

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет



ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПРИСТРОЇ

Методичні вказівки до виконання лабораторних занять
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
галузі знань 14 Електрична інженерія
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2025

УДК 621.391(07)
Е50

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Наталія ПОЛЩУК

Рекомендовано до видання вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2025 року.

Голова вченої ради ФКІТ _____ Інна КОНДІУС

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2025 року.

Завідувач кафедри ЕіТК _____ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Укладач: _____ Віктор ЛИШУК к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Рецензент: _____ Микола ЄВСЮК к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Відповідальний за випуск: _____ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц., завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Е50 Електромеханічні пристрої. Методичні вказівки до виконання лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форм навчання / укладач В. В. Лишук. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 116 с.

Видання містить лабораторний практикум з дисципліни «Електромеханічні пристрої». Призначене для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

В. В. Лишук, 2025

Зміст

Передмова	ст. 4
Основні правила техніки безпеки	5
Лабораторна робота №1. Дослідження однофазного трансформатора	7
Лабораторна робота №2. Дослідження трифазного трансформатора	24
Лабораторна робота №3. Дослідження трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором.....	37
Лабораторна робота №4. Дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.....	50
Лабораторна робота №5. Підвищення коефіцієнта потужності споживачів електроенергії.....	62
Лабораторна робота №6. Дослідження трифазного явно полюсного синхронного генератора, що працює на автономне навантаження.....	68
Лабораторна робота №7. Дослідження генератора постійного струму паралельного збудження.....	81
Лабораторна робота №8. Дослідження двигуна постійного струму паралельного збудження.....	90
Лабораторна робота №9. Дослідження системи «Перетворювач частоти-асинхронний двигун-генератор постійного струму».....	104
Лабораторна робота №10. Дистанційне керування асинхронним двигуном.....	108
Список використаних джерел	114

Передмова

Зростання використання електричної енергії в усіх галузях людської діяльності призводить до зростання її виробництва. Це вимагає нарощення потужностей генераторів електростанцій та розвитку систем передачі та розподілу електроенергії, що призводить до вилучення значних земельних площ для спорудження електростанцій та електричних ліній. Останнє негативно впливає на довкілля: збільшуються шкідливі викиди, забруднюються водоймища тощо. Ось тому перед фахівцями-електроенергетиками постають проблеми зменшення негативного впливу електроенергетики на довкілля при одночасному забезпеченні комфортних умов життя людини.

Електрична енергія виробляється за допомогою генераторів, які перетворюють механічну енергію в електричну, встановлених на теплових або гідроелектростанціях. Підвищення чи зменшення напруги в лініях електропередач, яке необхідне для зменшення втрат або забезпечення необхідного рівня, що вимагає споживач, здійснюється за допомогою трансформаторів. Електричні двигуни постійного і змінного струмів перетворюють електричну енергію в механічну.

Теорія, конструкція, експлуатація генераторів, трансформаторів та електродвигунів вивчається в курсі «Електромеханічні пристрої». Вивчення даного курсу забезпечить можливість раціональної побудови та ощадної експлуатації електричних станцій, ліній електропередач і розподільчих мереж, а також сформує теоретичну базу для ощадного використання електроенергії споживачами та правильного використання електрообладнання.

Крім цього, знання, набуті при вивченні властивостей електричних машин і їх характеристик, є базою для подальшого вивчення багатьох фахових дисциплін.

Основні правила техніки безпеки

В лабораторії досліджуються електричні машини і трансформатори, які працюють при напругах до 230...380 В, що вимагає суворого дотримання основних правил техніки безпеки.

1. Студент може виконувати роботу тільки в складі бригади з трьох-чотирьох чоловік. Одному виконувати роботу не дозволяється.

2. Збирання і розбирання робочої схеми потрібно виконувати тільки при відключеній напрузі живлення. Живлення лабораторії здійснюється від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ через проміжний знижувальний трансформатор 0,4/0,23 кВ. Трифазна вихідна лінійна напруга 0,23 кВ цього трансформатора від головного розподільного щита подається на кожен лабораторний стіл через автоматичний вимикач (автомат) типу АК50К-3М.

На кожен стіл через автомат АК50К-3М підводиться постійна напруга 220 В, що знімається з регульованого трансформатора з рухомою короткозамкненою обмоткою через трифазний мостовий випрямляч. Живлення трансформатора здійснюється від головного розподільного щита лабораторії. Змінну напругу, регульовану за величиною, одержують за допомогою регульовального автотрансформатора або індукційного регулятора (поворотного автотрансформатора). Регульовану постійну напругу отримують від тих самих пристроїв, але через випрямлячі (трифазні або однофазні).

3. Електричні машини і трансформатори, які досліджують, розташовані під лабораторним столом або біля нього, а виводи початків і кінців всіх їхніх обмоток виводяться на передню панель столу. На вертикальній панелі столу розташовані щитові вимірювальні прилади та прилади керування навантажувальними пристроями, а на горизонтальній панелі – лабораторні прилади. Більш докладний опис конструкції лабораторних стендів подається в кожній лабораторній роботі.

Для кожної електричної схеми дослідів повинні бути підібрані вимірювальні прилади, навантажувальні і регулюючі пристрої, що відповідають номінальним величинам випробовуваних машин.

Подавати напругу живлення на схему після складання або будь-яких перез'єднань у ній дозволяється тільки після перевірки її викладачем або лаборантом. За наявності напруги на робочій схемі після вмикання автомата АК50К-3М над ним загоряються сигнальні лампи.

4. Студентам забороняється:

а) виконувати будь-які роботи на внутрішніх сторонах лабораторних стендів;

б) вмикати комутаційні апарати на головних розподільних щитах лабораторії;

в) переносити прилади, апарати і з'єднувальні провідники для складання схем з одного лабораторного стенда на інший;

г) торкатися до струмоведучих частин робочої установки, які знаходяться під напругою;

- д) торкатися до частин машин, що обертаються;
- е) залишати без догляду працюючу машину або схему, що знаходиться під напругою;
- є) залишати на машинах чи столах невикористані провідники;
- ж) доточувати провідники, які використовуються для складання схеми;
- з) виконувати роботи на машинах без кожухів, які закривають сполучні муфти й інші виступні обертові частини.

При аваріях у машині або в схемі, що супроводжуються швидким перегрівом машин, з'єднувальних провідників, реостатів, різким збільшенням частоти обертання (рознос двигуна) студенти зобов'язані негайно зняти напругу з робочої схеми, вимкнувши автомат живлення на лабораторному столі і повідомити про аварію викладачеві.

5. У випадку ураження кого-небудь із працюючих електричним струмом необхідно звільнити його від контакту із джерелом струму, негайно приступити до надання першої допомоги потерпілому і викликати швидку допомогу.

Студенти допускаються до виконання лабораторних робіт тільки після ознайомлення з даними правилами і підпису у відповідному журналі. При порушенні правил техніки безпеки студентів усувають від роботи і допускають до неї тільки з дозволу завідувача кафедри після повторного інструктажу. При повторному порушенні правил студент не допускається до подальшої роботи в лабораторії.

Лабораторна робота №1

Дослідження однофазного трансформатора

Мета роботи: ознайомлення з будовою і принципом роботи однофазного трансформатора; дослідження його шляхом проведення дослідів холостого ходу і короткого замикання; визначення за даними дослідів параметрів заступної схеми.

Основні теоретичні положення

Трансформатором називають статичний індуктивний перетворювач, що має дві або більше індуктивно зв'язаних взаємно нерухомих обмоток і призначений для перетворення за допомогою магнітного поля однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну), що має інші характеристики, зокрема, напругу та струм. У більшості випадків за допомогою трансформатора перетворюють тільки напругу та струм без зміни частоти і числа фаз.

Трансформатор, що має дві електрично незв'язані між собою обмотки, називають двообмотковим. Обмотку, яка споживає енергію з електричної мережі, називають первинною, а обмотку, що віддає енергію споживачу – вторинною. Існують багатообмоткові трансформатори, які мають декілька первинних і вторинних обмоток.

Якщо первинна обмотка має вищу напругу (ВН), а вторинна – нижчу напругу (НН), то трансформатор називають понижувальним. У іншому випадку трансформатор підвищувальний.

Залежно від кількості фаз розрізняють однофазні, трифазні та багатофазні трансформатори. Найбільшого розповсюдження набули однофазні та трифазні трансформатори. Трансформатори з іншим числом фаз використовують у спеціальних пристроях.

Залежно від охолодження трансформатори поділяють на сухі та масляні з природним та примусовим охолодженням.

