце дефект ізоляції у фазі з найменшим опором, або сильне зволоження ізоляції. Щоб

визначити, яка саме ізоляція має дефект (корпусна або міжфазна), спочатку вимірюють опір ізоляції фази з дефектом відносно корпусу при незаземлених обмотках інших фаз, а потім – опір при прикладенні напруги між фазою з дефектною ізоляцією і сполученими між собою, але заземленими обмотками інших фаз.

Опори ізоляції фаз більше $0,5\text{МОм}$ при незначній різниці між ними свідчать про задовільний стан ізоляції.

Розрахункове значення робочої температури двигунів з класом нагрівостійкості ізоляції A , E , B дорівнює 75°C і F , H – 115°C . Відомо, що опір ізоляції зменшується удвічі при підвищенні температури на кожні 20°C . Тому, якщо вимірювання опору проводиться при температурі θ , нижче робочої $\theta_{роб}$, то мінімальний опір ізоляції при температурі θ .

$$R_{из\theta} \geq R_{из} \cdot 2^h \quad (3.2)$$

де: $R_{из}$ – опір ізоляції, розрахований по (3.1), але не менше $0,5\text{МОм}$;

$$h = \frac{\theta_{раб} - \theta}{20} - \text{показник ступеня, округлений до найближчого більшого цілого}$$

числа.

Приклад. Визначити придатність до подальшої експлуатації двигуна, якщо опір ізоляції обмоток статора, виміряний при $\theta = 24^\circ\text{C}$ складає 15МОм , повна споживана потужність двигуна $S_{ном} = 200\text{кВА}$, робоча напруга $U_n = 600\text{В}$.

Опір ізоляції при робочій температурі по (3.1)

$$R_{из} = \frac{660}{(1000 + 0,01 \cdot 200)} = 0,66\text{МОм}$$

При класі нагрівостійкості ізоляції обмотки F робоча температура $\theta_{раб} = 115^\circ\text{C}$.

Значення коефіцієнта h :

$$h = \frac{(115 - 24)}{20} = 4,55 \approx 5$$

Мінімальний опір ізоляції при температурі $\theta = 24^\circ\text{C}$ по (3.2)

$$R_{i3\theta} = 0,66 \cdot 2^5 = 21,12 \text{МОм}$$

Оскільки виміряне значення опору ізоляції (15МОм) менше мінімального допустимого при температурі $\theta = 24^\circ\text{C}$ ($R_{i3\theta} = 21,12 \text{МОм}$), то подальша експлуатація двигуна без ремонту або сушіння обмоток неможлива.

3.2 Пошук несправностей ізоляції обмоток за допомогою апарату ЕЛ-1

Апарат ЕЛ-1 призначений: для виявлення виткових або корпусних замикань і обривів в обмотках електричних машин і апаратів; для знаходження паза з короткозамкненими витками в обмотках статорів, роторів і якорів електричних машин; для перевірки правильності з'єднання обмоток електричних машин по схемі, а також маркування вивідних кінців фазних обмоток електричних машин.

Схема апарату складається з трьох основних вузлів: електронно-променевої трубки і високовольтного контуру живлення трубки; контуру розгортки променю на екрані по горизонтальній вісі і синхронізації; генератора імпульсів.

Принцип дії апарату заснований на порівнянні повного опору двох фаз обмотки, сполучених між собою паралельно і підключених до апарату. При подачі в обмотку двох фаз напруги від генератора на екрані електронно-променевої трубки з'являється крива перехідного процесу, що світиться. Імпульси напруги на підключені фази обмотки подаються по черзі, і не встигає на екрані зникнути одна крива, як з'являється інша (екран володіє властивістю післясвічення). Якщо обмотки не мають ніяких дефектів і їх електричні параметри однакові, то криві обох фаз будуть однакові за формою і по амплітуді і на екрані трубки спостерігатиметься одна крива. Якщо ж в одній з фаз є коротке замикання витків, неправильне з'єднання по схемі, або різне число витків, пробій ізоляції на корпус, обрив або інші дефекти, криві не накладуться одна на другу, на екрані спостерігаються дві криві. При достатній навичці в роботі з апаратом за формою

кривих можна судити про характер дефекту обмоток.

На передній панелі апарату розташовані: ручки управління; затискачі для приєднання випробувальних обмоток або пристосування для знаходження паза з короткозамкненими витками; екран електронного індикатора. На задній стінці розташовані колодка для приєднання шнура і підключення апарату до мережі і запобіжник.

У нижній частині передньої панелі розташовані п'ять затискачів. Крайній правий затискач служить для приєднання заземлюючого проводу; затискачі «Вих.імп.» – для приєднання послідовно сполучених випробовуваних обмоток або збуджуючого електромагніту пристосування; затискачі «Сигн.явл.» – для підключення рухомого електромагніту пристосування або з'єднання середньої точки випробувальних обмоток.

Вимикач «Мережа» призначений для вмикання апарату в мережу і напруги ламп. При вмиканні апарату запалюється сигнальна лампочка. Вимикач «Анод» служить для вмикання анодних напруг трубки і ламп; вимикач «Масштаб разв.» – для зміни швидкості розгортки променю.

Ручка «Ампл.імп.» призначена для установки амплітуди напруги імпульсу, що подається на випробувальні обмотки, ручка «Фокус» – для фокусування променю на екрані трубки, середня ручка – для усунення можливої природної асиметрії випробувальних обмоток і для перемикання на роботу з пристосуванням.

Перед вмиканням апарату в мережу треба обов'язково приєднати заземлюючий провід до заземлюючого затискача, щоб забезпечити себе від поразки струмом, а ручку потенціометра «Ампл.імп.» поставити в крайнє ліве положення.

Після підключення апарату до мережі включити вимикач «Мережа» і почекати не менше однієї хвилини, поки прогріються лампи, після чого можна включати анодні напруги (вимикач «Анод»).

Поворотом ручки «Фокус» вправо або вліво сфокусувати промінь так, щоб на екрані перехідний процес висвітлювався чітко.

Якщо три фази обмоток сполучені в зірку, то затискач «Вих.імп.» приєднується до виводів двох фаз, а лівий затискач «Сигн.явл.» – до виводу третьої фази або нульової точки (рис. 3.1). При перевірці правильності маркування виводів фазних обмоток електричних машин лівий затискач «Сигн.явл.» слід приєднати до виводу третьої фази.

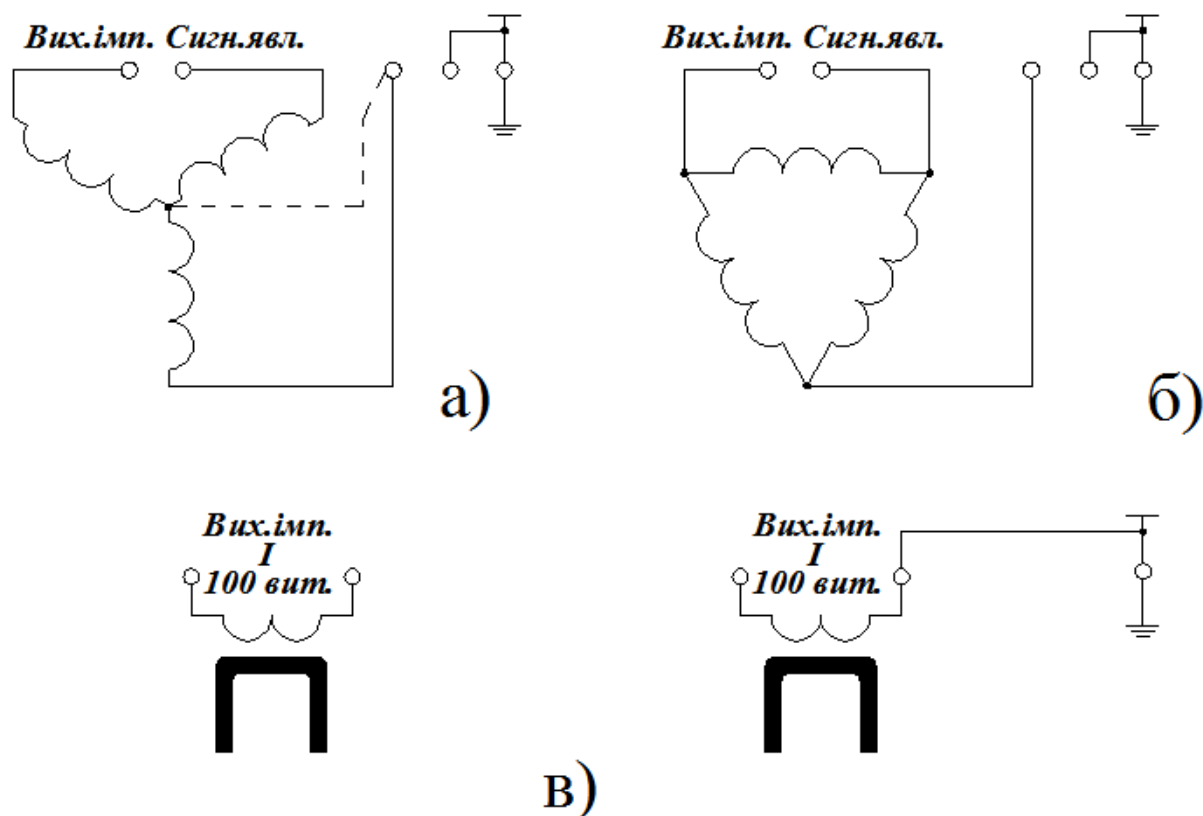


Рис. 3. 1. Схеми випробувань обмотки статора апаратом ЕЛ-1:

- а) підключення обмотки, сполученої в «зірку»; б) підключення обмотки, сполученої в «трикутник»; в) визначення паза з короткозамкненими витками

Якщо фази обмоток сполучені в трикутник, то лівий затискач «Сигн.явл.» потрібно приєднати до третього виводу (рис. 3.1б). Бажано, щоб довжина вихідних провідників від апарату до випробувальних обмоток була не більше 4м, перетин і марка цих проводів повинні бути однаковими.

Після приєднання обмоток поворотом ручки «Ампл.імп.» встановити амплітуду імпульсу такої величини, щоб на екрані була крива, по масштабу

зручна для спостереження.

Оскільки однакові випробувальні фази обмотки практично завжди дещо відрізняються одна від іншої і цю природну асиметрію апарат може уловлювати, то на екрані, на вершині кривої напруги може з'явитися невелике роздвоєння кривої з коливаннями високої частоти. Цю асиметрію потрібно компенсувати поворотом ручки «Симметр.».

Випробувавши дві фази обмотки (секції) і переконавшись, що виткових замикань або інших дефектів в них немає, потрібно одну з них поміняти місцями з третьою фазою обмотки. Якщо після цього на екрані з'являться дві криві, то це означає, що замість справної обмотки в випробування ввімкнена пошкоджена; якщо ж на екрані буде одна крива, то і третя фаза не має дефектів.

Якщо при випробуванні двох обмоток виявиться виткове замикання або який-небудь інший дефект і на екрані з'являться дві криві, то для виявлення обмотки з дефектом потрібно одну з обмоток поміняти місцями з третьою обмоткою. Якщо після такої заміни на екрані буде одна крива, а не дві, то дефектною обмоткою є заміненна.

Для знаходження в машині паза з короткозамкненими витками потрібно користуватися пристосуванням з двома П-подібними електромагнітами. Для цього котушку нерухомого електромагніту (100 витків) приєднують до затискачів «Вих.ім.», а котушку рухомого електромагніту (2000 витків) – до затискачів «Сигн.явл.» (рис. 3.1 в). Середня ручка повинна бути при цьому поставлена в крайнє ліве положення «Работа з пристосув.».

Переставляючи обидва електромагніти пристосування з пазу на паз по розточці статора або поверхні ротора з фазною обмоткою, на екрані електронно-променевої трубки ми будемо споглядати наступне: за відсутності в пазу короткозамкнених витків на екрані трубки з'явиться пряма або крива лінія з малими амплітудами (внаслідок слабкого індуктивного зв'язку); за наявності в пазу короткозамкнених витків на екрані трубки з'являться дві криві з великими амплітудами, вивернутими по відношенню одна до іншої. По цим кривим і знаходять паз з короткозамкненими витками.

Не можна допускати закорочування між собою проводів, що йдуть від затискачів «Вих.імп.» до випробувальних обмоток, оскільки це може вивести апарат з ладу. Не можна також торкатися до оголених кінців цих проводів.

При невеликих перервах в роботі рекомендується вимикати анодну напругу.

Якщо результати вимірювань на лабораторному асинхронному двигуні показали роздвоєння кривих перехідних процесів в фазах обмоток двигуна (рис. 3.2), а опір ізоляції всіх фаз відносно корпусу та між фазами однаковий і задовольняє вимогам, однозначно можна стверджувати, що в обмотці є виткові замикання і вона підлягає видаленню.

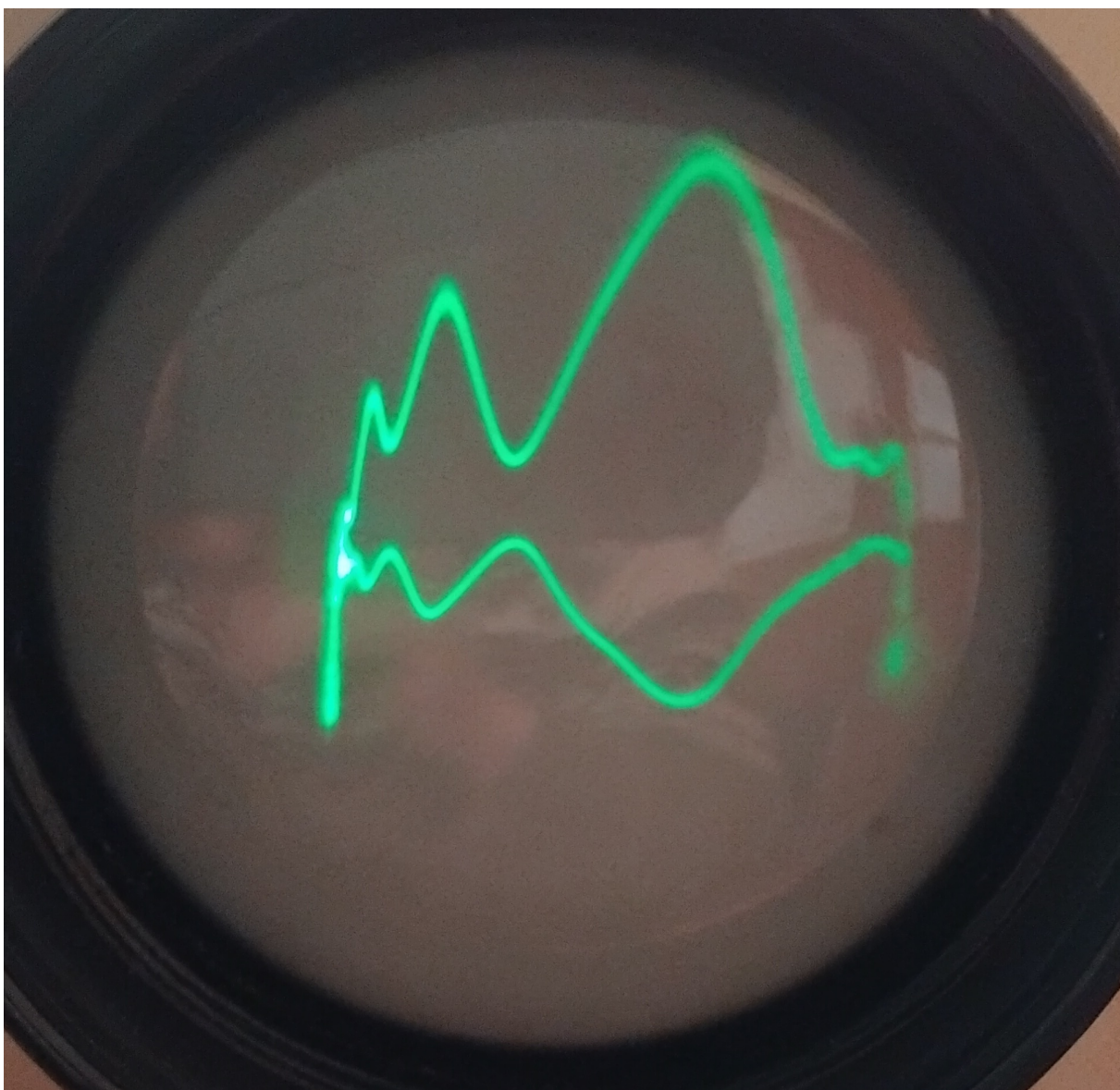


Рис. 3.2. Осцилограма з екрану апарата ЕЛ-1

4. РОЗРАХУНКИ ОБМОТОК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ РЕМОНТІ

4.1 Порядок перевірного розрахунку

На підставі проведених вимірювань визначаються розрахунковим шляхом наступні величини:

- розрахункова довжина активної сталі статора (ротора)

$$l_{cn1(2)} = l_{1(2)} \cdot k_c \quad (4.1)$$

де k_c - коефіцієнт заповнення пакету; при товщині листів сталі 0,5мм 0,95 (лакування листів) і 0,97 (оксидування листів);

- зовнішній діаметр статора і ротора (якщо їх неможливо виміряти безпосередньо)

$$D_a = D_1 + 2 \cdot h_a + 2 \cdot h_{z1} \quad D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta$$

зубцева поділка статора і ротора

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} \quad t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{z_2} \quad (4.2)$$

Для двигуна, у якого відсутні стара обмотка і табличка з номінальними даними, можливе найменше число пар полюсів, допустиме для активної сталі цього електродвигуна

$$2 \cdot p = 0,5 \cdot \frac{D_1}{h_a} \quad (4.3)$$

Отриманий результат слід округляти до найближчого цілого парного числа, враховуючи, що для меншого числа полюсів даний електродвигун непридатний.