Трансформатори призначені:

1. Для передачі та розподілу електричної енергії.
2. Для забезпечення необхідної схеми вмикання вентилів у перетворюючих пристроях.
3. Для різних технологічних процесів: зварювання (зварювальні трансформатори), живлення електротермічних установок тощо. Вони мають потужність десятки тисяч кВА при напрузі до 10 кВ.

Трансформатори виготовляють за технічними умовами або відповідно до вимог стандартів і призначені виробником для виконання певних функцій у перетворенні електричної енергії.

Параметри, що відносяться до того режиму роботи, для якого трансформатор призначений виробником, називають номінальними. За цих параметрів трансформатор може як завгодно довго працювати, не перегріваючись вище допустимих норм.

У паспорті трансформатора (заводська табличка, що кріпиться до трансформатора) вказують такі номінальні величини:

1. Номінальна первинна лінійна напруга $U_{1н}$.
 2. Номінальна вторинна лінійна напруга $U_{2н}$ на розімкненій вторинній обмотці при живленні первинної обмотки напругою $U_{1н}$ номінальної частоти.
 3. Номінальний лінійний струм $I_{1н}$ первинної обмотки.
 4. Номінальну потужність S_n , під якою розуміють повну потужність трансформатора на затискачах вторинної обмотки. Для двообмоткових трансформаторів номінальна потужність первинної обмотки $S_{1н}$ береться такою, що дорівнює номінальній потужності вторинної обмотки $S_{2н}$ і дорівнює номінальній потужності трансформатора S_n , $S_n = S_{1н} = S_{2н}$.
 5. Номінальний лінійний струм вторинної обмотки $I_{2н}$.
- Номінальні струми визначають за номінальною потужністю і номінальною напругою обмотки.

Для однофазного трансформатора:

$$I_{1н} = S_n / U_{1н}; \quad I_{2н} = S_n / U_{2н}. \quad (1.1)$$

Номінальні дані не вказують на те, що трансформатор необхідно експлуатувати тільки при них. Робота трансформатора можлива в діапазоні зміни вторинного струму від 0 до $I_{2н}$, можливі короточасні перевантаження, а також невеликі зміни напруги та частоти, спеціально обумовлені стандартами.

Магнітопроводи силових трансформаторів існують у двох основних виконаннях: стержневому та броньовому. Тип сердечника дає і назву трансформатору.

Стальний магнітопровід однофазного стержневого трансформатора (рис.1.1, а) має два стержні, на яких розміщені обмотки, і два (верхнє та нижнє) ярма, які замикають магнітопровід. Кожна з двох обмоток (1, 2) складається з двох частин, що розміщені на двох стержнях, і з'єднані послідовно або паралельно. Таке розміщення первинної і вторинної обмоток збільшує електромагнітний зв'язок між ними.

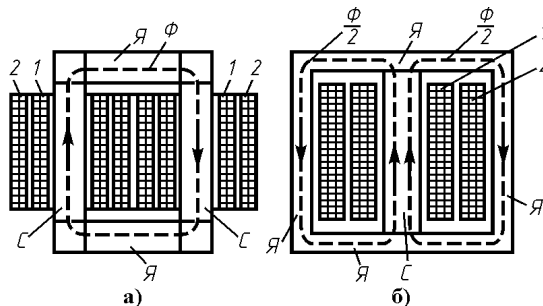


Рисунок 1.1 – Будова однофазного стержневого (а) і броньового (б) трансформаторів: 1 – обмотка НН; 2 – обмотка ВН; Я – ярма; С – стержні

Однофазний трансформатор броньової конструкції (рис.1.2, б) має один стержень з обмотками і розгалужене ярмо, яке частково закриває обмотки подібно «броні». Така конструкція дещо зменшує висоту трансформатора за рахунок висоти ярм (зменшення у два рази перерізу ярма порівняно зі стержнем, на якому розміщені обмотки).

Залежно від способу з'єднання стержнів з ярмами розрізняють магнітопроводи стикові або шихтові. У першому випадку стержні та ярма збирають окремо і скріплюють між собою спеціальними стяжними шпильками після розміщення на стержнях обмоток. Між стержнями і ярмом ставлять ізолюючі прокладки для того, щоб уникнути замикання через ярма вихрових струмів, що виникають у стержнях. Немагнітний проміжок значно збільшує споживану трансформатором реактивну потужність. Тому, незважаючи на простоту складання і демонтажу, стикові магнітопроводи мають обмежене використання.

У другому випадку складання магнітопроводів листи стержнів і ярм складають разом із перекриттям стиків. Для встановлення обмоток листи верхнього ярма виймають і потім знову зашихтовують. Немагнітні проміжки в стикі між листами одного шару перекривають листами сусідніх шарів, що не створює помітного впливу на споживану трансформатором реактивну потужність порівняно зі стиковим магнітопроводом.

Для кращого заповнення простору всередині котушки сталлю перерізу стержня надають форму квадрата або, здебільшого, вписаного в коло ступеневого багатокутника (рис.1.2).

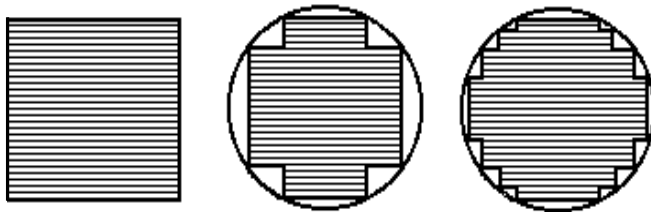


Рисунок 1.2 – Переріз стержнів трансформаторів: а) квадратний, б) хрестоподібний, в) багатоступеневий

Кількість schoдинок тим більша, чим більша потужність трансформатора і, відтак, чим більший діаметр описаного кола. Однак велика кількість schoдинок ускладнює технологію виготовлення трансформатора.

Магнітопровід у зібраному вигляді разом зі з'єднувальними деталями та ярмовими балками створює кістяк трансформатора.

Магнітопровід трансформатора повинен мати якнайменші втрати на вихрові струми та гістерезис. Це можна вирішити за допомогою:

а) використання спеціальних електротехнічних сталей, що мають малу площу петлі гістерезису;

б) використання електротехнічних сталей, які завдяки спеціальним легувальним добавкам мають збільшений питомий електричний опір;

в) складання магнітопровода з ізольованих одна від одної пластин електротехнічної сталі, щоб вихрові струми не викликали значних втрат (товщина пластин залежить від частоти перемагнічування і при частоті 50 Гц складає 0,35 або 0,5 мм).

Обмотки трансформаторів виготовляють із мідних або алюмінієвих провідників. Поперечний переріз алюмінієвого провідника беруть на 70% більшим, ніж мідного внаслідок більшого питомого електричного опору алюмінію. У зв'язку з цим габарити та маса трансформатора з алюмінієвими обмотками більша, ніж у трансформатора з мідними обмотками. Для невеликих потужностей і струмів використовують провід круглого перерізу, а для великих потужностей використовують провід прямокутного перерізу. За способом взаємного розміщення обмоток ВН і НН та їх розміщенням на стержнях розрізняють обмотки концентричні (рис.1.3, а) і переміжні (рис.1.3, б).

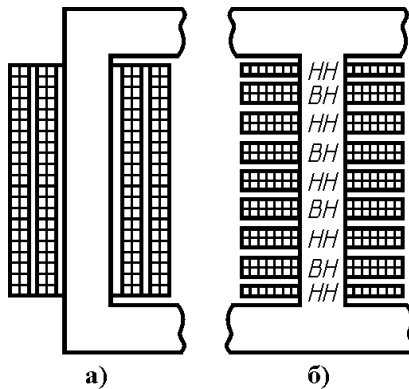


Рисунок 1.3 – Концентричні (а) та переміжні (б) обмотки

Концентричні обмотки мають форму циліндрів різних діаметрів і розміщені одна відносно одної та навколо стержня концентрично. Близьче до стержня розміщують обмотку НН, бо її легше ізолювати від стержня, а зовні – обмотку ВН.

У переміжних обмотках котушки ВН і НН чергуються уздовж стержня. Переміжні обмотки мають кращий електромагнітний зв'язок, однак вони складні у виготовленні. Тому в силових трансформаторах переважно застосовують концентричні обмотки.

Найпростішою концентричною обмоткою є циліндрична, яку виготовляють у вигляді котушки, виток якої складається з одного або декількох паралельних провідників, а витки та всі їх паралельні провідники розміщені в одному рядку без інтервалів в осьовому напрямку на циліндричній поверхні.