Розрахунок параметрів починається з визначення числа ефективних витків фази обмотки статора

$$W_1 = \frac{k_E \cdot U_1}{4,44 \cdot f \cdot k_{ob1} \cdot \Phi} \quad (4.4)$$

де: U_1 - фазова напруга, В;

f - частота, Гц;

Φ - магнітний потік, В;

$k_{o\delta 1}$ - обмотувальний коефіцієнт (табл. 4., табл. 4.);

$$k_E = \frac{E_1}{U_1} \text{ (табл. 4.3).}$$

Таблиця 4.1

Обмотувальні коефіцієнти трифазних одношарових обмоток

Q	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	8
$k_{o\delta 1}$	1,0	0,96	0,966	0,957	0,96	0,956	0,958	0,955	0,957	0,957	0,956

Таблиця 4.2

Обмотувальні коефіцієнти трифазних двошарових обмоток

Q	$k_{o\delta 1}$ при кроці обмотки по пазах						
	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9
1	0,866	1,0	0,866	-	-	-	-
1,5	-	0,831	0,945	0,945	-	-	-
2	-	-	0,836	0,933	0,966	-	-
2,25	-	-	-	0,877	0,941	0,954	0,915
2,5	-	-	-	0,827	0,907	0,95	0,95
3	-	-	-	-	0,831	0,902	0,945
3,5	-	-	-	-	-	0,831	0,884
4	-	-	-	-	-	-	0,831

Магнітний потік

$$\Phi = \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot \tau \cdot l_1 = 1,1 \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \frac{B}{p} \quad (4.5)$$

де p – число пар полюсів; τ - полюсне ділення, м ;

B_δ – індукція в повітряному проміжку, Тл ;

α_δ – коефіцієнт полюсного перекриття;

Звідси:

$$W_1 = \frac{k_E \cdot P \cdot U_1}{(4,9 \cdot f \cdot k_{o\delta 1} \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot B_\delta)} \quad (4.6)$$

Таблиця 4.3

Значення коефіцієнта k_E

$2p$	k_E при діаметрі D_a , см							
	6	8	10	15	20	30	40	50
2	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99
4	0,94	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98
6	0,91	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98
8	-	-	-	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97

Оскільки кожен виток розташовується в двох пазах на відстані кроку обмотки y , то, враховуючи, що загальне число ефективних витків в трифазному двигуні дорівнює $3 \cdot a_1 \cdot W_1$, а число пар пазів дорівнює $z_1/2$, отримаємо

$$W_1 = \frac{z_1 \cdot U_{n1}}{(6 \cdot a_1)} \quad (4.7)$$

Підставивши значення W_1 з (4.7) в (4.6), одержимо число ефективних провідників в пазу:

$$U_{n1} = \frac{1,23 \cdot k_E \cdot P \cdot U_1 \cdot a_1}{f \cdot k_{o\delta 1} \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot B_\delta \cdot z_1} \quad (4.8)$$

Єдиний невідомий показник в цій формулі – індукція в повітряному проміжку B_δ . Основним критерієм правильного розрахунку обмотки слід вважати значення струму неробочого ходу, який може бути виміряний при включенні двигуна в мережу після перемотування. Значення допустимого струму неробочого

ходу береться за каталожними даними відповідних двигунів. Якщо індукцію в повітряному проміжку асинхронних двигунів задати вище за допустиму, то двигун нагріватиметься вже при неробочому ході, а його коефіцієнт потужності буде низьким. Зменшення індукції у повітряному зазорі нижче за норму призводить до зменшення перевантажувальної здатності двигуна і зменшенню стійкості його роботи. Розрахункові значення індукції в повітряному проміжку для низьковольтних асинхронних двигунів приведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Індукція	Значення індукції, для двигуна потужністю		
	до 1	1-10	10-100
B_{δ}	0,3 - 0,6	0,6 - 0,7	0,7 - 0,9
B_a	1,1 - 1,5	1,2 - 1,6	1,3 - 1,6
B_z	1,3 - 1,5	1,4 - 1,6	1,4 - 1,8

4.2 Електромагнітний розрахунок

При невідомій індукції в повітряному проміжку задаються її значенням з таблиці 4., визначають число ефективних витків W_1 по формулах (4.6), (4.7) (4.8), розраховують значення індукції в зубцях і ярмах статора і ротора, магнітну напругу окремих ділянок магнітного кола, сумарну магнітну напругу магнітного кола машини (на пару полюсів) і значення струму I_{μ} , в абсолютних і відносних одиницях. Розрахунок магнітного кола повторюють 3-4 рази для ряду значень B_{δ} і будують залежність $i_{\mu} = f(B_{\delta})$. Приймавши як верхню межу каталожне значення струму I_{μ} , знаходять по побудованій залежності потрібну величину B_{δ} . Ці розрахунки легко формалізувати і можуть бути виконані на ЕОМ з використанням стандартних програм.

Електричні навантаження машини (густина струму j і лінійне навантаження A) визначають нагрів обмотки. Допустима густина струму не є сталою, а залежить від виконання машини, типу охолодження, частоти обертання,

номінальної напруги і лінійного навантаження. Чим більша номінальна напруга, тим товще повинна бути ізоляція (пазова і виткова) і тим гірше відведення теплоти, що виділяється в обмотці. При незмінному температурному індексі ізоляції густина струму із зростанням напруги в обмотці повинна бути зменшена.

З іншого боку, збільшення частоти обертання покращує вентиляцію машини і густина струму в швидкохідних машинах може бути більше, ніж в тихохідних. Допустима густина струму для АД приведена в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Рекомендована густина струму в обмотці статора АД

Лінійне навантаження	Закритих не вентилюваних	Закритих обдуваних	Захищених нормально вентилюваних
130-300	$(2 - 3) 20^6$	$(6,0 - 4,5) 10^6$	$(6,5 - 5,5) 10^6$
300-500	-	$(4,5 - 3,5) 10^6$	$(5,5 - 4,5) 10^6$

Нагрів обмотки визначають не тільки за питомими втратами в міді на одиницю маси, які залежать від густини струму, але і поверхнею охолодження. При рівних сумарних об'ємах струму в пазах двигун з великим числом пазів має гірші умови охолодження, чим двигун з меншим числом пазів. Крім того, при рівній густини струму в гірших умовах знаходиться двигун, що має пази більшого розміру (при рівному числі пазів). Тому для перевірки теплового стану обмотки треба знати і лінійне навантаження A_1 , яке чисельно дорівнює МРС обмотки статора на одиницю довжини кола статора:

$$A_1 = \frac{3 \cdot q_{\text{эф}} \cdot I_{1н} U_{н1}}{a_1 \cdot \tau} \quad (4.9)$$

де: $I_{1н}$ – номінальний фазний струм статора, A .

Рекомендовані значення лінійного завантаження в АД приведені в табл. 4.6, причому із зростанням D_a і τ лінійне навантаження зростає.

Таблиця 4.6

Лінійне навантаження	Закритих з вентиляцією	Закритих з обдувом	Захищених з нормальною вентиляцією
130-300	(2 - 3) 20 ⁶	(6,0 - 4,5) 10 ⁶	(6,5 - 5,5) 10 ⁶
300-500	-	(4,5 - 3,5) 10 ⁶	(5,5 - 4,5) 10 ⁶

Знаючи величини густини струму j_1 , і лінійного навантаження A_1 , по формулі (4.10) можна визначити перетин ефективного витка

$$q_{эф} = \frac{I_{1н}}{(a_1 \cdot j_1)} \quad (4.10)$$

Перетин ефективного витка, розрахований через розмір паза

$$q_{эф} = k_m \cdot \frac{S_{н.св}}{U_{н1}} \quad (4.11)$$

де: k_m – коефіцієнт заповнення паза міддю (табл. 4.7)

$S_{н.св}$ – площа паза в світлі, $мм^2$.

Таблиця 4.7

Коефіцієнт заповнення паза міддю k_m для виспних обмоток при ручному намотуванні

Обмотка	Паз	k_m при потужності АД до 15 кВт		
Одношарова	Трапецеїдальний	0,37	0,40	0,43
	Грушовидний	0,42	0,46	0,50
Двошарова	Трапецеїдальний	0,36	0,37	0,40
	Грушовидний	0,37	0,40	0,43

Значне відхилення перетинів ефективного витка, розрахованих по формулах (4.10) і (4.11), свідчить про невдалий вибір величин густини струму і лінійного навантаження, Це означає, слід задатися іншими значеннями вказаних величин,

орієнтуючись на значення перетину ефективного витка, визначене по формулі (4.10).

Подальша задача зводиться до визначення числа елементарних провідників в одному ефективному. Якщо число елементарних провідників в одному ефективному дорівнює одиниці, то діаметр обмотувального проводу без ізоляції

$$d_{уз} = 1.13 \cdot \sqrt{q_{эф}}, \text{ мм} \quad (4.12)$$

Далі уточнюється діаметр обмотувального проводу і відповідний йому діаметр ізолюваного проводу $d_{уз}$ (додаток 2). У разі відсутності в лабораторії проводу потрібного перетину або неможливості укладання обмотки із-за малої ширини шліцу паза слід розглянути можливість виконання обмотки $n_{эл}$ паралельними проводами при тому ж значенні k_m , орієнтуючись на наявний в лабораторії провід $d_{узл}$

$$n_{эл} = \frac{d_{уз}^2}{d_{узл}^2} \quad (4.13)$$

Отримане число слід округляти до найближчого меншого цілого числа, оскільки при збільшенні числа $n_{эл}$ до найближчого більшого відбудеться збільшення коефіцієнту заповнення паза, і обмотка не може бути реалізована. Якщо розрахункове і закруглене значення $n_{эл}$ розрізняються значно, слід вибрати інший обмотувальний провід.

Забезпечення потрібного перетину ефективного витка може бути досягнуте також зміною числа паралельних гілок обмотки:

$$a_l = a_1 \cdot \left(\frac{d_{уз}}{d_{узл}}\right)^2 \quad (4.14)$$

$$W_{1,l} = W_1 \cdot \frac{a_l}{a_1} \quad (4.15)$$

де: a_l – початково прийняте число паралельних гілок;

a_1 – число паралельних гілок, що приймається, виходячи з наявного в лабораторії

проводу;

W_1 – число витків у фазі для наявного проводу.

Якщо двигун, що поступив в ремонт, але має паспортної таблички або проходить перемотування із зміною частоти обертання, то його потужність можна визначити лише приблизно. Остаточне, значення потужності можна встановити після теплових випробувань.

Повна (поточна) потужність, kVA :

$$S = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot 10^{-3} \quad (4.16)$$

де: U_1 і I_1 – номінальні фазні напруга і струм.

Корисна потужність, kW :

$$P_2 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3} \quad (4.17)$$

де $\eta, \cos \varphi$ - ККД і коефіцієнт потужності відповідно.

Орієнтовно значення енергетичних показників АД приведені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Енергетичний ККД двигунів з короткозамкненим ротором

$2p$	ККД при повній потужності S , VA	
	150 - 400	400 - 1000
2	0,4 - 0,6	0,6 - 0,7
4	0,3 - 0,5	0,5 - 0,6

Для вибору енергетичних показників АД великих потужностей слід користуватися графіками, приведеними в довідковій літературі [2-4].

4.3 Перерахунок обмотки асинхронного двигуна на іншу напругу

Перерахунок обмотки статора на іншу напругу без зміни параметрів двигуна (потужності, частоти обертання, коефіцієнту потужності) можливий тільки при незмінності індукції у всіх ділянках магнітного кола машини і об'ємі струму в пазу. При цьому площа пазової і виткової ізоляції повинні залишатися

незмінними. Для індукції в повітряному проміжку можна записати співвідношення:

$$B_{\delta} = \frac{1,355 \cdot p \cdot a_1 \cdot U_H}{f_1 \cdot l_{\delta} \cdot z_1 \cdot D_a \cdot U_{n1} \cdot k_{об1}} \quad (4.18)$$

З цього виразу за умови незмінної індукції маємо

$$\frac{U_{\phi} \cdot a_1}{U_{n1} \cdot k_{об1}} = \frac{U_{\phi нов} \cdot a_{1 нов}}{U_{n1 нов} \cdot k_{об1 нов}}$$

При збереженні незмінним типу обмотки і кроку обмотки ($k_{об1} = k_{об1 нов}$)

$$\frac{U_{\phi} \cdot a_1}{U_{n1}} = \frac{U_{\phi нов} \cdot a_{1 нов}}{U_{n1 нов}}$$

звідки

$$U_{n1 нов} = U_{n1} \frac{U_{\phi нов} \cdot a_{1 нов}}{U_{\phi} \cdot a_1} \quad (4.19)$$

Оскільки площа паза під обмотувальний провід залишається без зміни, то

$$U_{n1} \cdot q_{эф} = U_{n1 нов} \cdot q_{эф нов}$$

або

$$q_{эф нов} = q_{эф} \frac{U_{n1}}{U_{n1 нов}} \quad (4.20)$$

При підстановці значень

$$q_{эф нов} = q_{эф} \frac{U_{\phi} \cdot a_1}{U_{\phi нов} \cdot a_{1 нов}} \quad (4.21)$$

Таким чином, при збереженні частоти обертання, густини струму і потужності число ефективних провідників ($U_{n1 нов}$) у пазу змінюється прямо пропорційно, а їх перетин – зворотно пропорційно новій напрузі живлення двигуна.

При збільшенні числа ефективних провідників (U_{n1}) у пазу зростає об'єм,

яку займає ізоляція проводу. Тому, по можливості, доводиться застосовувати товщі елементарні провідники, що входять в ефективний провід або провідники з тоншою ізоляцією. Іноді доводиться вдаватися до зменшення числа паралельних гілок у фазі (a_1) і тим самим збільшувати перетин проводу в кожній паралельній гілці.

Проте всі ці перераховані заходи щодо збільшення (збереження) коефіцієнта заповнення, тобто виконанню умови не завжди можливо здійснити.

$$\frac{U_{n1нов} \cdot n_{элнов} \cdot d_{изнов}^2}{U_{n1} \cdot n_{эл} \cdot d_{из}^2} \leq 1 \quad (4.22)$$

Тому не завжди вдається зберегти загальний перетин міді в пазу, що призводить до необхідності зниження потужності електродвигуна.

При перерахунку потужних електродвигунів з $U_n = 3кВ$ на $U_n = 6кВ$ практично зниження потужності досягає 15-20%.

Перерахунок двигунів на знижену напругу у багатьох випадках дозволяє збільшити їх потужність завдяки зменшенню пазової ізоляції і зменшенню числа ефективних провідників.

Приклад. Перерахувати електродвигун з напруги 127/220В на 220/380В.

Параметри обмотки:

Тип обмотки – двошарова

Число ефективних провідників в пазу $U_{n1} = 20$,

Число паралельних гілок $a_1 = 2$,

Число елементарних провідників в ефективному $n_{эл} = 1$,

Загальне число провідників в пазу $W_n = 40$,

Діаметр елементарного проводу без ізоляції $d_2 = 1,3мм$,

Перетин елементарного проводу $q_{эл} = 1,327мм^2$,

Двостороння товщина ізоляції $\Delta_{эл} = 0,21мм$,

Діаметр ізольованого проводу $d_{из} = 1,51мм$.

1. При збереженні схеми обмотки (Δ/Y) і числа елементарних провідників в

ефективному проводі, число ефективних провідників в пазу

$$U_{n1нов} = U_{n1} \frac{U_{фнов}}{U_{ф}} = 20 \cdot \frac{220}{127} = 34,6$$

Округляємо до найближчого парного числа 34.

2. Перетин елементарного провідника, який в даному випадку є ефективним (оскільки $n_{эл} = 1$)

$$q_{элнов} = q_{эл} \cdot \frac{U_{ф}}{U_{фнов}} = 1,327 \cdot \frac{127}{220} = 0,77 \text{ мм}^2$$

3. Діаметр елементарного провідника без ізоляції

$$d_{гнов} = 1,13 \sqrt{q_{элнов}} = 1,13 \sqrt{0,77} = 1,01 \text{ мм}$$

Значення $d_{эл}$ округлюється до найближчого стандартного діаметру 1,0 мм .

4. При збереженні марки проводу (виткової ізоляції) діаметр ізольованого проводу

$$d_{изнов} = d_{гнов} + \Delta_{из} = 1 + 0,21 = 1,21$$

Перевіряємо можливість розміщення обмотки в пазу з тією ж пазовою ізоляцією

$$\frac{U_{n1нов} \cdot n_{эл} \cdot d_{изнов}^2}{U_{n1} \cdot n_{эл} \cdot d_{из}^2} = \frac{34 \cdot 1 \cdot 1,21^2}{20 \cdot 1 \cdot 1,51^2} = 1,0$$

При такому збільшенні коефіцієнта заповнення паза обмотка не може бути виконана, тому, якщо немає можливості перейти на матеріали з тоншою витковою і пазовою ізоляцією, доцільно змінити обмотувальні дані. Виконаємо обмотку з $a_{1нов} = 1$ замість двох. При цьому

$$U_{n1нов} = 20 \cdot \frac{220}{127} \cdot \frac{1}{2} = 1,73 \text{ приймаємо } U_{n1нов} = 18$$

$$q_{\text{элюов}} = 1,327 \cdot \frac{20 \cdot 2}{18 \cdot 1} = 1,48 \text{ мм}^2; \quad d_{\text{элюов}} = 1,13 \cdot \sqrt{1,48} = 1,37 \text{ мм}$$

Перевіряємо коефіцієнт заповнення паза

$$\frac{18 \cdot 1,58^2 \cdot 1}{20 \cdot 1,51^2 \cdot 1} = \frac{1,458}{1,51} < 1$$

Таким чином обмотка розміщується в пазу.

Коефіцієнт заповнення паза практично зберігається і, природно, немає підстави для зниження потужності двигуна.

4.4 Перерахунок асинхронного двигуна при збільшенні повітряного проміжку

Збільшення повітряного проміжку (δ) АД призводить до збільшення I_0 , зниженню $\cos\varphi$ і ККД машини, тому у двохполюсних машинах повітряний проміжок повинен бути не більше, ніж на 25%, а у АД з $2p > 2$ не більше, ніж на 15% вище за нормальний. Шляхом зміни обмотувальних даних АД можна зберегти такі технічні показники двигуна як $\cos\varphi$ і ККД. Після перерахунку потужність на валу зменшиться у порівнянні з паспортною, але буде вищий, ніж потужність перемотаного двигуна із збільшеним δ .

1. Збільшення магнітного опору повітряного проміжку, в.о.:

$$\Delta R_{\Delta*} = \frac{\delta_y K_{\delta_y} - \delta_n K_{\delta_n}}{\delta_n K_{\delta_y}} \quad (4.23)$$

де δ_n, δ_y - повітряний зазор нормальний (Н) і підвищений (У);

$K_{\delta_n}, K_{\delta_y}$ - коефіцієнт повітряного зазору

$$K_{\delta} = \frac{(t_1 + 10\delta)(t_2 + 10\delta)}{(t_1 - b_{u1} + 10\delta)(t_2 - b_{u2} + 10\delta)} \quad (4.24)$$

2. Збільшення магнітної напруги всього магнітного ланцюга

$$\Delta R_{\mu^*} \approx 0,75 \Delta R_{\delta y} \quad (4.25)$$

3. Число витків і їх перетин

ЕРС до і після перемотування:

до перемотування

$$E_{ст} = 4,44 f_1 W_{ст} K_{об1} \Phi_{ст} \quad (4.26)$$

після перемотування

$$E_{нов} = 4,44 f_1 W_{нов} K_{об1} \Phi_{нов} \quad (4.27)$$

МРС до і після перемотування:

до перемотування

$$F_{ст} = I_{\mu ст} W_{ст} = \Phi_{ст} R_{\mu ст} \quad (4.28)$$

після перемотування

$$F_{нов} = I_{\mu нов} W_{нов} = \Phi_{нов} R_{\mu нов} \quad (4.29)$$

З (4.26), (4.27), приймаючи $E_{ст} = E_{нов}$

$$W_{нов} = W_{ст} \cdot \frac{\Phi_{ст}}{\Phi_{нов}}$$

Замінивши магнітні потоки на їх складові з (4.28), (4.29), отримаємо

$$W_{нов} = W_{ст} \cdot \frac{I_{\mu ст} \cdot W_{ст}}{R_{\mu ст}} \cdot \frac{R_{\mu нов}}{I_{\mu нов} \cdot W_{нов}}$$

звідки

$$W_{нов} = W_{ст} \cdot \sqrt{\frac{I_{\mu ст} \cdot R_{\mu нов}}{R_{\mu ст} \cdot I_{\mu нов}}} \quad (4.30)$$

Оскільки $R_{\mu нов} = R_{\mu ст} + \Delta R_{\mu}$ або у відносних одиницях $R_{\mu нов^*} = 1 + \Delta R_{\mu^*}$,

отримаємо

$$W_{1нов} = W_{1ст} \sqrt{(1 + \Delta R_{\mu*}) \cdot \frac{I_{\mu ст}}{I_{\mu нов}}} \quad (4.31)$$

При збереженні сталості струму намагнічування, тобто при $I_{\mu нов} = I_{\mu ст}$

$$W_{1нов} = W_{1ст} \sqrt{1 + \Delta R_{\mu*}} \quad (4.32)$$

Перетин витків після перемотування

$$q_{нов} = q_{ст} / \sqrt{1 + \Delta R_{\mu*}} \quad (4.33)$$

При цьому $\cos \varphi$ перемотаного двигуна буде дещо вищий, ніж у не перемотаного, але нижче за паспортного.

Нова потужність двигуна

$$P_{2нов} = 0,9 P_{2ст} / \sqrt{1 + \Delta R_{\mu*}} \quad (4.34)$$

де: $P_{2ст}$ - паспортна потужність двигуна.

При збереженні паспортного значення $\cos \varphi_{нов} = \cos \varphi_{ст}$
до перемотування

$$I_{\mu ст} = I_{нст} \cdot \sin \varphi_{ст} = j_a q_{ст} \cdot \sin \varphi_{ст} = j_a \cdot \sin \varphi_{ст} \cdot K / W_{ст} \quad (4.35)$$

після перемотування

$$I_{\mu нов} = I_{ннов} \cdot \sin \varphi_{нов} = j_a q_{нов} \cdot \sin \varphi_{нов} = j_a \cdot \sin \varphi_{нов} \cdot K / W_{нов} \quad (4.36)$$

де j_a – густина струму, однакова для обох варіантів;

K – коефіцієнт пропорційності між q і W .

В цьому випадку отримаємо вирази для числа витків, перетину проводу і потужності на валу у вигляді

$$W_{1нов} = W_{1ст} (1 + \Delta R_{\mu*}) \quad (4.37)$$

$$q_{нов} = q_{ст} (1 + \Delta R_{\mu*}) \quad (4.38)$$

$$P_{2нов} = P_{2ст} (1 + \Delta R_{\mu*}) \quad (4.39)$$

4.5 Перерахунок трифазної обмотки на однофазну

Головна обмотка в однофазному асинхронному двигуні зазвичай займає 2/3 паза осердя статора. Число провідників в пазу для головної обмотки однофазного двигуна

$$N_{\Gamma} = (0,5 - 0,7)NU_c / U_{\phi} \quad (4.40)$$

де: N - число провідників в пазу трифазного двигуна (у одношарової обмотки

$$N = U_{n1});$$

U_{ϕ} - номінальна напруга фази трифазного двигуна;

U_c - напруга однофазної мережі.

Менші значення числового коефіцієнта в дужках відповідають двигунам більшої потужності (близько $1кВт$) з короткочасним або повторно короткочасним режимом роботи.

Перетин проводу без ізоляції головної обмотки можна визначити по формулі

$$q_2 = \frac{q_{\text{эф}}N}{N_2} \quad (4.41)$$

де $q_{\text{эф}}$ – площа перетину проводу обмотки трифазного двигуна, $мм^2$.

Допоміжна (пускова) обмотка укладається в 1/3 пазів статора і зазвичай виконується з додатковим зовнішнім опором або з біфілярними котушками.

У допоміжній обмотці з додатковим зовнішнім опором число провідників в пазу:

$$N_n = (0,7 - 1,0)N_2$$

площа перетину проводу, $мм^2$

$$q_n = (1,4 - 1)q_2$$

Додатковий опір ($Ом$) заздалегідь визначається по формулі

$$R_n = (1,6 - 8) \cdot 10^{-3} \cdot U_c / q_n$$

остаточно уточняється при випробуванні електродвигуна.

У пусковій обмотці з біфілярними котушками число провідників в пазу для основної секції

$$N_n' = (1,3 - 1,6) N_2$$

Число провідників в пазу для біфілярної секції

$$N_n'' = (0,45 - 0,25) N_n'$$

загальне число провідників в пазу

$$N_n = N_n' + N_n''$$

перетин проводу

$$q_n' = q_n'' \approx 0,5_2$$

Струм в робочій обмотці однофазного двигуна (при числі паралельних гілок $a = 1$)

$$I_2 = j_2 \cdot q_2$$

де j_2 – густина струму в робочій обмотці, вибирається в межах від 6 A/mm^2 до 10 A/mm^2 (великі значення для мікродвигунів меншої потужності).

Повна потужність двигуна (BA)

$$P' = U_c \cdot I$$

Потужність на валу двигуна (Bm)

$$P = P' \cdot \eta \cdot \cos \varphi$$

де $\eta \cdot \cos \varphi$ - енергетичний ККД (табл. 4.9).

Енергетичний ККД однофазних асинхронних двигунів з пусковими елементами

P', BA	$\eta \cdot \cos \varphi$ при числі полюсів		P', BA	$\eta \cdot \cos \varphi$ при числі полюсів	
	$2p = 2$	$2p = 4$		$2p = 2$	$2p = 4$
100	0,30	0,15	600	0,49	0,38
200	0,34	0,22	800	0,52	0,43
400	0,43	0,31	1000	0,54	0,46

Під час пуску однофазний двигун, перероблений з трифазного, іноді застряє на низькій частоті обертання. Таке явище часто спостерігається у двополюсних двигунах. Умови пуску поліпшуються при збільшенні повітряного проміжку і застосуванні двошарових обмоток з скороченим кроком на $1/3$ полюсної поділки.

У однофазних електродвигунах пусковий момент може значно знизитися через падіння напруги в проводах, при великому пусковому струмі, на який однофазні мережі зазвичай не розраховані. В цьому випадку треба збільшити перетин проводів, що підводять напругу від джерела живлення.

4.6 Вмикання трифазних двигунів в однофазну мережу без перемотування

Трифазний АД може працювати від однофазної мережі як однофазний з пусковим елементом або як однофазний конденсаторний з постійно ввімкненою робочою ємністю. Віддається перевага застосуванню двигуна як конденсаторного. Якщо прийняти за 100% потужність трифазного двигуна, позначену на його щитку, то при однофазному вмиканні двигун може розвивати 50-70% цієї потужності, а при використанні як конденсаторного – 70-85% і більше.

Схему вмикання (рис. 4.1) треба вибирати з урахуванням напруги мережі і номінальної напруги двигуна.

Робоча ємність C_p (мкФ) для кожної схеми повинна мати певне значення і може бути розрахована, виходячи з напруги однофазної мережі і номінального струму I_ϕ у фазі трифазного двигуна:

$$C_p = kI_\phi / U_c \quad (4.42)$$

де k – коефіцієнт, який залежить від схеми вмикання.

При частоті 50Гц для схеми (рис. 4.1 а), б) можна прийняти $k = 2800$; для схеми (рис. 4.1 в) – $k = 4800$; для схеми (рис. 4.1 г) – $k = 1600$.

Робоча напруга конденсатора U_k також залежить від схеми вмикання і напруги мережі. Для схем (рис. 4.1 а), в) вона може бути прийнята рівною напрузі мережі; для схеми (рис. 4.1 б) $U_k = 1,15U_c$; для схеми (рис. 4.1 г) – $U_k = 2U_c$.

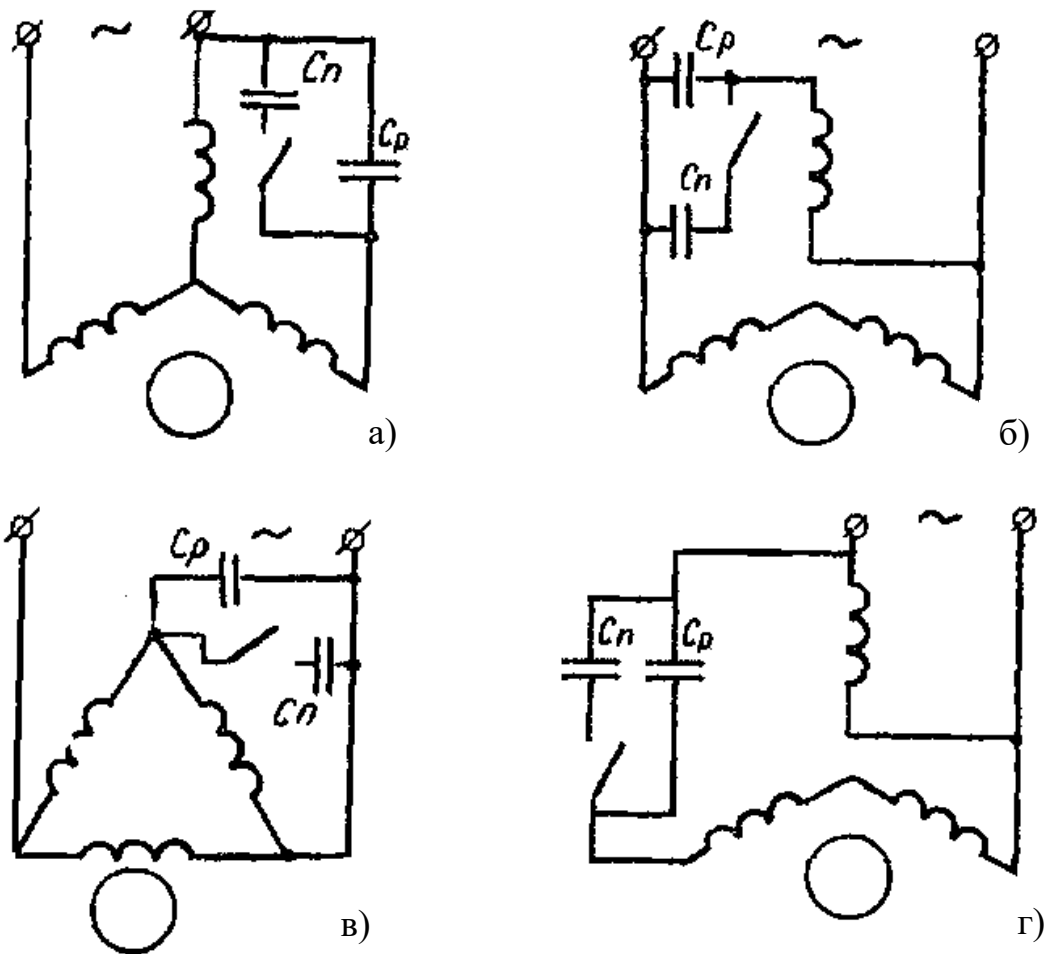


Рис. 4.1. Схеми вмикання трифазних двигунів в однофазну мережу без перемотування

5. МЕТОДИКИ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

5.1 Лабораторна робота № 1

Встановлення причин виходу з ладу асинхронного двигуна, розбирання двигуна та видалення обмотки (2 + 2 год)

Мета лабораторної роботи – поглибити знання з дисципліни «Технологія виробництва електричних машин», набути умінь і практичні навички по передремонтним випробуванням всипних обмоток асинхронних двигунів, визначенню несправностей асинхронних двигунів, по розбиранню електричних машин та видаленню обмоток.

ПРОГРАМА ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Поставлена мета досягається виконанням наступної програми робіт:

1. Отримання інструктажу по техніці безпеки при проведенні робіт і правилам користування робочим інструментом і приладами.
2. Детальне ознайомлення з конструкцією асинхронного двигуна, будовою обмоток та принципом дії на реальному двигуні і віртуальній моделі, створеній на кафедрі електромеханіки.
3. Визначення технічного стану обмоток.
 - 3.1 Вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками за допомогою мегомметра.
 - 3.2 Пошук несправностей виткової ізоляції обмоток за допомогою ЕЛ-1.
- 4 Розбирання двигуна за допомогою слюсарних інструментів.
- 5 Видалення пошкодженої обмотки.

(2 години)

По вказівці викладача в програму робіт можуть бути внесені зміни з урахуванням інтересу студентів і конкретних обставин.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Передремонтні випробування АД потрібні для визначення їх несправності. Спочатку проводять зовнішній огляд АД і визначають справність всіх видимих

деталей і складальних одиниць. Провертаючи рукою вал, можна виявити несправності підшипників або торкання магнітопроводу ротора об поверхню статора. Далі мегомметром перевіряють опір ізоляції обмоток відносно корпусу і між фазами, що дозволяє виявити пробій ізоляції на корпус і між фазами, або сильне зволоження ізоляції, що не дозволяє експлуатацію двигуна. Для проведення цього контролю заздалегідь відмикають всі кінці двигуна від вивідної колодки. В трифазних електричних машинах з шістьма виводами обмоток стан корпусної і міжфазної ізоляції кожної фази обмотки визначають при заземлених двох інших фазах. При цьому опір ізоляції визначається двома складовими: опором ізоляції фази на заземлений корпус і опором ізоляції між вимірюваною обмоткою і обмотками заземлених фаз. Опори ізоляції кожної фази відносно корпусу при заземлених інших двох фазах навести в таблиці 1

Таблиця 1

Опори ізоляції кожної фази відносно корпусу при заземлених інших двох

C1 – C4 , МОм	C2 – C5 , МОм	C3 – C6 , МОм

Згідно вимог ДСТУ 183-85 допустимі значення опорів ізоляції обмоток АД потужністю до 40 КВт повинні бути визначені при робочій температурі

$$R_{ii} \geq \frac{U_{1ном}}{1000 + 0,01 \cdot P_{ном}}, \text{ МОм}$$

де: $U_{1ном}$ – номінальна напруга двигуна, В ;

$P_{ном}$ – номінальна потужність двигуна, КВт.