Незважаючи на різновиди трансформаторів і величини їх потужностей, теорія їх єдина та ґрунтується на законі електромагнітної індукції. Зі сторони первинної обмотки з кількістю витків w_1 трансформатор є споживачем електричної енергії, а зі сторони вторинної обмотки з кількістю витків w_2 він є джерелом електричної енергії для приймача з опором Z . Струм i_2 у вторинній обмотці визначається опором Z . При деякому значенні цього опору ($Z = Z_H$) через вторинну обмотку протікає номінальний струм $i_2 = i_{2H}$. Зменшення ($Z < Z_H$) або збільшення ($Z > Z_H$) опору Z порівняно з опором Z_H призводить трансформатор до перевантаження ($i_2 > i_{2H}$) або до недовантаження ($i_2 < i_{2H}$). При $Z = 0$ трансформатор буде працювати в режимі короткого замикання ($i_2 \gg i_{2H}$), а при $Z = \infty$ струм вторинної обмотки $i_2 = 0$, трансформатор працює в режимі неробочого ходу. В останньому випадку трансформатор не перетворює електричну енергію, що і зумовлює таку назву режиму.

Розглянемо спочатку електромагнітні процеси у трансформаторі в режимі неробочого ходу на прикладі понижувального двообмоткового трансформатора, принципова схема якого зображена на рис.4. Під дією прикладеної до первинної обмотки синусоїдної напруги u_1 через неї протікає струм $i_1 = i_{10}$, що називається струмом неробочого ходу. Струм i_1 , протікаючи через витки первинної обмотки, збуджує основний змінний магнітний потік $\Phi_1 = \Phi_{10}$, що замикається через феромагнітний магнітопровід і зчеплюється з усіма витками первинної та вторинної обмоток, і магнітний потік розсіяння $\Phi_{\sigma 1}$, що замикається через немагнітні (повітряні, ізоляційні) ділянки, магнітна проникність яких значно менша, ніж у магнітопровода. Тому магнітний потік розсіяння у багато разів менший від основного магнітного потоку ($\Phi_{\sigma 1} \ll \Phi$). Потоки $\Phi_{\sigma 1}$ і Φ_1 у первинній обмотці індукують електрорушійні сили e_1 індукції та $e_{\sigma 1}$ розсіяння

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}; \quad e_{\sigma 1} = -w_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt}, \quad (1.2)$$

а у вторинній обмотці потік Φ_1 індукує електрорушійну силу взаємної індукції

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (1.3)$$

Рівняння, записане за другим законом Кірхгофа для первинної обмотки, має вигляд

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = R_1 i_{10}. \quad (1.4)$$

Напруга u_2 на вторинній обмотці при неробочому ході дорівнює індукваній у ній електрорушійній силі

$$u_2 = e_2. \quad (1.5)$$

Для реальних трансформаторів $R_1 i_{10} \ll e_1$ і $e_{\sigma 1} \ll e_1$. Тому рівняння (1.3) наближено можна записати у вигляді

$$u_1 = -e_1 = w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (1.6)$$

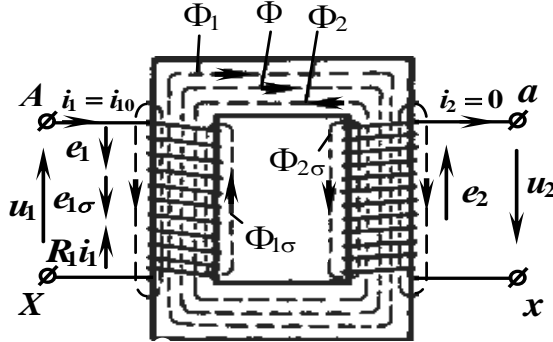


Рисунок 1.4 – Схема однофазного трансформатора

Якщо урахувати, що u_1 змінюється за законом $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, то внаслідок лінійності рівняння (1.5) магнітний потік буде також синусоїдним

$$\Phi_1 = \frac{1}{w_1} \int U_{1m} \sin \omega t dt = -\Phi_{1m} \cos \omega t = \Phi_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (1.7)$$

де

$$\Phi_{1m} = \frac{U_{1m}}{w_1 \omega}. \quad (1.8)$$

З урахуванням, що $U_{1m} \approx E_{1m}$ формули для визначення діючих значень ЕРС E_1 і E_2 і мають вигляд:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f w_1 \Phi_{1m} = 4,44 f w_1 \Phi_{1m}; \\ E_2 &= \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_2 \Phi_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f w_2 \Phi_{1m} = 4,44 f w_2 \Phi_{1m}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

З (1.9) випливає, що індуковані в обмотках ЕРС прямопропорційні кількості витків обмоток, а відношення їх дорівнює відношенню кількості витків або приблизно дорівнює відношенню напруг обмоток

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} = n. \quad (1.10)$$

Число n називають коефіцієнтом трансформації трансформатора.

$$n = \frac{U_{BH}}{U_{HH}}. \quad (1.11)$$

Перепишемо рівняння (1.3) у комплексній формі

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_{10} R_1, \quad (1.12)$$

де $E_{\sigma 0} = -jX_1 \dot{I}_{10}$; X_1 – індуктивний опір первинної обмотки, зумовлений потоком розсіяння $\Phi_{\sigma 1}$.

Підставивши значення $E_{\sigma 0}$ в (1.12), отримаємо

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} (R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} Z_1. \quad (1.13)$$

Режим неробочого ходу. При розрахунках електричних кіл, що містять трансформатори, магнітний зв'язок між первинними і вторинними колами замінюють електричним, що значно спрощує аналіз електричного кола. На рисунку 1.5, а наведена заступна схема трансформатора, що працює в режимі неробочого ходу. Як видно з рисунка, ця схема відповідає заступній схемі котушки з феромагнітним осердям, до якої прикладена синусоїдна напруга.

У режимі неробочого ходу трансформатор не виконує корисної роботи, тому споживана потужність P_0 витрачається тільки на покриття втрат неробочого ходу, які складаються з електричних втрат у первинній обмотці P_{E1} , і магнітних втрат P_M .

Наочне уявлення про процеси, що відбуваються у трансформаторі при неробочому ході, дає векторна діаграма (рис. 1.5, б). Побудову векторної діаграми починають з вектора основного магнітного потоку $\vec{\Phi}_1$. Під кутом 90° в сторону відставання від вектора $\vec{\Phi}_1$ проведені вектори \vec{E}_1 і \vec{E}_2 , що співпадають за фазою, оскільки первинна і вторинна обмотки одночасно перетинаються одним і тим же основним магнітним потоком. Під кутом втрат α (дорівнює декільком градусам) у сталюму сердечнику трансформатора в сторону випередження $\vec{\Phi}_1$ проведено вектор струму неробочого ходу \vec{I}_{10} . Згідно з рівнянням (1.13) побудований вектор \vec{U}_1 . Кут зсуву фаз між напругою \vec{U}_1 первинної обмотки і струмом \vec{I}_{10} неробочого ходу близький до 90° . Для більшої наочності на векторній діаграмі вектори спадів напруг $\vec{I}_{10} R_1$, $\vec{I}_{10} X_1$ і кут α дещо збільшені.

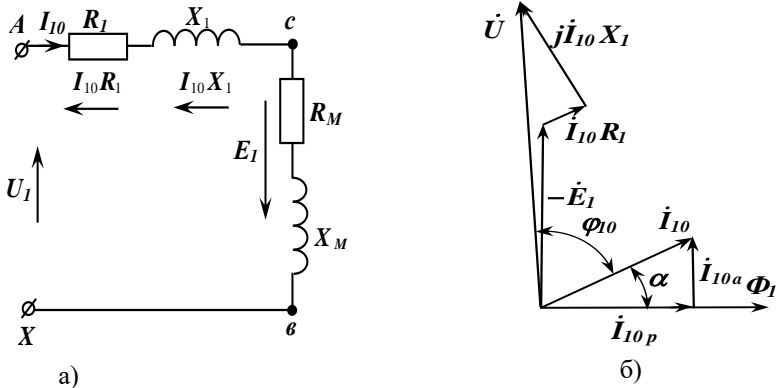


Рисунок 1.5 – Заступна схемат векторна діаграма трансформатора, що працює в режимі неробочого ходу

Із векторної діаграми видно, якщо знехтувати втратами в сталі (кут $\alpha = 0$), то споживаний із мережі струм $i_{10} = i_{\mu} = i_{10p}$ є суто реактивним струмом.

Струм i_{μ} створює основний магнітний потік і називається намагнічуючим.

Намагнічуючий струм є реактивним і є основною складовою частиною струму неробочого ходу трансформатора. Але реальний трансформатор у режимі неробочого ходу споживає від мережі незначну активну потужність, оскільки в магнітопроводі виникають втрати в сталі. Тому струм неробочого ходу I_{10} повинен мати ще й активну складову I_{10a} , яка забезпечує надходження в первинну обмотку потужності, що компенсує магнітні втрати (електричними втратами в первинній обмотці у цьому режимі можна знехтувати внаслідок малої величини струму неробочого ходу).