Слід зазначити, що вимірний опір $R_{із}$ при робочій температурі не повинний бути менше $0,5 \text{ МОм}$. Вимірювання опору ізоляції слід проводити мегаомметром класу напруги 500 В для двигунів з $U_{ном} \leq 500 \text{ В}$ і класу 1000 В для двигунів з $U_{ном} \geq 500 \text{ В}$.

У випадку відмінності опорів ізоляції фаз в 1,5-2 рази має місце дефект ізоляції у фазі з найменшим опором, або сильне зволоження ізоляції. Щоб

визначити, яка саме ізоляція має дефект (корпусна або міжфазна), спочатку вимірюють опір ізоляції фази з дефектом щодо корпусу при незаземлених обмотках інших фаз, а потім - опір при прикладанні напруги між фазою з дефектною ізоляцією і сполученими між собою, але заземленими обмотками інших фаз.

Опори ізоляції фаз більше $0,5\text{МОм}$ при незначній різниці між ними свідчать про задовільний стан корпусної ізоляції.

Розрахункове значення робочої температури двигунів з класом нагрівостійкості ізоляції **A**, **E**, **B** дорівнює 75°C і **F**, **H** - 115°C . Відомо, що опір ізоляції зменшується удвічі при підвищенні температури на кожні 20°C . Тому, якщо вимірювання опору проводиться при температурі θ , нижче робочої $\theta_{\text{роб}}$, то мінімальний опір ізоляції при температурі θ .

$$R_{\text{из}\theta} \geq R_{\text{из}} \cdot 2^h$$

де $R_{\text{из}}$ - опір ізоляції, розрахований по (3.1), але не менше $0,5\text{МОм}$;

$$h = \frac{\theta_{\text{роб}} - \theta}{20} - \text{показник ступеня, що округлюється до найближчого більшого}$$

цілого числа.

Приклад результатів вимірювань, виконаних на лабораторному асинхронному двигуні: Опір ізоляції трьох обмоток статора, виміряний при $\theta = 24^{\circ}\text{C}$ склав 150МОм , номінальна потужність двигуна $P_{\text{ном}} = 1,1\text{кВт}$, робоча напруга $U_{\text{н}} = 380\text{В}$.

Опір ізоляції при робочій температурі

$$R_{\text{из}} = \frac{380}{(1000 + 0,01 \cdot 1,1)} = 0,38\text{МОм}$$

При класі нагрівостійкості ізоляції обмотки **F** робоча температура $\theta_{\text{роб}} = 115^{\circ}\text{C}$

Значення коефіцієнта h :

$$h = \frac{(115 - 24)}{20} = 4,55 \approx 5$$

Мінімальний опір ізоляції при температурі $\theta = 24^\circ\text{C}$ по (3.2) повинен бути не менше:

$$R_{\text{из}\theta} = 0,38 \cdot 2^5 = 12,16 \text{МОм}$$

Оскільки вимірне значення опору ізоляції (150МОм) ,більше мінімального припустимого при температурі $\theta = 24^\circ\text{C}$ ($R_{\text{из}\theta} = 12,16 \text{МОм}$), то подальша експлуатація двигуна можлива, але при відсутності **ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ** в обмотці.

Апарат ЕЛ-1 призначений: для виявлення виткових замикань і обривів в обмотках електричних машин і апаратів; для знаходження паза з короткозамкненими витками в обмотках статорів, роторів і якорів електричних машин; для перевірки правильності з'єднання обмоток електричних машин по схемі, а також маркування вивідних кінців фазних обмоток електричних машин.

Схема апарату складається з трьох основних вузлів: електронно-променевої трубки і високовольтного контуру живлення трубки; контуру розгортки променя на екрані по горизонтальній вісі і синхронізації; генератора імпульсів.

Принцип дії апарату заснований на порівнянні повного опору двох фаз обмотки, сполучених між собою паралельно і підключених до апарату. При подачі в обмотку двох фаз напруги від генератора на екрані електронно-променевої трубки з'являється крива перехідного процесу, що світиться. Імпульси напруги на підключені фази обмотки подаються по черзі, і не встигає на екрані зникнути одна крива, як з'являється інша (екран володіє властивістю післясвічення). Якщо обмотки не мають ніяких дефектів і їх електричні параметри однакові, то криві обох фаз будуть однакові формою і по амплітуді, і на екрані трубки спостерігатиметься одна крива. Якщо ж в одній з фаз є коротке замикання витків, неправильне з'єднання по схемі, або різне число витків, пробій ізоляції на корпус, обрив або інші дефекти, криві не накладуться одна на другу, на екрані спостерігаються дві криві. При достатньому навичку в роботі з апаратом за

формою кривих можна судити про характер дефекту обмоток.

На передній панелі апарату розташовані: ручки управління; затискачі для приєднання випробувальних обмоток або пристосування для знаходження паза з короткозамкненими витками; екран електронного індикатора. На задній стінці розташовані колодка для приєднання шнура і підключення апарату до мережі і запобіжник.

Перед вмиканням апарату в мережу треба обов'язково приєднати заземлюючий провід до заземлюючого затискача, щоб забезпечити себе від поразки струмом, а ручку потенціометра «Ампл.імп.» поставити в крайнє ліве положення.

Після підключення апарату до мережі включити вимикач «Мережа» і почекати не менше однієї хвилини, поки прогріються лампи, після чого можна включати анодні напруги (вимикач «Анод»).

Поворотом ручки «Фокус» вправо або вліво сфокусувати промінь так, щоб на екрані перехідний процес висвітлювався чітко.

Якщо три фази обмоток сполучені в зірку, то затискач «Вих.імп.» приєднується до виводів двох фаз, а лівий затискач «Сигн.явл» – до виводу третьої фази або нульової точки (рисунки 3.1). При перевірці правильності маркування виводів фазних обмоток електричних машин лівий затискач «Сигн.явл.» слід приєднати до виводу третьої фази.

Якщо фази обмоток сполучені в трикутник, то лівий затискач «Сигн.явл.» потрібно приєднати до третього виводу (рис. 3.1 б).

Бажано, щоб довжина вихідних проводів від апарату до випробувальних обмоток була не більше 4м, перетин і марка цих проводів повинні бути однаковими.

Після приєднання обмоток поворотом ручки «Ампл.імп.» встановити амплітуду імпульсу такої величини, щоб на екрані була крива, по масштабу зручна для спостереження.

Оскільки однакові випробувальні фази обмотки практично завжди дещо відрізняються одна від іншої і цю природну асиметрію апарат може уловлювати,

то на екрані, на вершині кривої напруги може з'явитися невелике роздвоєння кривої з коливаннями високої частоти. Цю асиметрію потрібно компенсувати поворотом ручки «Симметр.».

Випробувавши дві фази обмотки (секції) і переконавшись, що виткових замикань або інших дефектів в них немає, потрібно одну з них поміняти місцями з третьою фазою обмотки. Якщо після цього на екрані з'являться дві криві, то це означає, що замість справної обмотки в випробування вімкнена пошкоджена; якщо ж на екрані буде одна крива, то і третя фаза не має дефектів.

Якщо при випробуванні двох обмоток виявиться виткове замикання або який-небудь інший дефект і на екрані з'являться дві криві, то для виявлення обмотки з дефектом потрібно одну з обмоток поміняти місцями з третьою обмоткою. Якщо після такої заміни на екрані буде одна крива, а не дві, то дефектною обмоткою є замінена.

Для знаходження в машині паза з короткозамкненими витками потрібно користуватися пристосуванням з двома п-подібними електромагнітами. Для цього котушку нерухомого електромагніту (100 витків) приєднують до затискачів «Вих.ім.»), а котушку рухомого електромагніту (2000 витків) – до затискачів «Сигн.явл.» (рис. 1 в). Середня ручка повинна бути при цьому поставлена в крайнє ліве положення «Работа з пристосув.»).

Переставляючи обидва електромагніти пристосування з пазу на паз по розточці статора або поверхні ротора з фазною обмоткою, на екрані електронно-променевої трубки ми будемо споглядати наступне: за відсутності в пазу короткозамкнених витків на екрані трубки з'явиться пряма або крива лінія з малими амплітудами (внаслідок слабкого індуктивного зв'язку); за наявності в пазу короткозамкнених витків на екрані трубки з'являться дві криві з великими амплітудами, вивернутими по відношенню одна до іншої. По цим кривим і знаходять паз з короткозамкненими витками.

Не можна допускати закорачування між собою проводів, що йдуть від затискачів «Вих.ім.» до випробувальних обмоток, оскільки це може вивести апарат з ладу. Не можна також торкатися до оголених кінців цих проводів.

При невеликих перервах в роботі рекомендується вимикати анодну напругу.

Результати вимірювань на лабораторному асинхронному двигуні показати у вигляді малюнку осцилограми перехідних процесів в обмотках. Приклад осцилограми перехідних процесів при наявності виткових замикань в обмотках наведений на рис. 3.2.

При розбиранні двигуна необхідно здійснити наступні операції:

- зняти кожух зовнішнього вентилятора і вентилятор;
- відвернути болти, якими прикріплені до станини передній (розташований з боку виступаючого кінця валу) підшипниковий щит, а також болти, - що кріплять кришку підшипника з боку приводу;
- зняти задній щит легкими ударами молотка по надставці з дерева, алюмінію, міді;
- вийняти ротор із статора, для чого подати ротор у бік переднього щита;
- зняти передній щит з підшипника на валу ротора, заздалегідь відвернувши болти, що кріплять кришку підшипника.

При усуненні обмотки без подальшого відновлення обмотувального проводу в ремонтних цехах статор двигуна встановлюють на фрезерний або токарний верстат і обрізають лобову частину обмотки з одного боку. Потім, в умовах ремонтних цехів статор встановлюють в піч, де проводять випалювання. Обмотки видаляють з пазів найбільш економічним способом, піклуючись про збереження осердя.

Статор з алюмінієвим корпусом операції випалювання не піддають внаслідок того, що змінюються розміри станини та ослаблюється посадка осердя. Підвищувати температуру при випалюванні більше 350 °С неможна, внаслідок пошкодження міжлистової ізоляції осердя та зміни магнітних властивостей електротехнічної сталі в бік погіршення. Окремі випадки в практиці ремонтів, коли після випалювання ізоляції відбувається покращення магнітних властивостей сталі (зменшення втрат), можна пояснити порушенням технології при виготовленні магнітопроводу.

При іншому методі руйнування ізоляції обмоток осердя занурюють на 6-8

годин в ванну з 10% ним розчином каустичної соди, нагрітої до 80-90°C. Після вилучення обмотки з осердя його промивають в проточній воді та сушать, що потребує значної кількості води.

Після цього статор виймають з печі, дають остигнути до температури навколишнього повітря і витягують обмотку з пазів статора вручну, застосовуючи металеві крючки, важелі або слюсарні інструменти.

В умовах лабораторії лобові частини обмоток зрізають з однієї сторони вручну за допомогою ножиць по металу або вирубують зубилом.

Під час виконання лабораторної роботи статор встановлюють на слюсарний верстат, прикладають гостре зубило якомога щільніше до торця пакету магнітопроводу над місцем виходу секції з пазу і різкими ударами молотка по зубилу зрізають обмотку в місці виходу секції з пазу. Після зрізання всіх лобових частин обмотки з однієї сторони, перевертають статор в вертикальне положення. Різкими не сильними ударами молотка по тонкому стрижню, розміри якого менше розмірів паза виштовхують обмотку з пазу. Періодично металевим важелем витягують за лобові частини секції обмоток з протилежної сторони. Робота ця дуже трудомістка і вимагає багато часу. Крім того, необхідно бути дуже обережним, щоб не пошкодити жерсті магнітопроводу і не «розпушувати» магнітопровід.

Питання до самоконтролю

1. З якою метою проводять передремонтні випробування АД?
2. Як виявляють механічні несправності АД?
3. Наведіть порядок перевірки опору ізоляції обмоток виткової, міжфазової та корпусної?
4. Чому в ЕМ з 6 виводами обмоток стан корпусної і міжфазної ізоляції кожної фази обмотки визначають при заземлених двох інших фазах?
5. Який мінімально припустимий опір ізоляції обмоток при робочій температурі?
6. Які класи напруг мегомметрів використовують для вимірювання опору ізоляції обмоток?

7. Які критерії свідчать про наявність дефектів в ізоляції обмоток ?
8. Як залежить опір ізоляції при підвищенні температури обмоток?
9. На якому принципі дії заснована робота апарату ЕЛ-1?
10. Які процеси можна побачити на екрані апарату ЕЛ-1 при наявності дефектів ізоляції обмоток?
11. Який порядок розбирання асинхронного двигуна?
12. Який порядок видалення обмоток застосовують в ремонтних цехах підприємств?
13. Чому статор з алюмінієвим корпусом операції випалювання не піддають?
14. Чому не можна підвищувати температуру обмоток при випалюванні вище 350°C?
15. Який порядок видалення обмоток застосовують в лабораторії?
16. Чому важливо при видаленні обмотки не пошкодити осердя магнітопроводу?

5.2 Лабораторна робота № 2

Обмір геометричних розмірів магнітопроводу та виготовлення пазової ізоляції і її укладання в пази (2 + 2 год)

Мета лабораторної роботи - поглибити знання з дисципліни «Технологія виробництва електричних машин», набути уміння і практичні навички по підготовці магнітопроводів до ремонту, обміру розмірів та розрахунку машин.

ПРОГРАМА ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Поставлена мета досягається виконанням наступної програми робіт:

1. Отримання інструктажу по техніці безпеки при проведенні робіт і правилам користування вимірювальним інструментом і обладнанням для ізолювання пазів магнітопроводу.

2. Детальне ознайомлення з конструкцією пазової ізоляції асинхронного двигуна на реальному двигуні і віртуальній моделі, створеній на кафедрі електромеханіки.

3. Підготовка магнітопроводу до обміру геометричних розмірів

4. Обмір геометричних розмірів магнітопроводу

(2 години)

5. Виготовлення пазової ізоляції і її укладання в пази.

(2 години)

6. Складання можливих варіантів схем обмоток (студенти виконують самостійно, як частину РГР, за матеріалами в методичці).

7. Розрахунок обмотки (студенти виконують самостійно, як частину РГР, за матеріалами в методичці).

По вказівці викладача в програму робіт можуть бути внесені зміни з урахуванням інтересу студента і конкретних обставин, наприклад, зміна частоти обертання двигуна, зміна номінальної напруги живлення, виготовлення двофазної обмотки замість трифазної і т.і.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Після видалення обмотки необхідно видалити з пазів ізоляцію, що залишилась в пазах і ретельно продути осердя стиснутим повітрям. Залишки

ізоляції видаляють з пазів вручну за допомогою напилків або іншим гострим інструментом. В лабораторії пази зачищають за допомогою надфілів – маленьких напилків різної форми перерізу (рис. 1). Процес зачищення пазів дуже трудомісткий і вимагає багато часу для його проведення.

Всі порушення жерстей магнітопроводу, які сталися при видаленні обмотки відновлюють. Розпушені жерсті додатково пресують ударами молотка через дерев'яні чурки.

В разі порушення положення жерстей одна відносно іншої внаслідок послаблення пресування осердя виступаючі жерсті запилюють надфілем.

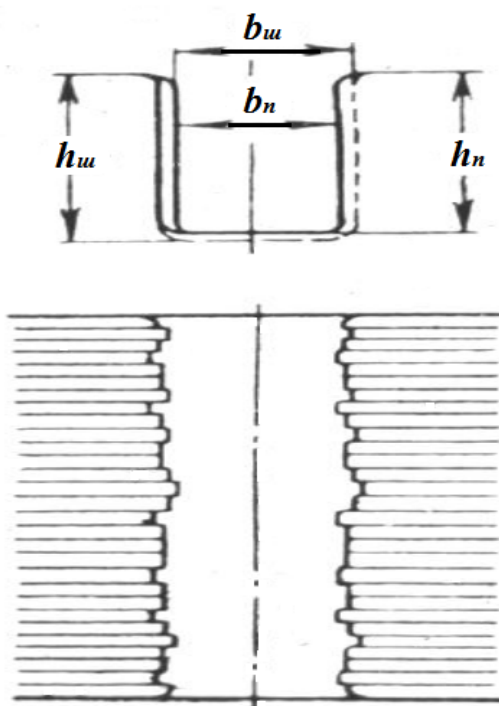


Рис. 1. Зміщення жерстей в пазу

На підприємствах для розм'якшення ізоляції, що залишилась в пазах, осердя розміщують в ваннах з гарячим 5-8% розчином каустичної соди і витримують впродовж 6-8 годин при 60-80° С. Зачищення пазів також виконують вручну пазовими напилками, які мають форму паза, але менших розмірів і довших за довжину осердя на 150-200 мм. Напилки на підприємствах виготовляють в інструментальному цеху спеціально під кожний магнітопровід.

Перед початком розрахунку потрібно визначити старі обмотувальні дані машини і провести обмір статора і ротора. По старим обмотувальним даним

визначають схему з'єднання і тип обмотки, число котушкових груп у фазі і їх з'єднання (послідовне або паралельне), число котушок в котушковій групі, тобто число пазів на полюс і фазу q , число ефективних провідників в пазу U_{n1} , число паралельних елементарних проводів в одному ефективному $n_{ел}$, число паралельних гілок в обмотці a_1 , розміри і марку проводу, розміри вильоту лобових частин, крок обмотки по пазах y . При відомому типі двигуна бажано порівняти одержані дані, з довідниковими.