Отже, струм неробочого ходу

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_{10p} + \dot{I}_{10a}; \quad I_{10} = \sqrt{I_{10a}^2 + I_{10p}^2}. \quad (1.14)$$

Зазвичай струм I_{10a} не перевищує 10% від струму I_{10} . Тому він мало впливає на величину струму неробочого ходу (змінює його за величиною не більше ніж на 1%).

Слід відмітити, що у силових трансформаторах малої потужності струм неробочого ходу не перевищує 10% від номінального I_{1n} , а в трансформаторах великої потужності складає 2-3% від I_{1n} .

Режим навантаження трансформатора – це такий режим роботи, при якому первинна обмотка під'єднана до джерела змінної напруги, а до застискачів вторинної обмотки під'єднаний споживач (рис.1.6).

У режимі навантаження через вторинну обмотку протікає струм $\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z}$, який збуджує магнітний потік $\dot{\Phi}_2$, прямопропорційний намагнічуючій силі $I_2 w_2$ вторинної обмотки. За правилом Ленца магнітний потік $\dot{\Phi}_2$ протидіє причині, що його спричиняє, тобто спрямований проти магнітного потоку $\dot{\Phi}_1$. Таким чином у магнітопроводі трансформатора діє деякий результуючий магнітний потік $\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2$, що індукуює у первинній і вторинній обмотках електрорушійні сили \dot{E}_1 і \dot{E}_2 .

Результуючий магнітний потік не залежить від режиму роботи трансформатора і за будь-якого навантаження залишається майже незмінним та дорівнює магнітному потоку неробочого ходу $\dot{\Phi}_0$. Постійність магнітного потоку Φ (при $U_1 = const$) впливає із рівняння $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} Z_1$ електричної рівноваги первинної обмотки при неробочому ході. Нехтуючи дуже малою величиною спаду напруги $I_{10} Z_1$, можна вважати, що $U_1 \approx E_1$. Підведена до первинної обмотки напруга U_1 незмінна, отже і $E_1 \approx const$. Величина E_1 залежить від амплітуди основного магнітного потоку, отже, амплітуда головного магнітного потоку Φ залишається майже незмінною.

Основний магнітний потік Φ замикається через магнітопровід і зчеплюється з витками первинної і вторинної обмоток. Частина магнітного потоку, що зчеплюється лише з витками первинної обмотки та замикається через повітря, складає потік розсіяння первинної обмотки $\Phi_{\sigma 1}$ і йому відповідає ЕРС $E_{\sigma 1}$. Частина магнітного потоку, що зчеплюється тільки з витками вторинної обмотки, складає потік розсіяння вторинної обмотки $\Phi_{\sigma 2}$, який обумовлює ЕРС $E_{\sigma 2}$ і замикається також через повітря. У правильно спроектованих силових трансформаторах потоки $\Phi_{\sigma 1}$ і $\Phi_{\sigma 2}$ незначні і складають $0,1 \div 0,4\%$ від основного магнітного потоку.

У первинній обмотці трансформатора електрична енергія перетворюється в енергію магнітного поля, а у вторинній обмотці – енергія магнітного поля перетворюється в електричну енергію.

Магнітний стан трансформатора визначається рівнянням намагнічуючих сил, яке в комплексній формі має вигляд

$$\dot{I}_{10} w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2. \quad (1.15)$$

Розділивши всі члени рівняння (1.15) на число витків w_1 первинної обмотки, отримаємо рівняння струмів

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{n} \text{ або } \dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}'_2, \quad (1.16)$$

де $I'_2 = \frac{I_2}{n}$ – струм вторинної обмотки, зведений до первинної обмотки;

$n = \frac{w_1}{w_2}$ – коефіцієнт трансформації (для понижувального трансформатора).

З рівняння (1.16) випливає, що струм \dot{I}_1 має дві складові: струм неробочого ходу \dot{I}_{10} , що майже не залежить від навантаження, і струм \dot{I}'_2 , що залежить тільки від навантаження. При зміні струму у вторинній обмотці на величину $\Delta I'_2$ відбувається зміна струму первинної обмотки на величину $\Delta I_1 = \Delta I'_2$, але результуюча намагнічуюча сила трансформатора $I_{10}w_1$ залишається незмінною (при $U_1 = const$).

Згідно з другим законом Кірхгофа, запишемо рівняння для первинної і вторинної обмоток навантаженого трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1\dot{I}_1 + jX_1\dot{I}_1 \quad (1.17)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2\dot{I}_2 - jX_2\dot{I}_2 \quad (1.18)$$

де R_1, R_2, X_1, X_2 – відповідно активні та реактивні опори обмоток.

Помноживши рівняння (1.18) на коефіцієнт трансформації n отримаємо

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - R'_2\dot{I}'_2 - jX'_2\dot{I}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2\dot{Z}'_2, \quad (1.19)$$

де $\dot{U}'_2 = n\dot{U}_2$; $\dot{E}'_2 = n\dot{E}_2$; $\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{n}$; $R'_2 = n^2R_2$; $X'_2 = n^2X_2$; $\dot{Z}'_2 = n^2\dot{Z}_2$.

Це вторинні величини, зведені до числа витків первинної обмотки.

Рівняння (1.17), (1.18), (1.19) характеризують роботу зведеного трансформатора при навантаженні:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1\dot{I}_1 + jX_1\dot{I}_1; \quad \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - R'_2\dot{I}'_2 - jX'_2\dot{I}'_2; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}'_2. \quad (1.20)$$

Отже, замість реального трансформатора ми отримали еквівалентний трансформатор з $n = 1$. Такий трансформатор називають зведеним. Це дає змогу спростити аналіз процесів, які відбуваються у трансформаторі.

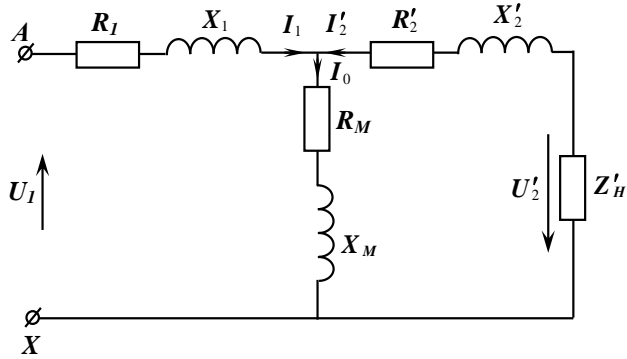


Рисунок 1.6 – Заступна схема зведеного трансформатора

Зведення вторинних величин до первинної обмотки дає змогу розглядати заступну схему трансформатора в режимі навантаження (рис.1.6), як таку, в якій індуктивний зв'язок між обмотками замінений відповідними електричними з'єднаннями. Параметри заступної схеми можуть визначати розрахунковим чи експериментальним шляхом.

Дослід неробочого ходу. Схема для проведення дослідів наведена на рисунку 1.7. Первинна обмотка трансформатора під'єднана до номінальної напруги, а вторинна обмотка розімкнена. За допомогою вольтметрів V_1 і V_2 , амперметра A і ватметра W вимірюють такі величини: первинну напругу $U_1 = U_{1H}$, струм $I_1 = I_{10}$, потужність $P_1 = P_0$, а також вторинну напругу $U_2 = U_{2H}$.

За даними дослідів неробочого ходу визначають повний опір Z_0 , активний R_0 та індуктивний X_0 опори неробочого ходу:

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{10}}; \quad R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \quad (1.21)$$

де коефіцієнт трансформації n і кут втрат α дорівнюють:

$$n = \frac{U_{BH}}{U_{HH}}; \quad \alpha = \arcsin \frac{P_0}{U_{1H} I_{10}}. \quad (1.22)$$

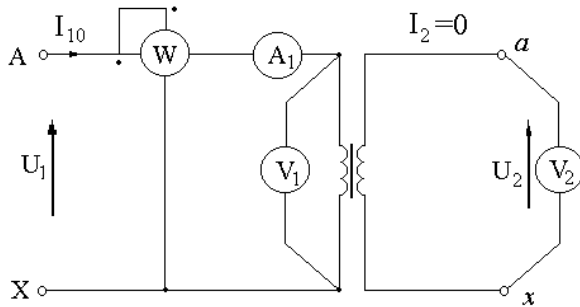


Рисунок 1.7 – Схема дослід неробочого ходу однофазного трансформатора

Із заступної схеми трансформатора при неробочому ході видно, що $Z_0 = Z_1 + Z_M$; $R_0 = R_1 + R_M$; $X_0 = X_1 + X_M$.