Якщо встановити вказані величини не вдається або відсутня обмотка і дані заводського щитка, то обмежуються вимірюваннями: внутрішнього діаметру статора D_1 , і ротора D_j , зовнішнього діаметру активної сталі статора D_a і ротора D_2 , висоти спинки статора h_a і ротора h_j , висоти зубців статора h_{z1} і ротора h_{z2} , ширини зубців статора і ротора вузької частини $b_{я1}$ і $b_{я2}$, ширини шліца паза $b_{ш}$, повної довжини активної сталі статора l_1 і ротора l_2 , числа пазів статора z_1 і ротора z_2 , повітряного проміжку між статором і ротором δ , розмірів паза в світлі $S_{нес}$. Виміри величини необхідно записати в обмотувально-розрахункову карту, надану в методичці.

Обмотувально-розрахункова карта лабораторного двигуна

Тип електродвигуна (дані з паспортної таблички)

Заводський номер (дані з паспортної таблички)

Потужність P [кВт] = (дані з розрахунків)

Номінальна фазна напруга U [В] = (дані з паспортної таблички)

Номінальний фазний струм I [А] = (дані з розрахунків)

Кількість фаз m = (дані з паспортної таблички)

Число полюсів $2p$ = (дані з паспортної таблички)

Частота обертання ротора n [об/хв] = (дані з паспортної таблички)

Внутрішній діаметр розточки статора D_1 [мм] = (результати вимірювань)

і ротора D_2 [мм] = (результати вимірювань)

Зовнішній діаметр активної сталі статора D_a [мм] = (результати вимірювань)

і ротора D_k [мм] = (результати вимірювань)

Висота спинки статора $h_a[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
і ротора $h_j[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
Висота зубців статора $h_{z1}[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
і ротора $h_{z2}[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
Ширина зубців статора вузької частини $b_{z1}[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
і ротора $b_{z2}[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
Ширина шліца паза статора $b_{ш}[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
Повна довжина активної сталі статора $l_1[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
і ротора $l_2[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
Число пазів статора $z_1 = (\text{результати вимірювань})$
і ротора $z_2 = (\text{результати вимірювань})$
Повітряний проміжок між статором і ротором $\delta[\text{мм}] = (\text{результати вимірювань})$
Розміри паза в світлі $S_{п.св}[\text{мм}^2] = (\text{результати вимірювань})$
Вид обмотки: (вибір типу обмотки здійснює викладач)
Крок обмотки $y = (\text{результати розрахунків})$
Число паралельних гілок $a = (\text{результати розрахунків})$
Число активних провідників у пазу $U_{п1} = (\text{результати розрахунків})$
Число паралельних проводів $n_{ел} = (\text{результати розрахунків})$
Марка і діаметр проводу $d/d_{із}[\text{мм}] = (\text{результати розрахунків})$
Перетин проводу $q_{ел}[\text{мм}^2] = (\text{результати розрахунків})$

Слід зазначити, що неправильні або неточні виміри можуть призвести до непридатності відремонтованого двигуна. Кожне вимірювання потрібно проводити 2-3 рази. Вимірювання треба пояснювати ескізами. Довжину осердя статора і ротора вимірюють металевою лінійкою, що прикладається по дну пазу. Вимірювання по головках зубців може дати помилкові результати, утворюючи "віяло". Якщо не вдається виміряти зовнішній діаметр осердя статора і внутрішній діаметр осердя ротора, їх розраховують по висоті спинки і зубця. Розміри і площу пазів визначають після ретельного вичищення поверхні пазів від залишків

ізоляції і лаку. Для цього вирізують з міліметрівки смужки, що перекривають два-три паза, прикладають до торців осердя і, притискуючи пальцями, знімають відбитки. Площу пазу розраховують по кількості квадратних міліметрів усередині відбитку.

Величина повітряного проміжку між статором і ротором істотно впливає на експлуатаційні показники АД. Збільшення величини повітряного проміжку δ на 1% спричиняє за собою підвищення струму неробочого ходу на 0,6% і зниження $\cos\varphi$ на 0,3%. При збільшенні зазору на 15-20% електродвигун треба перемотувати за новими обмотувальними даними із збільшеним кількістю витків в пазу. При збільшенні δ більш, чим на 20% ремонт двигуна стає недоцільним.

Збільшення повітряного проміжку може бути викликано проточною внутрішньої поверхні статора або зовнішньої поверхні ротора, що є неприпустимим. Можливо збільшення зазору при тривалій експлуатації через шліфуючу дію пилу. Іншою причиною збільшення зазору є неправильне зберігання АД, при якому корозують поверхні статора і ротора, допустимі величини повітряних зазорів асинхронних двигунів приведені в табл.1. Величину зазору розраховують як різницю внутрішнього діаметру статора D_1 і зовнішнього діаметру сталі ротора D_2 .

Таблиця 1

Повітряні проміжки АД

об/хв	Допустимий проміжок (мм) при потужності АД (кВт)							
	0,2	0,2-1	1-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-50	50-100
До 1500	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,65
3000	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,65	0,8	1,0

Для пазової і міжпазової ізоляції, а також ізоляції в лобових частинах використовують плівки «Тривольтерм», «Гіпертекс», «Ізофлекс», «Поліетилентерефталат», «Синтофлекс» або електрокартон завтовшки 0,15-0,3 мм.

Основні вимоги, що пред'являються до ізоляції: електрична і механічна міцність. Крім того, ізоляція повинна володіти додатковими властивостями: високою пружністю, щоб щільно прилягати до стінок паза; високою еластичністю і гладкою поверхнею, щоб не ушкоджувалася ізоляція при укладанні обмотки; стійкістю до надривів, розшарування, продавлювання і т.і.

Ізолювання пазів передбачає дві операції: виготовлення пазового короба і установка його в паз. Ширина заготовки пазової коробочки менше периметра паза без шліца на 1-3 мм. Пазовий короб має манжети, що фіксують його в пазу в повздовжньому напрямі (рис. 2) і підвищуючи надійність корпусної ізоляції обмотки в торці зубця.

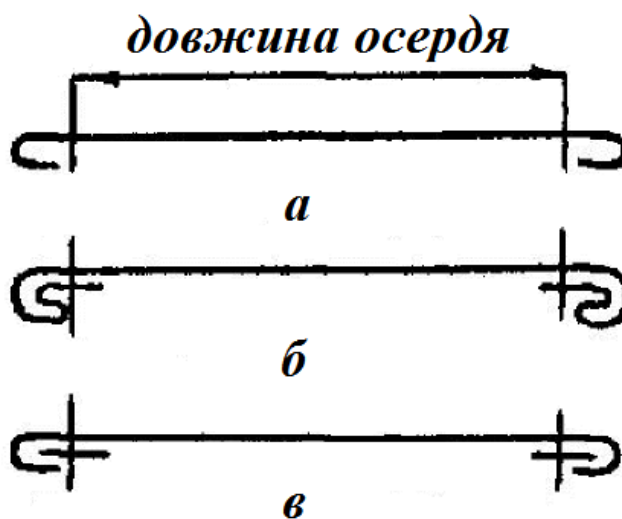


Рис. 2

Для утворення пазового короба довжина заготівлі виконується:

$$l_3 = l_\delta + (12 - 20) \text{ мм}$$

де l_δ – довжина пакету статора, мм.

Аналіз дефектів пазової ізоляції показує, що найбільша кількість пошкоджень пазового проводу відбувається в місці виходу короба з осердя. Тому для посилення короба можна ізолювати пази тоншим матеріалом, а манжети утворювати, двічі підгинаючи матеріал. При цьому товщина матеріалу на виході з паза залишається тією самою, а в пазу тонше. Приблизно такий же ефект досягається при ізолюванні тоншим матеріалом і підклеюванні в місці виходу з паза додаткової стрічки.

Набуває поширення спосіб ізолювання пазів гарячою формовкою пазових коробів із поліетилентерефталатної плівки. Процес дозволяє відмовитися від виготовлення манжет, виступаючі з пазу краї ізоляційного матеріалу відгинаються в гарячому стані і притискаються до торців осердя. Краї матеріалу повинні мати спеціальне оброблення. Пазові коробки формують одночасно з двох сторін пуансонами, нагрітими до температури 200...240°C, час нагріву 2–3с. За відсутності манжети немає необхідності в прямолінійній частині котушки після її виходу з пазу, що дозволяє зменшити довжину лобової частини котушок.

Заготовка коробочки з електрокартону вирізують уздовж волокон, оскільки при вигині упоперек волокон відбуваються місцеві руйнування і істотне зменшення електричної міцності.

Спочатку потрібно виготовити пробну коробочку і дерев'яне облямовування за розмірами пазу. Облямовування повинне щільно притискувати ізоляцію до стінок паза по довжині і периметру. При виготовленні і підгонці облямовування використовують ніж і напилек.

Формують манжету коробочки за допомогою спеціального металевого облямовування з глибиною паза, рівній довжині манжети (3...5мм). Заготівку коробочки вставляють в паз облямовування і загинають, як показано на рис. 3.

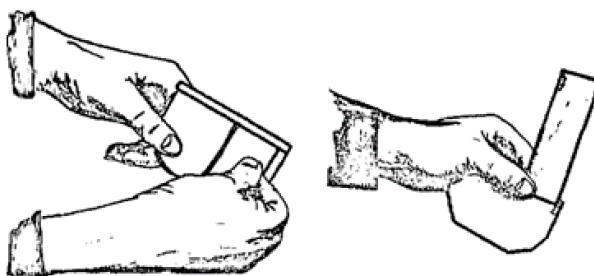


Рис. 3. Виготовлення манжети пазової коробочки

Коробочку слід підігнати по розмірам пазу. Коробочка не повинна виступати з щілини пазу і зміщуватися уздовж паза. Потім вирізують заготовки коробочок за уточненими розмірами, формують манжети, формують пазові коробочки на дерев'яному облямовуванні, вставляють кожну коробочку з торця паза (рис. 4) і розпрямляють коробочку в пазу.

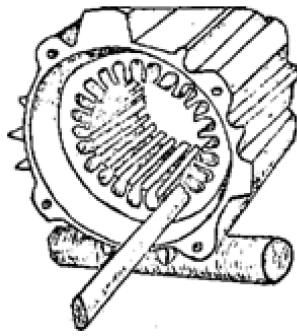


Рис. 4. Укладання в паз і правка пазової коробочки дерев'яним облямовуванням

Далі вирізують пазові міжшарові прокладки (для двошарових обмоток) і прокладки під клин. Довжина пазової міжшарової прокладки і довжина прокладки під клин приймаються рівними довжині заготівлі пазової коробочки. Ширина прокладки дорівнює ширині паза в середній (верхній) частині плюс 5...10мм.

Складання можливих варіантів схем обмоток студенти виконують самостійно в рамках виконання розрахунково-графічної роботи. Студенти повинні представити принаймні два варіанти схем обмоток, з яких вибрати один, найбільш технологічний та який відповідає найбільшій потужності двигуна. Схеми можливих варіантів схем обмоток представити на міліметровому папері з позначенням всіх вихідних та розрахункових даних. Схеми обмоток бажано представити з кольоровою різницею позначення фаз обмотки. (Додаток В).

Розрахунок обмоток студенти виконують самостійно в рамках виконання розрахунково-графічної роботи.

На підставі проведених вимірювань визначаються розрахунковим шляхом наступні величини:

Розрахункова довжина активної сталі статора (ротора)

$$l_{ст1(2)} = l_1(2) \cdot k_c.$$

Зовнішній діаметр статора і ротора, що були виміряні безпосередньо

$$D_a = m, D_2 = m.$$

Зубцева поділка статора і ротора

$$t_1 = \pi \cdot D_1 / Z_1, \text{ мм.}$$

$$t_2 = \pi \cdot D_2 / Z_2 =, \text{ мм.}$$

Кількість полюсів: $2p$

Кількість паралельних гілок приймаємо: a_1

Номинальна потужність взята з заводської таблички, або з довідника по асинхронним двигунам серії 4А Кравчика для двигуна, що має такі самі основні розміри активної частини, а саме довжина магнітопроводу статора і ротора та зовнішні та внутрішні діаметри статора та ротора. $P = X$ кВт.

Число ефективних провідників у пазу

$$U_{п1} = 1,23 \cdot k_E \cdot P \cdot U_1 \cdot a_1 / f \cdot k_{об1} \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot B\delta \cdot Z_1$$

Кількість витків у фазі обмотки статора $W_1 = Z_1 \cdot U_{п1} / (6 \cdot a_1)$

Значення магнітного потоку

$$\Phi_{ном} = a\delta \cdot B\delta \cdot \tau \cdot l_1 = 0,68 \cdot 0,6 \cdot \pi \cdot D_1 / 2p \cdot l_1$$

Визначити значення індукції на всіх ділянках магнітного кола, а саме у повітряному зазорі та в зубцях і ярмах статора та ротора $B\delta = 0,6$ Тл.

$$B_{Z_1} = B\delta \cdot t_1 \cdot l\delta / b_{Z_1} \cdot l_1 \cdot k_c$$

$$B_{Z_2} = B\delta \cdot t_2 \cdot l\delta / b_{Z_2} \cdot l_2 \cdot k_c$$

$$B_a = \Phi_{ном} / 2 \cdot h_a \cdot l_1 \cdot k_c$$

$$B_j = \Phi_{ном} / 2 \cdot h_a \cdot l_1 \cdot k_c$$

За отриманими значеннями індукції за довідниковими даними знайти для ділянок, що мають магнітопровід (тобто усі окрім повітряного зазору) значення напруженості магнітного поля на метр довжини (так як сталь має криву намагнічування, і за різних значень магнітної напруги потік і індукція змінюються не лінійно)

$$H_{Z_1} = A/m. \quad H_{Z_2} = A/m. \quad H_a = A/m. \quad H_j = A/m.$$

Магнітна напруга кожної окремої ділянки та сумарна магнітна напруга всього магнітного кола машини:

$$F_\delta = 2 / \mu_0 \cdot B\delta \cdot k_\delta \cdot \delta \cdot 10^{-3} = A.$$

$$F_{Z_1} = 2 \cdot h_{Z_1} \cdot H_{Z_1} = A.$$

$$F_{Z_2} = 2 \cdot h_{Z_2} \cdot H_{Z_2} = A.$$

$$F_a = L_a \cdot H_a = A.$$

$$F_j = L_j \cdot H_j = A.$$

$$F_k = F_\delta + F_{Z_1} + F_{Z_2} + F_a + F_j = A.$$

Значення струму намагнічування у амперах:

$$I_{\mu} = p \cdot F_k / 0,9 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{об1} = A.$$

Значення струму намагнічування у відносних одиницях: $I_{\mu*} = I_{\mu} / I_{ном}$

Перевірити, чи відповідає отримане значення струму холостого ходу двигуну відповідної потужності.

Відповідно до рекомендацій, вказаних у методичці, прийняти значення густини струму у провідниках обмотки статора

$$j_1 = A / \text{мм}^2.$$

Розрахувати перетин ефективного витка, визначений за густиною струму:

$$q_{\text{эф}} = I_{1н} / (a_1 \cdot j_1) = \text{мм}^2.$$

Перетин ефективного витка, розрахований через розмір паза:

$$q_{\text{эф}} = k_m \cdot S_{п.св} / U_{п1} = \text{мм}^2.$$

де k_m – коефіцієнт заповнення паза міддю, $S_{п.св}$ – площа паза в світлі, мм^2

Якщо відхилення між площами ефективного витка за двома методами є несуттєвим, то це вказує на правильність проведених розрахунків. Якщо число елементарних провідників в одному ефективному дорівнює одиниці, то діаметр обмотувального проводу без ізоляції вибираємо з таблиці Додатку А.

$$d_{\Gamma} = 1,13 \cdot \sqrt{q_{\text{эф}}} = \text{мм}.$$

Якщо відсутній провід такого діаметру можна взяти два або три проводи в паралель, площа яких в сумі дає розраховану площу ефективного провідника.

Якщо на табличці двигуна не було вказано номінальну потужність, ККД, коефіцієнт потужності, то їх можна прийняти з прототипу.

Повна (поточна) потужність, кВА:

$$S = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot 10^{-3} = \text{кВА}.$$

Корисна потужність (на валу), кВт: $P_2 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3} = 1,099 \text{ кВт}$

Також потужність двигуна можна розрахувати при відомих значеннях фазної напруги, розрахованого значення фазного струму та значення η та $\cos \varphi$, вказаних в навчальному посібнику для певних значень потужностей асинхронних двигунів.

Необхідно співставити розрахункове значення потужності з табличними значеннями потужності. Якщо відхилення є несуттєвим, то це вказує на правильність проведених розрахунків.

На цьому перевіірочний розрахунок обмотки статора можна вважати завершеним. Усі необхідні значення та дані для того щоб скласти схему обмотки та у подальшому приступити до виготовлення обмотки знайдено.