Зазвичай у трансформаторах $R_1 \ll R_M$, $X_1 \ll X_M$. Тому можна вважати, що опори неробочого ходу дорівнюють опорам контура намагнічування: $Z_0 \approx Z_M$; $R_0 \approx R_M$; $X_0 \approx X_M$.

Дослід короткого замикання трансформатора здійснюють за схемою, що зображена на рисунку 1.8. Вторинну обмотку замикають накоротко, а до первинної обмотки для уникнення перегрівання і пошкодження трансформатора підводять понижену напругу U_{1K} , при якій струми в обох обмотках дорівнюють номінальним. Цю напругу називають напругою короткого замикання U_K (%)

$$U_K = \frac{U_K}{U_{1H}} \cdot 100\%$$

і вказують у паспорті трансформатора. Величина U_K (%) для силових трансформаторів лежить в межах від 4% до 15%.

При короткому замиканні $U_2 \ll U_{1H} = 0$ і основний магнітний потік Φ_{1K} складає 5% від магнітного потоку при номінальному режимі. Втрати в сталі пропорційні квадрату індукції, тобто квадрату магнітного потоку Φ_{1K} . Отже, в досліді короткого замикання втратами в сталі та намагнічуючим струмом можна знехтувати. Тому потужність короткого замикання P_K практично витрачається на покриття втрат у первинній і вторинній обмотках

$$P_K = R_1 I_{1H}^2 + R_2 I_{2H}^2 + R_K I_{1H}^2.$$

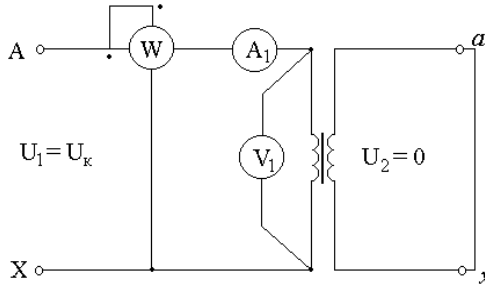


Рисунок 1.8 – Схема досліду короткого замикання однофазного трансформатора

Повний Z_K , активний R_K , реактивний X_K опори короткого замикання визначаються за формулами:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{1H}}; \quad R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (1.23)$$

Тут не враховані опори R_M і X_M , тобто нехтують струмом намагнічування. Тому $R_K = R_1 + R_2'$; $X_K = X_1 + X_2'$.

Активний та реактивні опори обмоток трансформатора (параметри заступної схеми трансформатора) визначають за формулами:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2}; \quad X_1 = X_2' = \frac{X_K}{2}. \quad (1.24)$$

З досліду короткого замикання визначають активну U_{KA} і реактивну U_{KP} складові напруги U_K короткого замикання, що виражені у відносних одиницях

$$U_K = \frac{I_{1H} \cdot Z_K}{U_{1H}} \cdot 100\% = \sqrt{U_{KA}^2 + U_{KP}^2}, \quad (1.25)$$

$$\text{де } U_{KA} (\%) = U_K \cdot \cos \varphi_K; \quad U_{KP} (\%) = U_K \cdot \sin \varphi_K; \quad \varphi_K = \arctg \frac{X_K}{R_K}.$$

За відомою величиною U_K можна визначити усталений струм короткого замикання при номінальній напрузі

$$I_K = \frac{U_{1H}}{Z_K} = \frac{U_{1H}}{U_K \cdot \frac{U_{1H}}{100 I_{1H}}} = \frac{100}{U_K} \cdot I_{1H}. \quad (1.26)$$

У силових трансформаторах струм $I_K = (7-20) I_{ном}$.

Втрати активної потужності в трансформаторі поділяють на електричні втрати в обмотках і магнітні втрати в сталі.

Величину втрат визначають розрахунковим шляхом для трансформаторів, що проектуються, і експериментальним шляхом для виготовлених трансформаторів.

При $U_1 = const$, як було встановлено раніше, втрати P_M при всіх навантаженнях дорівнюють втратам P_0 при неробочому ході, а електричні втрати P_E дорівнюють втратам короткого замикання P_K : $P_M = P_0$.

$$P_E = P_{E1} + P_{E2} = R_1 I_1^2 + R_2' I_2'^2 = R_K I_1^2 = R_K I_{1H}^2 \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2 = \beta^2 \cdot P_K. \quad (1.27)$$

Повні втрати ΔP дорівнюють

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_K. \quad (1.28)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора – це відношення потужності P_2 , що віддається у вторинну мережу до активної потужності P_1 , що надходить у первинну обмотку

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P} \quad \text{або} \quad \eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_K}. \quad (1.29)$$

$$\text{Оскільки } P_2 = m U_2 I_2 \cos \varphi_2 = m U_{1H} I_2' \cos \varphi_2' = m U_{1H} I_{1H} \frac{I_2'}{I_{1H}} \cos \varphi_2,$$

то

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_K + P_0}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0}. \quad (1.30)$$

Ця формула рекомендується державним стандартом для визначення ККД трансформатора. Величини S_H , P_0 , P_K наведені у відповідних стандартах і каталогах.

Зміною вторинної напруги ΔU трансформатора називають арифметичну різницю між вторинними напругами трансформатора при неробочому ході $U_{20} = U_{2H}$ та при заданому струмі навантаження I_2 , коли напруга первинної обмотки є постійною та дорівнює номінальній величині ($U_1 = U_{1H} = const$)

$$\Delta U = U_{2H} - U_2, \quad (1.31)$$

або у відсотках

$$\Delta U = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}} \cdot 100\% = \frac{U_{2H}' - U_2'}{U_{2H}'} \cdot 100\%.$$

Ввівши поняття коефіцієнта завантаження $\beta = \frac{I'_2}{I'_{2H}} \approx \frac{I_1}{I_{1H}}$,

$$\Delta U = \frac{U_{1H} - U'_2}{U_{1H}} \cdot 100\%. \quad (1.32)$$

Цю величину називають відносною втратою напруги.

$$\Delta U = \beta (U_{KA} \cos \varphi_2 + U_{KP} \sin \varphi_2). \quad (1.33)$$

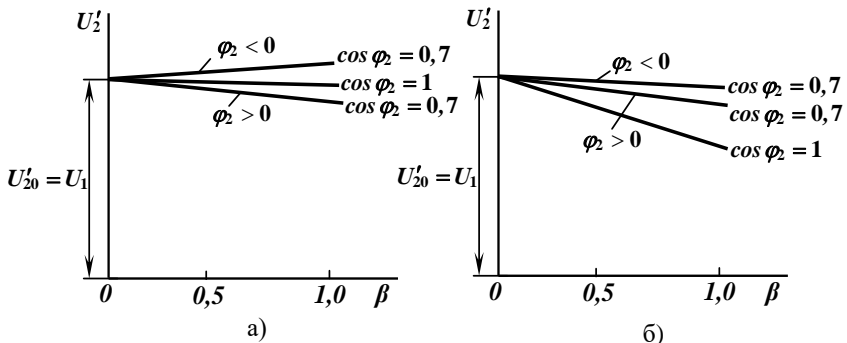


Рисунок 1.9 – Зовнішні характеристики трансформаторів великої (а) і малої (б) потужності

Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити будову і принцип дії однофазних трансформаторів та способи їх охолодження. Розглянути зразки магнітопроводів однофазних трансформаторів, розміщення первинної і вторинної обмоток.
2. Ознайомитись з електровимірними приладами і обладнанням експериментальної установки і записати їхні технічні дані в звіт про роботу.
3. Визначити мінімальні струми первинної і вторинної обмоток досліджуваного трансформатора.
4. Скласти електричну схему, що зображена на рисунку 1.10.
5. Провести дослід неробочого ходу. Результати вимірювань записати в таблицю 1.1.
6. Зняти зовнішню характеристику трансформатора при активному навантаженні. Результати вимірювань записати в таблицю 1.2.
7. Провести дослід короткого замикання трансформатора. Результати вимірювань записати в таблицю 1.3.

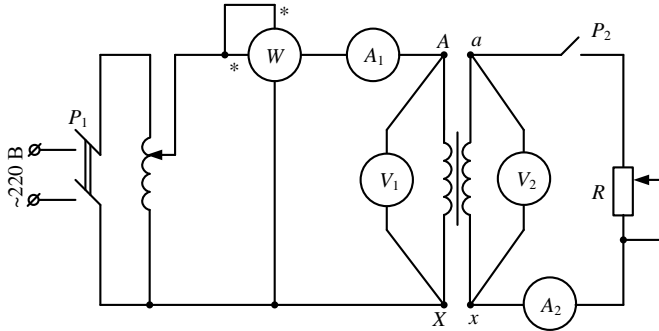


Рисунок 1.10 – Схема установки для дослідження однофазного трансформатора

Таблиця 1.1 – Дані спостережень при досліді холостого ходу

Дані спостережень				Результати обчислень					
$U_1=U_{10}$	$U_2=U_{20}$	$I_1=I_0$	$P_1=P_0$	n	Z_0	R_0	X_0	$\cos\varphi_0$	I_0 / I_{1H}
В	В	А	Вт	-	Ом	Ом	Ом	в.о.	в.о.

Таблиця 1.2 – Зовнішня характеристика

№ досліді	1	2	3	4	5	6	7	8
U_2	В							
I_2	А							

Таблиця 1.3 – Дані спостережень при досліді короткого замикання

Дані спостережень				Результати обчислень										
$U_1=U$	$I_1=I$	$I_2=I_2$	$P_1=P$	Z_K	R_K	X_K	R_1	X_1	R_2	X_2	U_K	U_K	U_K	\cos
$_{1K}$	$_{1H}$	$_H$	$_K$	О	О	О	О	О	О	О	%	%	%	φ
В	А	А	Вт	М	М	М	М	М	М	М				в.о.

Аналіз і обробка результатів експерименту

1. Розрахувати величини, що наведені в таблицях 1.1, 1.2, 1.3.

2. Дослід неробочого ходу трансформатора проводять при розімкнутому рубильнику P_2 . На первинну обмотку за допомогою ЛАТРа подаємо напругу $U_1 = U_{ном}$.

Для знімання зовнішніх характеристик трансформатора вмикаємо рубильник P_2 при найбільшому опорі R реостату. Зменшуючи опір навантажувального реостату збільшуємо струм I_2 , починаючи з $I_2 = 0$ до $1,2I_{2H}$ з таким розрахунком, щоб отримати 6-8 точок. На основі дослідних даних будемо зовнішню характеристику $U_2 = f(I_2)$.

Для проведення досліду короткого замикання трансформатора за допомогою ЛАТРа встановлюємо напругу $U_1 = 0$. Вторинну обмотку замикаємо накоротко через амперметр A_2 . Потім плавно підвищуємо напругу до значення U_K при якому струм в первинній обмотці буде номінальним.

3. За даними дослідів неробочого ходу і короткого замикання трансформатора та відомій повній потужності обчислюємо коефіцієнт корисної дії трансформатора для різних значень коефіцієнта β і двох значень $\cos\varphi_2$ (активного навантаження $\cos\varphi_2 = 1$ і активно-індуктивного навантаження $\cos\varphi_2 = 0,8$). Результати розрахунків заносимо в таблицю 1.4. За даними таблиці 1.4 на двох рисунках будуємо залежності $\eta = f(\beta)$ і $\Delta U = f(\beta)$.

Таблиця 1.4 – До побудови залежностей $\eta = f(\beta)$ і $\Delta U = f(\beta)$

β		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$\cos\varphi_2 = 1$	η , в.о							
	ΔU ,%							
$\cos\varphi_2 = 0,8$	η , в.о							
	ΔU ,%							

4. Зробити аналіз результатів розрахунку і експерименту, в якому вказати, який характер навантаження є найбільш економічним, при якому значенні β коефіцієнт корисної дії досягає максимального значення, з якою метою здійснюються досліди неробочого ходу і короткого замикання трансформатора.

Контрольні запитання

1. Будова і принцип дії однофазного трансформатора.
2. З якою метою в трансформаторах застосовуються сталіні сердечники. Чому їх виконують суцільними?
3. Від яких параметрів залежить величина електрорушійної сили обмотки трансформатора?
4. Чи можна ввімкнути трансформатор в коло постійного струму з напругою, що дорівнює номінальній?
5. Які втрати енергії мають місце в трансформаторі і від чого вони залежать?
6. Як здійснюються досліди неробочого ходу і короткого замикання трансформатора?
7. Які параметри трансформатора визначаються з дослідів неробочого ходу і короткого замикання?
8. Чим відрізняється дослідний режим короткого замикання від аварійного короткого замикання?
9. Що називають зовнішньою характеристикою трансформатора? Рівняння зовнішньої характеристики.
10. Чому зі зміною струму у вторинній обмотці трансформатора змінюється і струм в первинній обмотці?

Лабораторна робота №2

Дослідження трифазного трансформатора

Мета роботи: ознайомлення з будовою і вивчення принципу роботи трифазних трансформаторів; навчитися експериментально визначати групи з'єднання, фазні і лінійні коефіцієнти трансформації при різних способах з'єднання обмоток трифазного трансформатора; дослідження його в режимах неробочого ходу і навантаження.

Основні теоретичні положення

Трифазні трансформатори як перетворювачі електричної енергії мають широке застосування в сучасних силових електричних мережах. На електростанціях енергія виробляється за допомогою турбо- або гідрогенераторів з номінальною напругою до 38,5 кВ. Для зменшення втрат потужності в провідниках, напругу лінії електропередачі підвищують до 750 кВ і більше. Тому на підстанціях електростанцій встановлюються трансформатори, що підвищують наругу до необхідної величини. Оскільки більшість споживачів споживають електричну енергію напругою від 127 В до 500 В (в окремих випадках до 6 кВ), то виникає необхідність в створенні ряду понижувальних трансформаторних станцій. Таким чином при передачі електричної енергії величина напруги повинна багатократно змінюватись. Тому сумарна встановлена потужність трансформаторів в потужних електричних системах у 5-7 раз перевищує встановлену потужність електричних генераторів.

Трифазний трансформатор можна отримати, якщо розмістити магнітопроводи трьох однофазних трансформаторів під кутом 120° один до одного (рис.2.1, а). Середній стержень такого трансформатора як би відповідає нейтральному провіднику при з'єднанні трифазного споживача зіркою. При симетричній трифазній системі вектори магнітних потоків створюють симетричну зірку і їх сума дорівнює нулю (рис.2.1, б). Тому середній стержень є непотрібним, так як магнітний потік в ньому дорівнює нулю. Така конструкція магнітопровода є симетричною. Симетричний магнітопровід є незручним для виготовлення і в сучасному трансформаторобудуванні використовується рідко. Магнітопроводи сучасних трифазних трансформаторів загального призначення мають три стержня січення, що розміщені в одній площині, і бувають двох основних виконань: стержневого (рис.2.2, а) і бронестержневого (рис.2.2, б).

На кожному стержні розміщені обмотка вищої напруги (BH) і обмотка нижчої напруги (HH). Їх завжди виконують так, щоб вони охоплювали одна одну, так як при цьому досягається максимальний електромагнітний зв'язок між ними. Одну з обмоток називають первинною (яка споживає електричну потужність з мережі), а другу – вторинною (яка віддає електричну потужність споживачу).

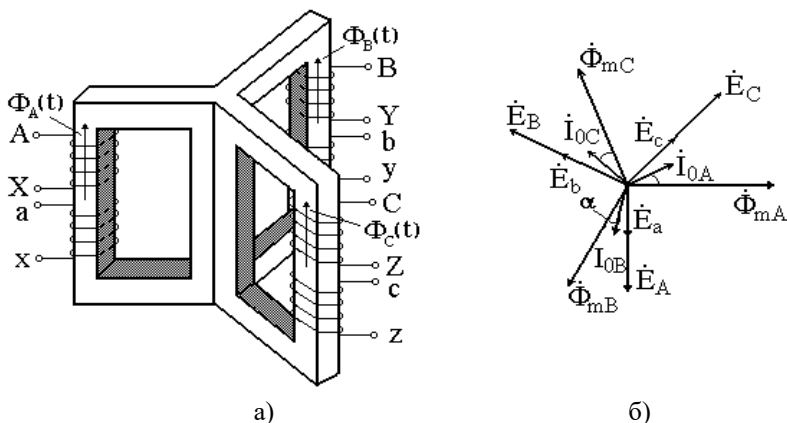


Рисунок 2.1 – Симетричний магнітопровід трифазного трансформатора (а) і векторна діаграма (б) при неробочого режимі

Симетрична трифазна система первинних струмів збуджує симетричну систему магнітних потоків. Але, внаслідок нерівності магнітних опорів різних стержнів магнітопровода, значення намагнічуючих струмів окремих фаз не однакові. Струм неробочого ходу в фазі, що розміщений на середньому стержні, буде більший за величиною в порівнянні з струмами двох других фаз, струми неробочого ходу яких рівні між собою. Однак практично для потужних трансформаторів це не має суттєвого значення, так як величина струму неробочого ходу складає всього 3-8 % від номінального струму.