Питання до самоконтролю

1. З якою метою після видалення обмотки необхідно видалити з пазів залишки ізоляції?
2. З якою метою розпушені жерсті додатково пресують ударами молотка через дерев'яні чурки?
3. З якою метою в разі порушення положення жерстей одна відносно іншої внаслідок послаблення пресування осердя виступаючі жерсті запилують надфілем?
4. Навіщо при вимірювання довжини осердя статора і ротора металеву лінійку прикладають по дну пазу?
5. Як вимірюють розміри і площу пазів?
6. Як впливає величина повітряного проміжку на величину струму неробочого ходу?
7. Яким вимогам повинна відповідати пазова ізоляція електричної машини?
8. Яке при призначення мають манжети на пазовій ізоляції обмотки статора?
9. Як повинна вирізуватися заготівля коробочки з електрокар тону?
10. З яких міркувань вибирають ту чи іншу схему обмоток статора асинхронної машини?
11. Наведіть основні критерії, які впливають на розрахунок числа ефективних провідників в пазу?
12. Наведіть основні критерії, які впливають на розрахунок кількості витків у фазі обмотки статора?
13. Які основні фактори впливають на величину струму холостого ходу? Як можна зменшити величину струму холостого ходу?

5.3 Лабораторна робота № 3

Виготовлення та укладання обмотки в пази статора асинхронного двигуна та з'єднання схеми обмотки (2 + 2 год)

Мета лабораторної роботи - поглибити знання з дисципліни «Технологія виробництва електричних машин», набути уміння і практичні навички по технології виготовлення всипних обмоток та їх укладання в пази магнітопроводу асинхронних двигунів, з'єднання схеми обмотки та бандажування лобових частин.

ПРОГРАМА ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Поставлена мета досягається виконанням наступної програми робіт:

1. Отримання інструктажу з техніки безпеки при проведенні робіт і правилам користування інструментом обмотувальника та приладами для з'єднання схеми обмотки.

2. Детальне ознайомлення з технологією виготовлення та укладання обмоток в пази на реальному двигуні і віртуальній моделі, створеній на кафедрі електромеханіки.

1. Технологія виконання обмотки статора.

3.1 Підготовчі роботи.

3.2 Розрахунок довжини витка

3.3 Пробний виток

3.4 Вибір шаблону, підготовка намотувального верстату.

4. Укладання катушок в пази.

(2 години)

5. З'єднання схеми обмотки і формування лобових частин обмотки, приєднання вивідних кабелів.

6. Ув'язування (бандажування) лобових частин.

(2 години)

По вказівці викладача в програму робіт можуть бути внесені зміни з урахуванням інтересу студента і конкретних обставин.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Перед виконанням обмотувальних робіт перевіряють стан статора (відсутність розколин на станині, відсутність виступаючих пластин в шліці і усередині пазу, чистота пазу і т.і.), стан інструменту обмотувальника.

У роботі застосовують як звичайний слюсарний інструмент (гайкові ключі, молоток, ніж, ножиці, напилек, кусачки і ін.), так і спеціальний інструмент (рис. 1). Топірець (рис. 1 а) (гладилка) служить для ущільнення проводів в пазу в процесі укладання, проводка (рис. 1 б) – для придання паралельності укладеним проводам, дротяний гачок (рис. 1 в) – для протягання панчохи при бандажуванні лобових частин обмотки. При формуванні лобових частин застосовують гумові молотки, колодки і прокладки (рис. 1 г), д).

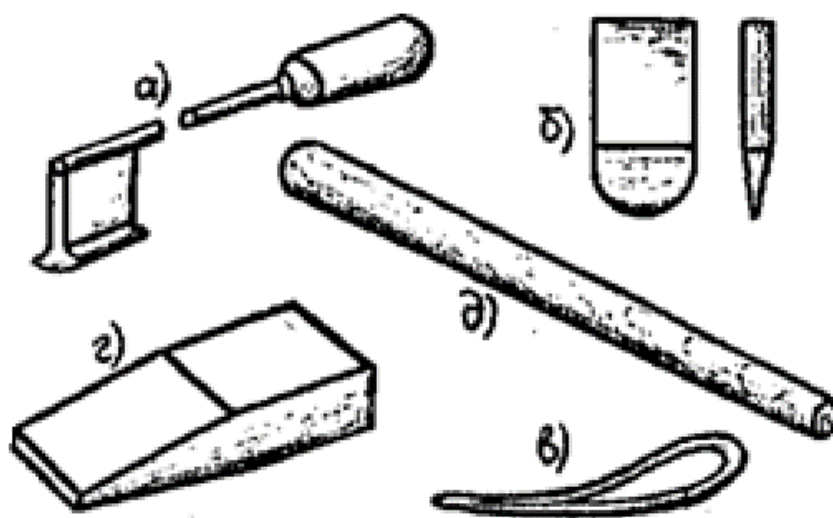


Рис. 1. Спеціальний інструмент для проведення обмотувальних робіт

Якість інструменту багато в чому визначає якість обмотувальних робіт. Робочі частини топірців, проводок, колодок, дотичних з обмоткою, не повинні мати гострих кутів і забоїв. На робочому місці не повинно бути нічого зайвого. Ротор, підшипникові щити і болти (шпильки, гайки) повинні знаходитися на стелажі.

Розрахунок довжини витка

Визначення середньої довжини витка котушки.

Середня довжина витка: $l_v = 2(l_d + l_l)$

Довжина лобової частини витка: $l_l = A\tau_y + B$

Середня ширина котушки (крок): $\tau_y = t_z y$

де зубцевий крок

$$t_z = \frac{\pi(D_1 + h_z)}{z}$$

де h_z - висота паза.

Коефіцієнт A для одношарової обмотки $A = 1,4$. Для двошарової обмотки вибирають з табл. 1.

Таблиця 1

$2p$	2	4	6	8
A	1,3	1,35	1,45	1,55

Прямолінійний виліт лобової частини обмотки з урахуванням пазової ізоляції з манжетами приймаємо рівним 10...15мм, а для всього витка $B = 20...30$ мм. Потрібно враховувати, що занижений розмір котушок створить труднощі при їх укладанні в статор, а завищений – спричинить за собою великий виліт лобових частин, що призведе до перевитрати міді і пошкодженню обмотки при надяганні підшипникових щитів. Правильність розрахунку перевіряється надалі при виготовленні пробного витка і пробної котушки.

Пробний виток виготовляють з відрізка проводу. Для концентричної обмотки виток виготовляють для меншої котушки. Пробний виток укладають в пази з кроком обмотки. Лобові частини витка з обох боків повинні бути однаковими. Відгинаються лобові частини по осі паза (рис. 2) з урахуванням довжини прямолінійного вильоту лобової частини. Лобова частина витка повинна знаходитися приблизно в середній частині спинки статора. При необхідності коректується довжина пробного витка.

Ділянку паяння можна ізолювати шаром склотканини або шаром скляної смужки, при цьому кінці стрічки треба підклеїти.

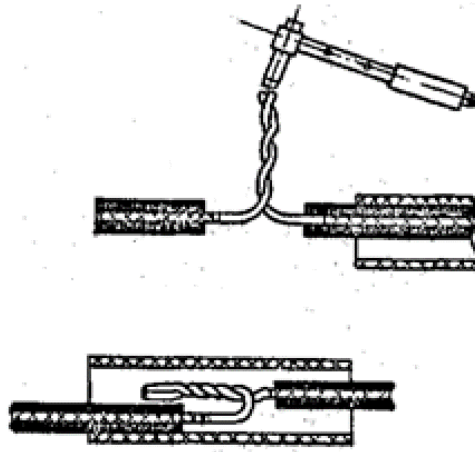


Рис. 2. Паяння і ізоляція проводів

Статор розташовують на робочому столі так, щоб отвори на станині для вивідних кінців знаходилися справа. Справа від статора розташовують котушкову групу, кінцями до статора. Верхню секцію (для концентричних обмоток – меншу) розгортають у вертикальній площині (рис. 3) і вводять в розточку пакету статора. Розв'язують кіперну стрічку однієї сторони котушки.

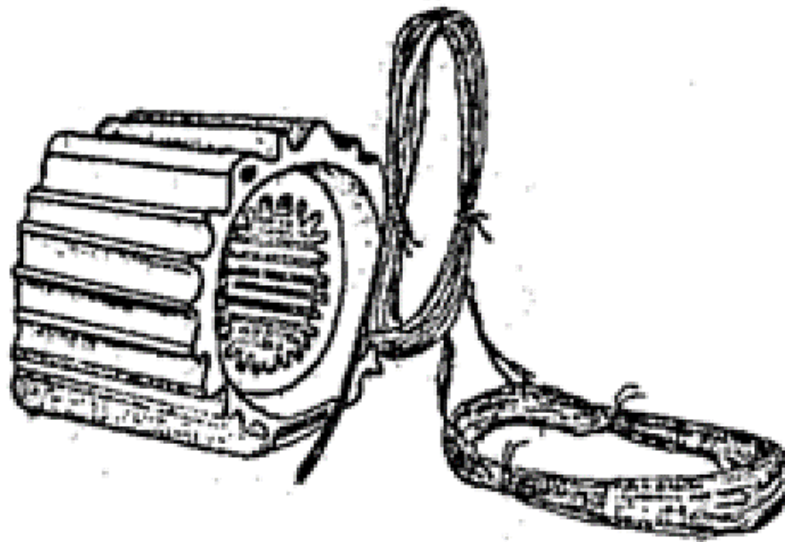


Рис. 3. Положення контрольної котушкової групи перед укладанням

Розпрямляють провідники котушки так, щоб вони знаходилися в одній площині, вводять їх в паз, починаючи з торця осердя (рис. 4). Щоб провідники в пазу не перехрещувалися, їх розпрямляють проводкою, якою проводять уздовж пазу.

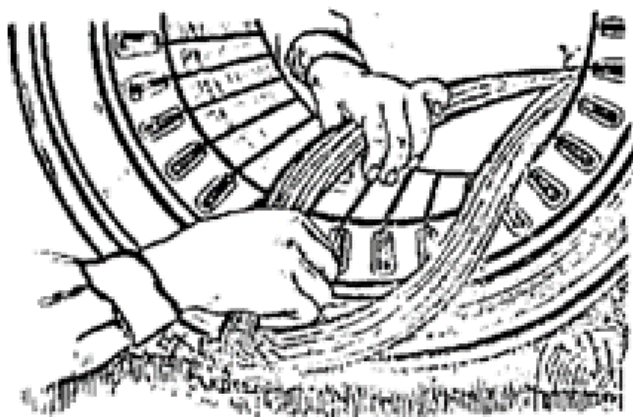


Рис. 4. Укладання провідників котушки в пазу

Після закінчення укладання сторони котушки одношарової обмотки укладають підклинову ізоляційну прокладку, ущільнюють провідники в пазу топірцем, заклинюють паз. Необхідно стежити за тим, щоб прокладка була укладена рівно, без перекосів і зсувів.

Пазові клини виготовляють з просушеної деревини твердих порід – буку, берези. Товщина клину залежить від форми верхньої частини паза і його заповнення, але не менше 2...3мм. На кінці клину роблять косий зріз (зверху донизу). Клин забивають молотком, обрізають так, щоб кінці клину виступали за пакет статора на 3...5мм з кожної сторони.

Друга сторона котушки укладається аналогічно першій. Потрібно звернути увагу на виконання розрахункового кроку обмотки і однакових розмірів лобових частин котушки.

Проводять формування лобових частин котушки. Лобові частини формують руками, гумовим молотком так, щоб повністю відкрити доступ до вільних пазів, що знаходяться усередині котушки. Треба забезпечити плавний вигин лобових частин обмотки в місцях виходу катушок з паза (на $5...8^\circ$ у бік зовнішнього діаметру статора).

Укладають решту катушок катушкової групи. Потрібно стежити, щоб великі катушки концентричної обмотки надягали на менші, а не лягали на них зверху.

При укладанні двошарових обмоток одну сторону катушок закладають вниз

пазів, а іншу – вверху, але в них ще немає нижнього шару, тому інші сторони не укладають, а залишають біля пазів. Число таких котушок буде рівне кроку обмотки по пазах. Наступні котушки укладають однією стороною вниз, а інший – вверху пазу. Після того, як будуть укладені всі котушки, закладають верхні сторони перших котушок. Це місце в обмотках називають замком. Вірогідність пошкодження ізоляції проводу або паза в цьому місці найбільша, тому особливо уважно необхідно проводити укладання.

Під час укладання котушок встановлюють в лобових частинах прокладки (рис. 5), які ізолюють фази між собою.

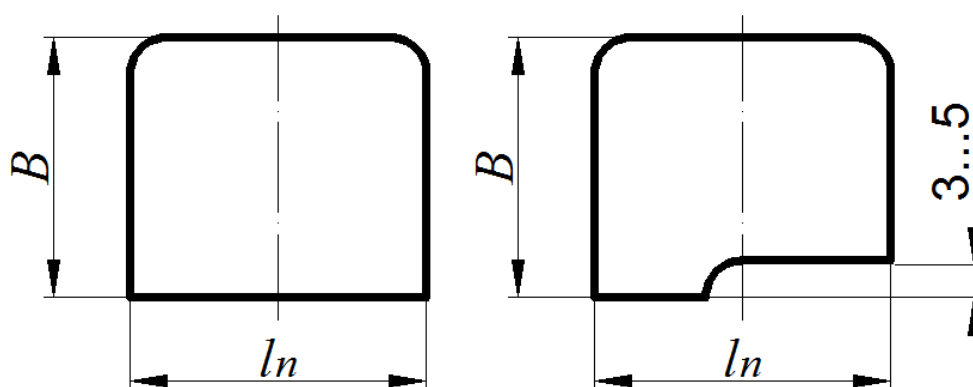


Рис. 5. Міжфазні прокладки лобових частин: а) для двошарової обмотки; б) для одношарової обмотки

Довжина прокладки $l_n = \tau_y + 15$. Розмір B повинен бути на 7...10мм більше вильоту лобової частини обмотки. Прокладки вирізують з електрокартону або кабельного паперу завтовшки 0,1...0,3мм. Положення прокладок в лобовій частині показано на рис. 6.

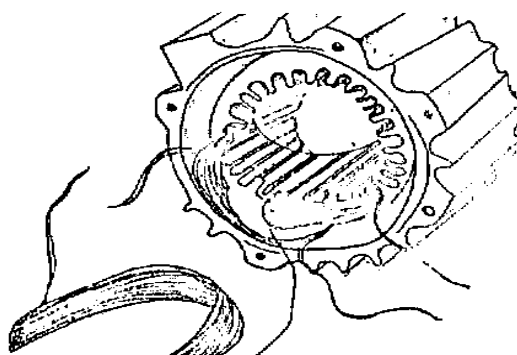


Рис. 6. Положення міжфазної прокладки в лобовій частині обмотки

Для полегшення збирання схеми допускається маркування виводів котушкових груп. Картонні бірки прив'язують до вивідних проводів нитками.

Після роздільного укладання обмоток лобові частини виходять спотвореними, зігнутими всередину осердя. Згідно вимогам конструкції електричних машин, лобові частини повинні розташовуватися концентрично з колом осердя і відповідати розмірам порожнин, що відводяться для них, усередині машини. Лобові частини формують руками і за допомогою гумових молотків.

Для збирання схеми розпрямляють і відрізають виводи котушкових груп, залишивши кінці такої довжини, щоб після збирання схеми сполучені проводи вільно уклалися на торцевій стороні лобових частин обмотки.

Готують вивідні кабелі з гнучкого проводу. Для виводів обмотки допускається використання кінців і початків фаз обмотки, які повинні бути ізольовані ізоляційною трубкою і виведені на вивідний щиток. За відсутності вивідного щитка використання обмотувального проводу для виводів обмотки не допускається, оскільки може відбутися обрив проводу.

Зачищають ізоляцію з кінців виводів котушкових груп і вивідних кабелів на довжину 35...40мм. Надягають на кожний вивід котушкової групи ізоляційні трубки. Сполучають скруткою кінці виводів котушкових груп і вивідних кабелів згідно схеми обмотки (рис. 7).

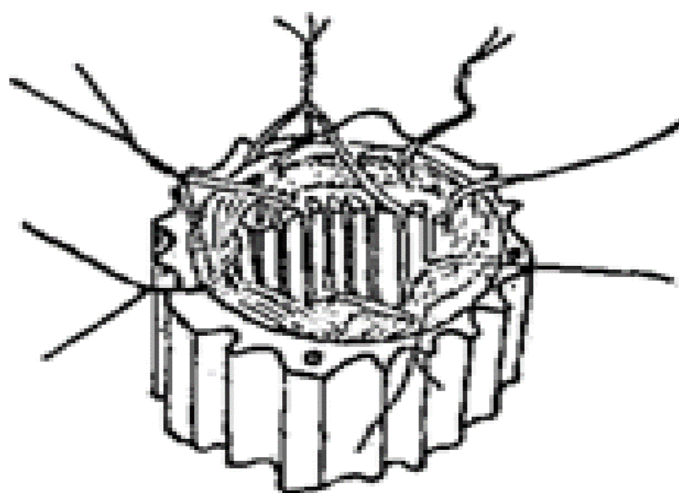


Рис. 7. Збирання схеми обмотки

Довжина ділянки скручування повинна бути не менше 20мм. Вивідні кінці обмотки маркуються.

Спочатку проводять ув'язку (бандажування) лобових частин обмотки з тієї сторони, на якій немає вивідних кінців. По мірі ув'язки проводиться коректування положення міжфазних прокладок. Ув'язку проводять за допомогою мідного гачка (рис. 8) спеціальною віскозною або капроною ниткою, кіперною, тафтяною або скляною стрічкою.