Обмотки окремих фаз з'єднуються в зірку або трикутник, схема з'єднання в зірку позначається знаком *Y*, українською буквою *У* чи латинською *Y*, а з'єднання трикутником – знаком *D*, українською буквою *Т* чи грецькою буквою Δ . Схему з'єднання двообмоткового трансформатора позначають в вигляді дробу, в чисельнику якого поміщають позначення схеми з'єднання обмотки *BH*, а в знаменнику – обмотки *HH* (наприклад *Y/Δ* чи *Y/Y*).

Для початків і кінців обмотки *BH* трифазного трансформатора застосовують позначення *A, B, C* і *X, Y, Z* для обмотки *HH* – *a, b, c* і *x, y, z*. Вивід нульової точки зірки позначають буквою *N*.

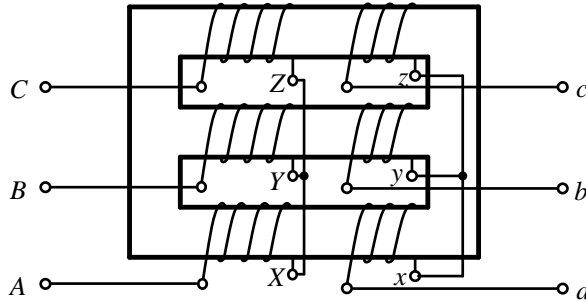
У паспорті трансформатора вказують такі номінальні величини:

1. Номінальну первинну лінійну напругу U_{1nl} .
2. Номінальну вторинну лінійну напругу U_{2nl} – лінійну напругу на розімкнутій вторинній обмотці при живленні первинної обмотки напругою U_{1nl} номінальної частоти.

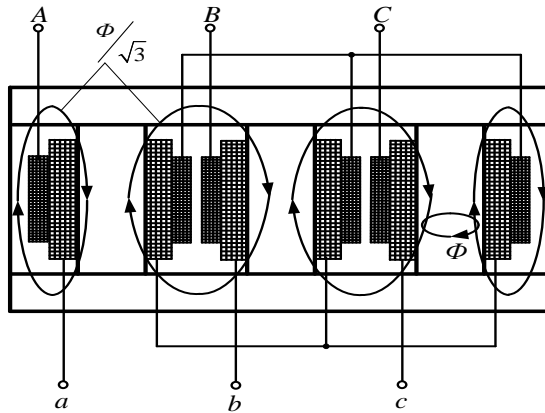
3. Номінальний лінійний струм I_{1nl} первинної обмотки.

4. Номінальну потужність S_n , під якою розуміють повну потужність трансформатора $S_n = S_{1n} = S_{2n} = \sqrt{3} \cdot U_{1nl} I_{1nl}$.

5. Номінальний вторинний лінійний струм $I_{2лн}$.



а)



б)

Рисунок 2.2 – Трифазний трансформатор з стержневим (а) і бронестержневим (б) магнітопроводом

Лінійні і фазні номінальні струми первинної і вторинної обмоток дво-обмоткового трансформатора визначаються за формулами

$$I_{1лн} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1лн}}; \quad I_{2лн} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2лн}}; \quad I_{1нф} = \frac{S_n}{3U_{1нф}}; \quad I_{2нф} = \frac{S_n}{3U_{2нф}}.$$

Опис електромагнітних процесів в трифазних трансформаторах при симетричному навантаженні може бути здійснений на основі теорії однофазного трансформатора. При симетричних первинних лінійних напругах і навантаженні первинні струми і напруги є симетричними. Це дає змогу, застосувавши прості співвідношення між лінійними і фазними величинами для

з'єднання зіркою і трикутником, використовувати для описання явищ в кожній з фаз трифазного трансформатора рівняння, схему заміщення і векторну діаграму однофазного трансформатора, вводючи в них фазні величини (струми, напруги, опори) і коефіцієнт трансформації, що визначений з співвідношення фазних напруг чи витків.

Трифазні трансформатори мають два коефіцієнта трансформації: фазний

$$n_{\phi} = \frac{w_{BH}}{w_{HH}} = \frac{U_{\phi BH}}{U_{\phi HH}} \quad (2.1)$$

і лінійний

$$n_{\lambda} = \frac{w_{BH}}{w_{HH}} = \frac{U_{\lambda BH}}{U_{\lambda HH}} \quad (2.2)$$

де $U_{\phi BH}$, $U_{\phi HH}$, $U_{\lambda BH}$, $U_{\lambda HH}$ – середньоарифметичні значення фазних і лінійних напруг.

Фазний коефіцієнт трансформації на відміну від лінійного не залежить від схеми з'єднання обмоток. Якщо з'єднання обмоток BH і HH трифазного трансформатора однакове (Y/Y чи Δ/Δ) то $n_{\lambda} = n_{\phi}$. При з'єднанні фаз обмоток за схемою Δ/Y

$n_{\lambda} = \frac{n_{\phi}}{\sqrt{3}}$. При з'єднанні фаз обмоток за схемою Y/Δ

$$n_{\phi} = \frac{n_{\lambda}}{\sqrt{3}}.$$

З'єднання обмоток BH і HH зіркою чи трикутником отримують з'єднуючи відповідним чином затискачі фаз обмоток. Залежно від того, які затискачі фаз обмоток BH і HH з'єднуються разом, змінюється величина кута α зсуву фаз між векторами лінійних напруг первинної і вторинної обмоток трансформатора в режимі неробочого режиму, що взяті між однойменними затискачами. В однофазних трансформаторах кут α дорівнює 0° чи 180° , а в трифазних кут α дорівнює

$$\alpha = K \cdot 30^\circ,$$

де $K = 0, 1, 2, 3, \dots, 11$ – ціле число, яке називається групою з'єднань обмоток трансформатора. Для зручності визначення числа K користуються годинником. При цьому під номером групи з'єднання приймають годину на годиннику, хвилинна стрілка якого суміщена з вектором лінійної напруги U_{AB} обмотки BH і встановлена на цифру 0 (12), а годинна суміщена з вектором лінійної напруги U_{ab} обмотки HH .

Номер групи з'єднання вказується після позначення схеми з'єднання його обмоток, наприклад $\Delta/Y - 11$ або $Y/Y - 0$. Знання групи з'єднань обмо-

ток необхідно при вмиканні трансформаторів на паралельну роботу, коли необхідно з'єднати рівнопотенціальні затискачі обмоток.

Проілюструємо визначення групи з'єднань годинниковим способом на прикладах (рис.2.3). Для визначеності прийемо, що обмотки *BH* і *HN* намотані в одну сторону.

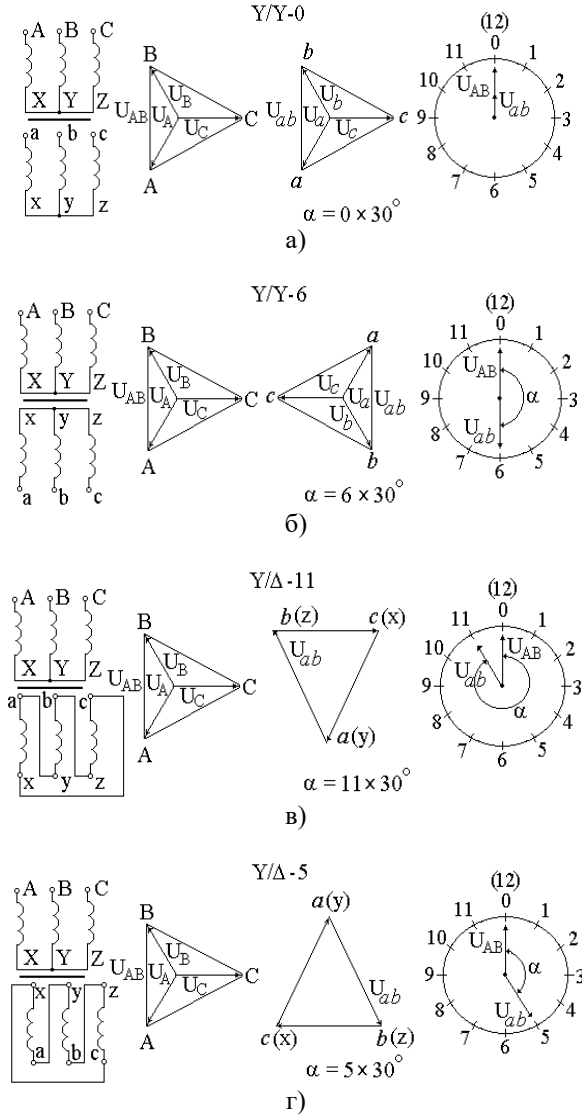


Рисунок 2.3 – Групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора

Трифазний трансформатор із з'єднанням обмоток BH і HN за схемою Y/Y і маркуванням виводів, що показана на рисунку 2.3, а відноситься, як видно з векторних діаграм напруг первинної і вторинної обмоток до групи 0. (Вектор U_{AB} співпадає за напрямом вектором U_{ab}). Якщо нульову перемичку всередині трансформатора перенести (рис. 3б), то напрям всіх електрорушійних сил обмотки HN зміниться на 180° (Вектор U_{AB} буде в протифазі з вектором U_{ab}) і група з'єднання обмоток буде $Y/Y-6$.