Кінець нитки закріплюють вузлом, довжина вільного кінця 40...50мм. Це треба для закріплення другого кінця нитки після обходу всієї лобової частини обмотки. Витки бандажу розташовують через один паз. Обмотку стягують щільно, з достатньо великим зусиллям. Ув'язка повинна забезпечити жорсткість лобової частини. При потребі обмотку підбивають гумовим молотком.

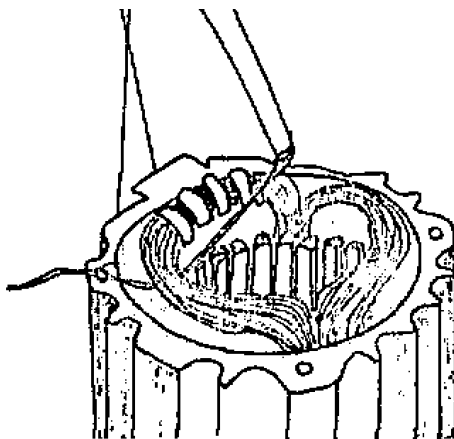


Рис. 8. Кріплення лобових частин (бандажування)

Після ув'язки гумовим молотком і облямовуванням остаточно формують лобову частину обмотки, перевіряють її розміри (виліт, внутрішній і зовнішній діаметри).

Сполучні проводи і вивідні кабелі при ув'язці розміщують на торцевій частині обмотки, уникаючи потовщення лобових частин. Остаточний вигляд обмотаного осердя має вигляд (Рис. 9).

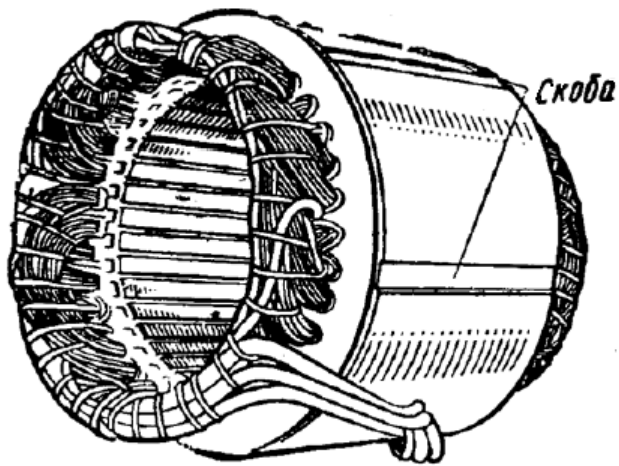


Рис. 9. Обмотане осердя статора

Питання до самоконтролю

1. Які інструменти застосовують при проведенні обмотувально-ізолювальних робіт?
2. Як розраховують середню довжину витка?
3. На що впливає занижений розмір котушок обмотки?
4. На що впливає завищений розмір котушок обмотки?
5. Як розраховують довжину пробного витка котушки обмотки?
6. Як правильно вибрати шаблон для виготовлення котушок обмотки?
7. Як відбувається процес вкладання одношарової обмотки в пази?
8. Як відбувається процес вкладання двошарової обмотки в пази?
9. З якого матеріалу виготовляють пазові клини?
10. Як відбувається процес з'єднання схеми обмотки?
11. Як відбувається процес формування лобових частин обмотки?
12. Як відбувається процес бандажування лобових частин обмотки?

5.4 Лабораторна робота № 4

Складання та випробування асинхронного двигуна (2 + 2 год)

Мета лабораторної роботи - поглибити знання з дисципліни «Технологія виробництва електричних машин», набути уміння і практичні навички по складанню електричних машин та післяремонтним випробуванням асинхронних двигунів.

ПРОГРАМА ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Поставлена мета досягається виконанням наступної програми робіт:

1. Отримання інструктажу по техніці безпеки при проведенні робіт і правилам користування робочим інструментом і приладами для проведення післяремонтних випробувань асинхронного двигуна.

2. Визначення технічного стану обмоток після ремонту та збирання асинхронного двигуна.

2.1 Перевірка правильності з'єднання схеми обмотки та наявності обертового магнітного поля.

2.2 Вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками за допомогою мегаомметра.

2.3 Вимірювання опору обмоток при постійному струмі.

2.4 Збирання двигуна за допомогою слюсарних інструментів.

(2 години)

3. Випробування асинхронного двигуна.

3.1 Обкатка електродвигуна в режимі холостого ходу.

3.2 Визначення струму та втрат при роботі асинхронного двигуна в режимі холостого ходу.

3.3 Визначення струму та втрат при роботі асинхронного двигуна в режимі короткого замикання.

(2 години)

За вказівкою викладача в програму робіт можуть бути внесені зміни з урахуванням інтересу студентів і конкретних обставин.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Для визначення маркування вивідних кінців обмотки статора існує декілька способів. Деякі з них розглянемо. Довільно маркуємо вивідні кінці обмотки статора (рис. 1). Потім підключаємо обмотку статора до низьковольтного джерела змінної напруги. При цьому можливі 4 варіанти умовних позначень і підключення фаз обмотки статора. Якщо після кожного підключення двигуна до джерела спостерігається сильне гудіння низького тону, це означає, що одна з фаз обмотки статора перевернута. Методом послідовного перебору підключення фаз обмотки статора можна добитися нормальної роботи двигуна. Метод достатньо трудомісткий і може бути застосований в разі відсутності спеціального обладнання.

1 спосіб

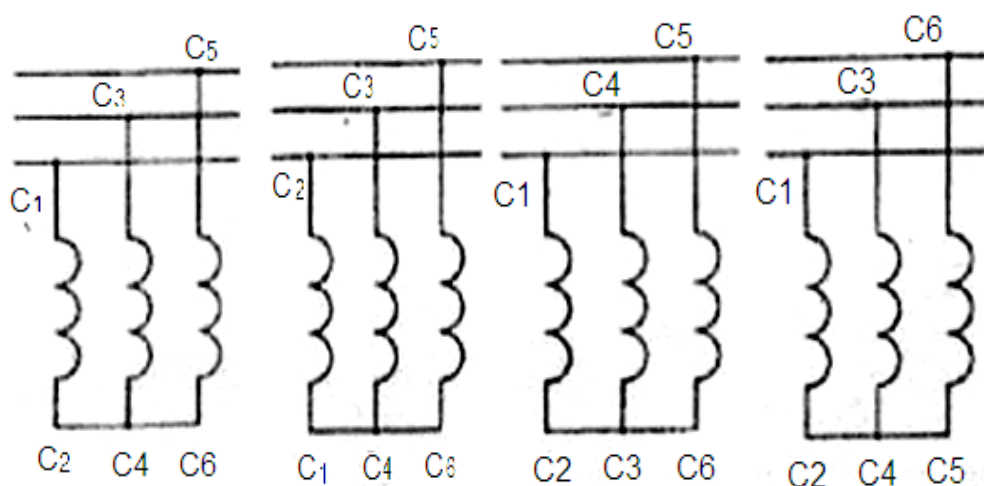


Рис. 1. Способи маркування

2 спосіб

Довільно маркуємо вивідні кінці обмотки статора. Послідовно сполучаємо дві будь-які фази (на рис. 2 представлені 2 випадки підключення фаз до низьковольтного джерела). До третьої вільної фази підключаємо вольтметр. Подавши понижену напругу на обмотку статора, за допомогою вольтметра вимірюємо величину напруги.

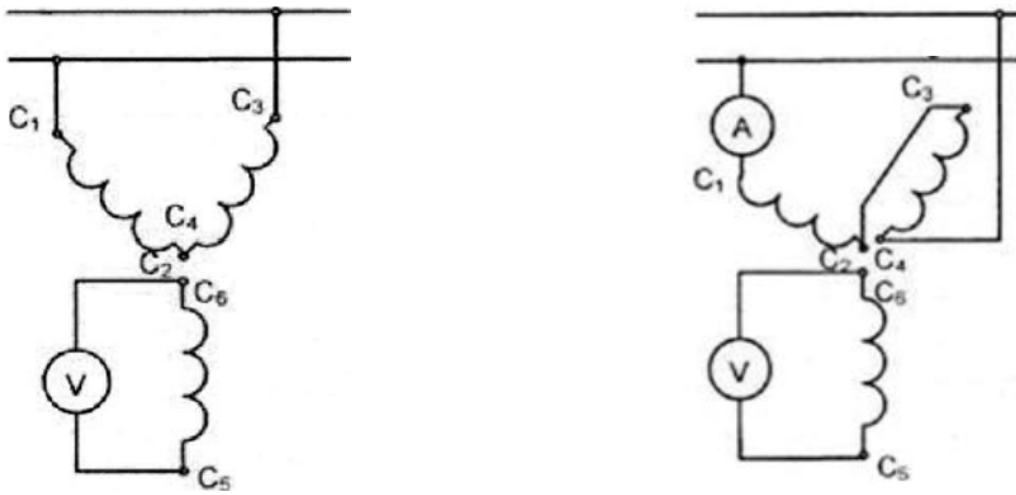


Рис. 2. Підключення фаз до низьковольтного джерела

Може бути 2 випадки: якщо вольтметр покаже напругу, яка приблизно дорівнює напрузі джерела, то при маркіруванні поплутані початки і кінці однієї із фаз обмотки; якщо вольтметр покаже напругу, близьку до нуля, то маркування початків і кінців фаз правильне. Слід мати на увазі, що подання на обмотку непрацюючого двигуна великої напруги може викликати великий струм в обмотках. Тому подавати напругу слід плавно, поступово підвищуючи її до величини, при якій струм в обмотках не буде перевищувати 20-30 % від номінального.

3 спосіб

Довільно маркуємо вивідні кінці фаз обмотки статора (рис. 3): початок Н і кінець К. До однієї з обмоток підключаємо джерело постійного струму через рубильник Р. До іншої вільної фази, також довільно маркірованої, підключаємо мілівольтметр. При цьому, при розмиканні рубильника Р на іншій фазі, до якої підключений мілівольтметр, "плюс" покаже початок фази, а "мінус" – кінець фази.

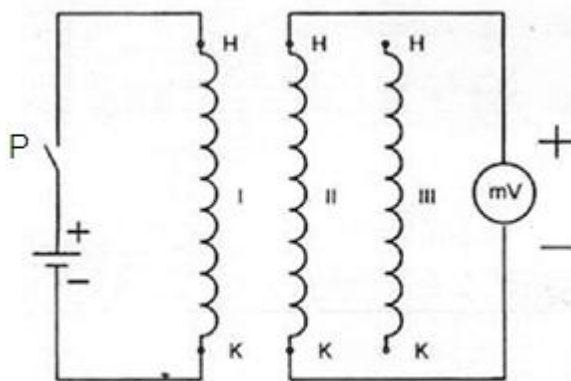


Рис. 3. Маркування вивідних кінців фаз обмотки статора

При замиканні Р на вольтметрі буде полярність, зворотна вказаній. При цьому способі треба пам'ятати: мілівольтметр має бути магнітоелектричної системи. Недолік способу: його складно використати з цифровими мультиметрами в зв'язку з їх низької швидкодії.

4 спосіб

Його можна застосувати, якщо виведені 3 вивідні кінці обмотки статора, тобто обмотка статора сполучена в зірку або трикутник. В цьому випадку (рис. 4 а), б) до низьковольтного двофазного джерела (індукційного регулятора) підключені дві фази, а третя (вільна фаза) також підключена через вольтметр. При цьому за допомогою вольтметра вимірюють напругу між третьою фазою з вольтметром і двома фазами, які підключені до джерела. У разі правильного підключення ця напруга має дорівнювати половині величини напруги, яка прикладена до двох фаз. При чому ці співвідношення напруги зберігаються при живленні будь-яких двох виведень. Дослід проводять три рази, кожного разу подаючи напругу до різної пари виводів. Якщо одна з фаз виявляється приєднана невірно, то при двох дослідів з трьох напруга між третім виводом і кожним з двох інших буде неоднакова.

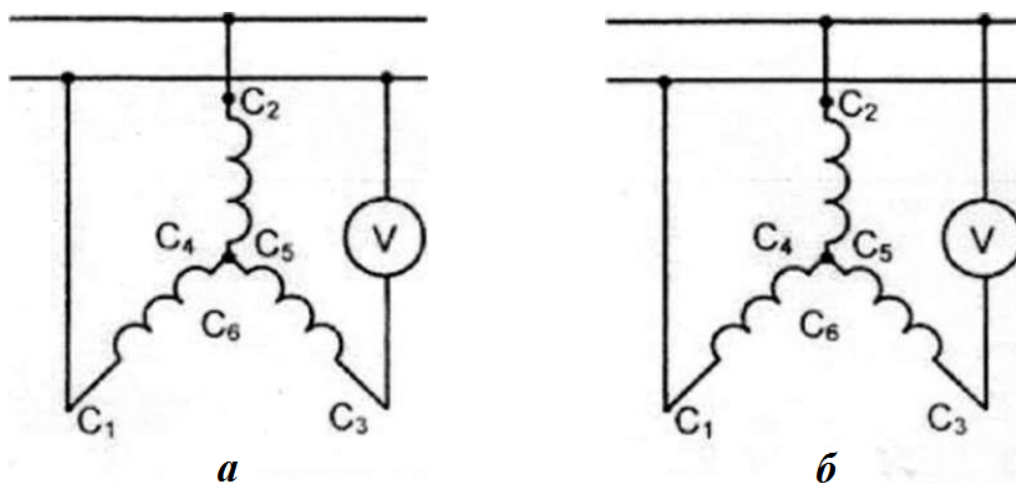


Рис. 4

Цей спосіб треба проводити для асинхронних двигунів короткозамкненим ротором при напрузі $1/5-1/6$ від номінальної напруги, щоб уникнути перегрівання обмоток.

Для фазних роторів обмотка ротора має бути розімкнена.

Слід мати на увазі, що подання номінальної напруги мережі на обмотку статора не працюючого двигуна може викликати великий струм в обмотках.

При проведенні лабораторної роботи були випробувані 1 та 4 способи перевірки маркування фаз обмоток. Обидва методи показали їх простоту та дієвість.

Після перевірки правильності маркування всіх фаз обмоток перевіряють наявність обертового магнітного поля. Обмотку статора, з'єднану в трикутник або зірку підключають до джерела низьковольтної трифазної напруги 24-36 В (до індукційного регулятора). В росточку статора вводять пластиковий стрижень від кулькової ручки, на який насаджена тонка бритва для гоління. Обводячи бритвою вздовж окружності росточки статора на невеликій відстані від поверхні, спостерігають за обертанням бритви. Якщо схема обмотки з'єднана правильно, то під дією обертового магнітного поля бритва буде обертатися рівномірно в одну сторону. При неправильній схемі з'єднання обмотки швидкість та напрямок руху бритви буде змінюватись. При наявності в обмотці короткозамкнених витків бритва у відповідному місці буде зупинятись.

Вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками за допомогою мегаомметра.

Для проведення цього контролю заздалегідь відмикають всі кінці двигуна від вивідної колодки. В трифазних електричних машинах з шістьма виводами обмоток стан корпусної і міжфазної ізоляції кожної фази обмотки визначають при заземлених двох інших фазах. При цьому опір ізоляції визначається двома складовими: опором ізоляції фази на заземлений корпус і опором ізоляції між вимірюваною обмоткою і обмотками заземлених фаз. Опори ізоляції кожної фази відносно корпусу при заземлених інших двох фазах для відремонтованого асинхронного двигуна наведений в табл. 1.

Результати вимірювань, виконані на відремонтованому лабораторному асинхронному двигуні

C1 – C4 , МОм	C2 – C5 , МОм	C3 – C6 , МОм

Опір ізоляції при робочій температурі по (3.1)

$$R_{iz} = \frac{380}{(1000 + 0,01 \cdot 1,1)} = XMO_M$$

Для класу нагрівостійкості ізоляції обмотки **F** робоча температура $\theta_{роб} = 115^\circ C$

Значення коефіцієнта h :

$$h = \frac{(115 - 24)}{20} = 4,55 \approx 5$$

Мінімальний опір ізоляції при температурі $\theta = 24^\circ C$ по (3.2) повинен бути не менше:

$$R_{из\theta} = MO_M$$

Оскільки виміряне значення опору ізоляції ($X MO_M$) ,більше мінімально припустимого при температурі $\theta = 24^\circ C$ ($R_{из\theta} = XMO_M$), то експлуатація двигуна можлива.

Вимірювання активного опору обмоток – контрольна операція, яку виконують при заміні обмоток при ремонті. Ціль операції – виявлення недоліків в з'єднанні схеми обмотки, порушень контактів в з'єднанні котушок, виявленні нерівності кількості чисел витків в фазах.

Вимірювання опорів найчастіше виконують методом амперметра – вольтметра або мостом (одинарним або подвійним). на постійному струмі. При вимірюванні методом амперметра-вольтметра прилади повинні мати клас точності не нижче 0,5. Обмотку підключають до низьковольтного джерела постійного струму і вимірюють падіння напруги на обмотці. Опір розраховують за формулою закону Ома: $R = U / I$. Для виключення опорів з'єднувальних

провідників падіння напруги вимірюють безпосередньо на обмотці. Дані вимірювань та розрахунків наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Фаза C1 – C4		Фаза C2 – C5		Фаза C3 – C6	
U, В	I, А	U, В	I, А	U, В	I, А
$R_{c1-c4} = \text{Ом}$		$R_{c2-c5} = \text{Ом}$		$R_{c3-c6} = \text{Ом}$	

При вимірюванні опорів обмоток методами вольтметра- амперметра або подвійного моста щоб уникнути нагріву обмоток слід приймати величину струму 15...20% номінального, а тривалість вимірювання – менше хвилини.

Слід зазначити, що внаслідок нерівномірності перізу обмотувальних проводів, внаслідок різної якості міжкатушкових контактних з'єднань результати вимірювань опорів фаз ніколи не бувають однакові. Результати вважають задовільними, якщо різниця окремих вимірювань не перебільшує 5% від їх середнього значення.

Перевіряючи наявність комплекту складальних одиниць і їх стан, приступають до збирання. Збирання ведуть обережно, звертаючи увагу на те, щоб не пошкодити лобову частину обмотки. Перевіряють відстань лобових частин обмотки від металевих частин корпусу. Підшипникові щити повинні з достатнім натягом сідати на центруючі заточування статора. Посадка їх на місце досягається рівномірною підтяжкою болтів, що кріплять щити до станини. Для здійснення посадки допускаються удари молотком по приливах на щиті. Проте, тут потрібна обережність, щоб не пошкодити посадочні місця. Удару слід завдавати навхрест, щоб забезпечити пресування без перекосів.

Перевіряють обертання ротора від руки. Ротор повинен обертатися вільно, без торкань. Туге обертання ротора вказує на перекіс підшипників або підшипникових щитів, на тертя ротора об статор, вентилятора об корпус або на наявність сторонніх предметів в машині.

В разі чіплення ротора за статор відпустити болти на підшипникових щитах

і легкими постукуваннями по підшипниковому щиту добитися легкого обертання вала ротора. Почергово затягнути болти на підшипниковому щиті.

Після ремонту виконують обкатку та приймально-здавальні випробування асинхронного двигуна, відповідно до норм, наведених в Правилах технічної експлуатації електроустановок [5].

Перед початком випробувань електродвигун повинен пройти обкатку – пропрацювати без навантаження впродовж часу, необхідного для встановлення сталого теплового стану електродвигуна. Для двигунів з підшипниками кочення цей час повинен бути для двигунів при потужності електродвигуна:

До 1 КВт5 хвилин

1 – 10 КВт15 хвилин

10-100 КВт30 хвилин

Для наявного двигуна 1,1 КВт, який був відремонтований під час виконання лабораторної роботи, час обкатки склав 10 хвилин. За час роботи без навантаження шумів, вібрацій, перегріву та інших аномалій в роботі двигуна не спостерігалось.

Для зняття характеристики неробочого ходу двигун підключають через вимірювальний прилад (електронний мультиметр) до регульованого джерела живлення: потенціал-регулятора або регульованому трифазному трансформатору.

Перед подачею напруги на двигун треба переконатися, що рукоятка регулятора напруги встановлена в нульове положення. Після вмикання схеми плавно підвищують напругу і слідкують за показаннями приладів і поведінкою двигуна. Якщо при напрузі $0,3U_n$ двигун почне обертатися з практично номінальною частотою, без стукоту, деренчання, шерехів і рівномірному гудінні, з симетричними по фазах струмами, то знімають характеристику неробочого ходу, заміряють частоту обертання при номінальній розрахунковій напрузі.

Якщо двигун при пониженій напрузі гуде, споживає великі несиметричні по фазах струми і не розганяється до номінальної частоти обертання, то його слід відключити від мережі. Подальше продовження роботи узгоджується з викладачем. Дані неробочого ходу порівнюють з подібними даними стандартного

електродвигуна. По струму і втратам неробочого ходу роблять висновок про придатність електродвигуна.

Допустимі величини струму неробочого ходу у відсотках від номінального залежно від потужності і полюсності електродвигуна приведені в табл. 3.

Таблиця 3

Потужність електродвигуна, кВт	Число пар полюсів				
	2	4	6	8	10
0,1 - 0,5	60	75	85	90	-
0,51 - 1,0	50	70	75	80	90
1,1 – 5,0	45	65	70	75	85
5,1 - 10	40	60	65	70	80
10,1 - 25	30	55	60	65	75
25,1 - 50	20	5,0	55	60	70
50,1 - 100	-	40	45	50	60

Нерівномірність струму неробочого ходу по фазах допускається не більше $\pm 5\%$ від середньої величини. Збільшення струму і втрат неробочого ходу може бути викликано зменшенням числа витків в обмотці статора.

Дані вимірювань при живленні від джерела трифазного змінного струму наведені в табл. 4. Вимірювання параметрів холостого ходу виконано за допомогою електронного мультиметра, розробленого та виготовленого на кафедрі електромеханіки.

Таблиця 4

Фаза С1			Фаза С2			Фаза С3		
U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт
220			220			220		

Середнє значення споживаного струму холостого ходу складає приблизно

X % від номінального струму АД, що повною мірою відповідає (не відповідає) нормативній документації на двигун потужністю X КВт.

Сумарна споживана потужність складає близько X Вт, що також відповідає (або не відповідає) нормативній документації на двигун потужністю X КВт.

В досліді короткого замикання перевіряють стан паяних з'єднань та якість заливки короткозамкнених роторів асинхронних двигунів. Результати дослідження дозволяють розрахувати початковий пусковий струм та початковий обертовий момент, які є дуже важливими експлуатаційними параметрами.

Дослід короткого замикання (КЗ) виконують при загальмованому роторі. Обмотку статора підключають до низьковольтного джерела трифазної напруги (індукційного регулятора) і поступово підвищують напругу до величини, при якій в обмотці статора струми збільшуються до величини номінального струму. Слід мати на увазі, що при нерухомому роторі двигун не вентилюється і його обмотка сильно перегрівається. Тому всі вимірювання необхідно виконувати з максимальною швидкістю. Слід також звернути увагу на надійність гальмуючих пристроїв, оскільки вони піддаються значним механічним навантаженням. Дані вимірювань заносять в табл. 5.

Таблиця 5

Фаза С1			Фаза С2			Фаза С3		
U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт

Виміряні величини приблизно відповідають нормативній документації на асинхронний двигун потужністю X КВт.

Під час проведення дослідження короткого замикання при пониженої напрузі є можливим перевірити справність обмотки короткозамкненого ротора. Для роторів з литими короткозамкненими обмотками часто зустрічають недоліки лиття: пухирці, тріщини, обриви стрижнів, які неможливо виявити при зовнішньому огляді.

При підключенні обмотки статора до трифазного джерела, знижене

настільки, що ротор ще не обертається, а струм настільки малий, що не викликає помітного перегріву обмоток, ротор вручну повільно обертають та стежать за показами трьох амперметрів, підключених в фази обмотки статора. Якщо короткозамкнена обмотка ротора справна, то обертання ротора не викликає зміни показів амперметрів. При наявності дефектів в обмотці короткозамкненого ротора стрілки амперметрів почергово відхиляються тим сильніше, чим дефект литої обмотки більше.

Питання до самоконтролю

1. Як визначити маркування вивідних кінців обмоток?
2. Як перевірити наявність обертового магнітного поля, створюваного обмоткою статора?
3. Наведіть порядок вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками.
4. Який порядок перерахунку опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками на робочу температуру?
5. Як визначити недоліки в з'єднанні схеми обмотки, порушення контактів в з'єднанні котушок, нерівності кількості чисел витків в фазах?
6. Яка величина різниці вимірювань опорів фаз обмотки вважається прийнятною?
7. Наведіть порядок збирання асинхронного двигуна після ремонту. Чому не можна порушувати цей порядок?
8. З якою ціллю після збирання двигуна виконують його обкатку?
9. В яких межах допускається відхилення величини струму холостого ходу в асинхронних двигунах після ремонту?
10. В яких межах допускається нерівномірність струму х.х. по фазах?
11. Які недоліки ремонту дозволяє виявити дослід короткого замикання?
12. Які характеристики асинхронного двигуна можна розрахувати за результатами дослід короткого замикання?

Перелік посилань

1. ДСТУ 3008:2015 — «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання». – Український інститут науково-технічної і економічної інформації; Технічний комітет стандартизації «Інформація і документація» (ТК 144). – Прийнято на заміну на заміну ДСТУ 3008 -95. Набув чинності 1 липня 2017 р.
2. Трифазний асинхронний двигун загального призначення з короткозамкненим ротором: курсовий проект [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати» /КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.В. Чумак, М.О. Реуцький, С.С. Цивінський. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,35 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022 - 27 с.
3. Юхимчук В.Д., Технологія виробництва електричних машин: підручник/ В.Д.Юхимчук.-Харків: Тім Пабліш Груп, 2014. - 750с. табл., іл..
4. Чумак М.Г. Матеріали та технологія машинобудування: підручник / М.Г.Чумак. - К.: Либідь, 2000
5. Боженко Л. І. Технологія машинобудування: Проектування та виробництво заготовок. Підручник для студентів машинобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Львів: Світ, 1996.

ДОДАТКИ

Додаток А. Обмотувально-розрахункова карта

ОБМОТУВАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВА КАРТА

Тип електродвигуна		_____
Заводський номер		_____
Потужність	$P[\text{кВт}] =$	
Фазна напруга	$U[\text{В}] =$	
Фазний струм	$I[\text{А}] =$	
Число фаз	$m =$	
Число полюсів	$2p =$	
Частота обертання	$n[\text{об/хв}] =$	
Внутрішній діаметр розточки статора	$D_1[\text{мм}] =$	
і ротора	$D_2[\text{мм}] =$	
Зовнішній діаметр активної сталі статора	$D_a[\text{мм}] =$	
і ротора	$D_k[\text{мм}] =$	
Висота спинки статора	$h_a[\text{мм}] =$	
і ротора	$h_i[\text{мм}] =$	
Висота зубців статора	$h_{z1}[\text{мм}] =$	
і ротора	$h_{z2}[\text{мм}] =$	
Ширина зубців статора і вузької частини	$b_{z1}[\text{мм}] =$	
і ротора	$b_{z2}[\text{мм}] =$	
Ширина шліца	$b_{ш}[\text{мм}] =$	
Повна довжина активної сталі статора	$l_1[\text{мм}] =$	
і ротора	$l_2[\text{мм}] =$	
Число пазів статора	$z_1 =$	
і ротора	$z_2 =$	
Повітряний зазор між статором і ротором	$\delta[\text{мм}] =$	
Розміри паза в світлу	$S_{п.св}[\text{мм}^2] =$	
Вид обмотки		_____
Крок	$y =$	
Число паралельних гілок	$a =$	
Число активних провідників в пазу	$U_{п1} =$	
Число паралельних проводів	$n_{эл} =$	
Марка і діаметр проводу	$d/d_{из}[\text{мм}] =$	
Перетин проводу	$q_{эл}[\text{мм}^2] =$	

Додаток Б. Діаметри і розрахунковий перетин обмотувальних проводів

Номинальний діаметр голого проводу, мм	Перетин проводу, мм ²	Максимальний зовнішній діаметр проводу, мм					
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭС-2	ПЭТ-155	ПЭТ ІМІД ПНЭТ ІМІД	ПЭФ-155
0,2	0,0314	0,23	0,24	0,24	0,24	0,23	-
0,224	0,0394	0,26	0,27	0,264	0,27	0,256	-
0,25	0,0491	0,29	0,3	0,3	0,3	0,284	-
0,28	0,0615	0,32	0,33	0,33	0,33	0,315	0,33
0,315	0,0779	0,355	0,365	0,364	0,365	0,352	0,37
0,355	0,099	0,395	0,415	0,414	0,405	0,395	0,41
0,4	0,1256	0,44	0,46	0,46	0,46	0,442	0,46
0,45	0,159	0,4	0,51	0,51	0,52	0,495	0,51
0,5	0,1963	0,55	0,57	0,568	0,57	0,54	0,56
0,56	0,2462	0,61	0,63	0,63	0,63	0,611	0,63
0,63	0,3116	0,68	0,7	0,7	0,71	0,684	0,7
0,71	0,3957	0,76	0,79	0,79	0,79	0,767	0,79
0,75	0,4416	0,81	0,84	0,83	0,83	0,809	0,83
0,8	0,503	0,86	0,89	0,88	0,89	0,861	0,88
0,85	0,5672	0,91	0,94	0,93	0,94	0,913	0,93
0,9	0,636	0,96	0,99	0,99	0,99	0,965	0,99
0,95	0,7085	1,01	1,04	1,04	1,04	1,017	1,04
1,0	0,785	1,07	1,09	1,09	1,09	1,068	1,09
1,06	0,882	1,13	1,16	1,15	1,16	1,13	1,15
1,12	0,985	1,19	1,22	1,21	1,22	1,192	1,21
1,18	1,093	1,26	1,28	1,27	1,28	1,254	1,27
1,25	1,227	1,33	1,35	1,35	1,35	1,325	1,35

Додаток В. СКЛАДАННЯ МОЖЛИВИХ ВАРІАНТІВ СХЕМ ОБМОТОК

Студени самостійно в рамках виконання Розрахунково-графічної роботи повинні представити принаймні два варіанти схем обмоток асинхронного двигуна лабораторної роботи, спираючись на матеріали, представлені в 2 розділі Навчального посібника.

В якості прикладу розглянемо дві можливі схеми обмотки статора АД

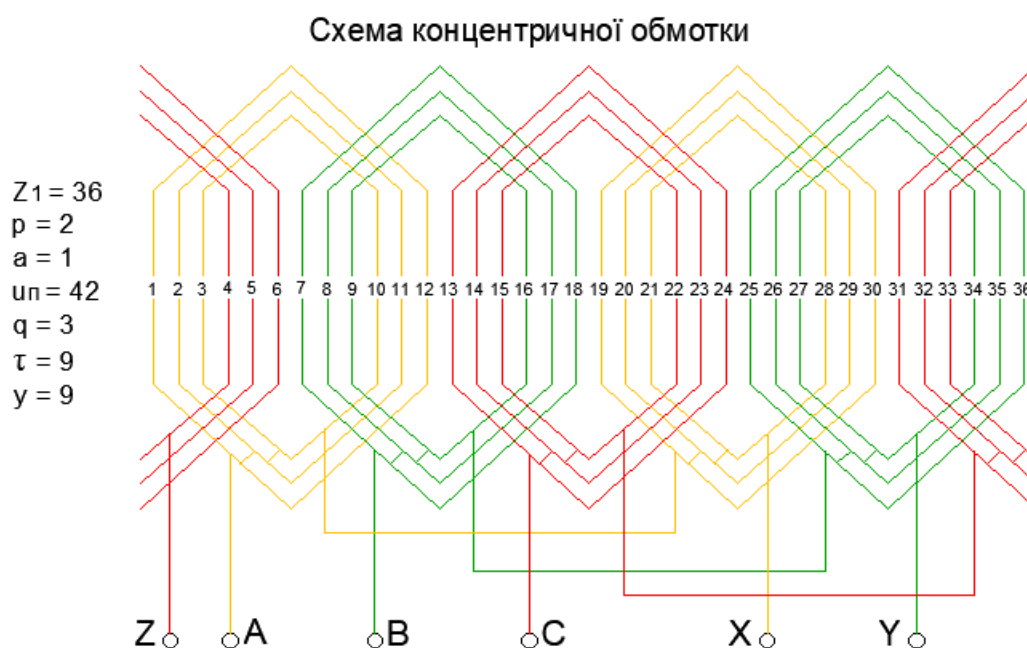


Рис. 1 Розгорнута схема одношарової концентричної обмотки для $Z = 36, 2p = 4$

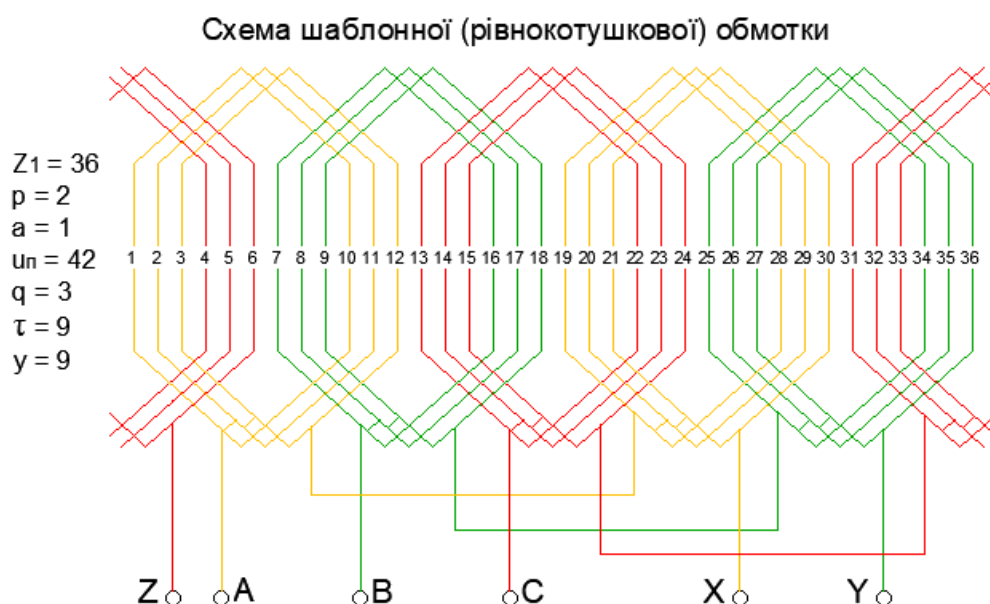


Рис. 2 Розгорнута схема одношарової шаблонної обмотки для $Z = 36, 2p = 4$