Якщо ж на рисунку 2.3, а, б здійснити кругове перемаркування (або перестановку) фаз обмоток HN і розмістити фазу a на правому стержні, фазу b – на лівому і фазу c – на середньому стержнях, то на векторній діаграмі напруг обмотки HN відбудеться кругова перестановка букв a, b, c проти годинникової стрілки. При цьому утвориться група з'єднань 8 (для рис.2.3, а) і 10 (для рис.2.3, б). Таким чином, при з'єднанні обмоток по схемі Y/Y отримують тільки парні номери груп.

Припустимо тепер, що обмотки з'єднані за схемою Y/Δ , як показано на рисунку 2.3, в, г. Слід відмітити, що група з'єднань обмоток буде залежати від того, яким чином обмотка HN з'єднана в трикутник. З'єднання обмотки HN в трикутник повинно утворюватись шляхом сполучення виводів a і y, z , і b, c і x .

Групу з'єднань обмоток трансформатора при відомих початках і кінцях фаз можна визначити експериментально, наприклад, за допомогою методу потенціальних діаграм. Розглянемо застосування цього методу для схеми, що зображена на рисунку 2.5.

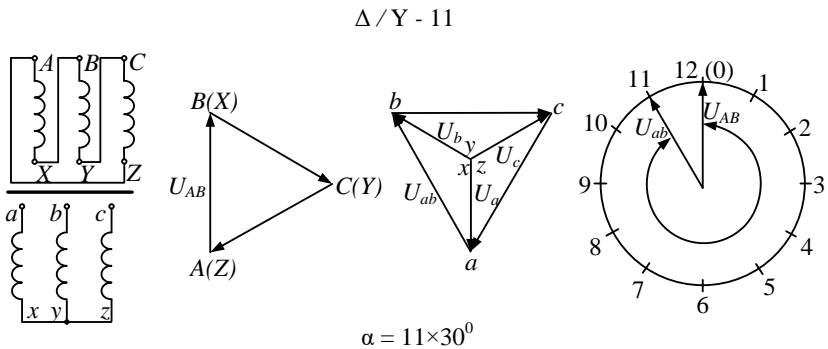


Рисунок 2.4 – З'єднання обмоток трифазного трансформатора за схемою $\Delta/Y-11$

Для визначення групи з'єднань необхідно з'єднати один з виводів обмотки BH з виводом обмотки HN (наприклад A і a). За допомогою рубильника P обмотку BH підключають до джерела трифазної напруги і вимірюють напруги U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . У прийнятому масштабі m_u напруг будують трикутник лінійних напруг обмотки BH .

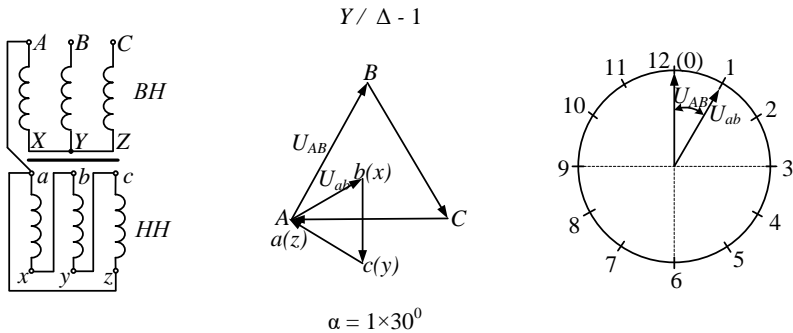


Рисунок 2.5 – До визначення з'єднань обмоток трифазного трансформатора

Радіусами U_{Ab} / m_u з точки A , U_{Bb} / m_u з точки B і U_{Cb} / m_u з точки C проводимо кола (рис.2.5). Точка перетину цих кіл відповідає потенціалові точки b . Вимірявши напруги U_{Ac} , U_{Bc} , U_{Cc} проводимо радіусами U_{Ac} / m_u , U_{Bc} / m_u , U_{Cc} / m_u відповідно з точок A , B , C кола до перетину в точці c . Знаючи положення точок a , b , c будемо трикутник лінійних напруг обмотки HH . Група з'єднань обмоток трансформатора визначається взаємним розміщенням векторів U_{AB} і U_{ab} .

Втрати в сталі в обмотках трифазного трансформатора визначають за даними дослідів неробочого ходу і короткого замикання. Використовуючи дані цих дослідів, визначають параметри заступної схеми фази трифазного трансформатора. Схема для проведення дослідів неробочого ходу і короткого замикання двообмоткового трифазного трансформатора наведена на рисунку 2.6.

При досліді неробочого ходу первинна обмотка під'єднується до номінальної трифазної напруги, а вторинна обмотка розімкнута. За показами вольтметрів визначають лінійний і фазний коефіцієнти трансформації. Внаслідок несиметрії магнітопровода струми фаз в режимі неробочого ходу не однакові. За струм неробочого режиму фази $I_{0\phi}$ прийнято вважати струм

$$I_{0\phi} = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}. \text{ Потужність втрат } P_0 \text{ трьох фаз при неробочому ході}$$

визначають як суму показів ватметрів $P_0 = P_1 + P_2$. При визначенні опорів неробочого ходу необхідно прийняти до уваги схему з'єднання фаз первинної обмотки. Для з'єднання фаз первинної обмотки зіркою

$$Z_0 = \frac{U_{0A}}{\sqrt{3}I_{0A}}; \quad R_0 = \frac{P_0}{3I_{0A}^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \quad (2.3)$$

а при з'єднанні в трикутник

$$Z_0 = \frac{\sqrt{3}U_{0л}}{I_{0л}}; \quad R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (2.4)$$

Коефіцієнт потужності неробочого ходу визначається за формулою

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{0л} I_{0л}}. \quad (2.5)$$

У досліді короткого замикання трифазного трансформатора за показами приладів визначаються середні значення лінійної напруги $U_{кл}$, лінійного струму $I_{кл}$ і потужності короткого замикання трьох фаз $P_K = P_1 + P_2$. При з'єднанні первинної обмотки зіркою параметри короткого замикання на фазу визначають за формулами

$$Z_K = \frac{U_{Кл}}{\sqrt{3}I_{Кл}}; \quad R_K = \frac{P_K}{3I_{Кл}^2}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (2.6)$$

а при з'єднанні первинної обмотки трикутником

$$Z_0 = \frac{\sqrt{3}U_{Кл}}{I_{Кл}}; \quad R_0 = \frac{P_K}{I_{Кл}^2}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (2.7)$$

Коефіцієнт потужності при короткому замиканні визначається з виразу

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} \cdot U_{Кл} I_{Кл}}. \quad (2.8)$$

За відомими опорамі неробочого ходу і короткого замикання визначають параметри заступної схеми

$$\begin{aligned} R_M = R_0; \quad R_1 \approx R_2' = \frac{R_{K75}}{2}; \quad R_2 = \frac{R_2'}{n^2}; \\ X_M = X_0; \quad X_1 \approx X_2' = \frac{X_K}{2}; \quad X_2 = \frac{X_2'}{n^2}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

де

$$R_{K75} = R_K \left[1 + 0,004 \cdot (75^0 - \Theta) \right]; \quad Z_{K75} = \sqrt{R_{K75}^2 + X_K^2}; \quad n = \frac{w_{BH}}{w_{HH}}.$$

За відомими втратами в сталі і в обмотках при номінальному навантаженні та при відомих номінальних даних, можна визначити коефіцієнт корисної дії для будь-якого навантаження за формулами

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0}, \quad (2.10)$$

де $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$ – коефіцієнт навантаження трансформатора.

Річний коефіцієнт корисної дії визначають за формулою

$$\eta = \frac{W_2}{W_2 + W_K + W_0}, \quad (2.11)$$

де W_2, W_0, W_K – відповідно енергія, що віддається трансформатором на протязі року W_2 , що відповідає річним втратам в магнітопроводі W_0 і обмотках W_K .

Властивості трифазного трансформатора при симетричному навантаженні визначаються його характеристиками: $U_2 = f(I_2)$, $I_1 = f(I_2)$, $\cos \varphi_1 = f(I_2)$, $\eta = f(I_2)$ при постійних первинній напрузі, частоті і $\cos \varphi_2$. Ці характеристики можна одержати розрахунковим або дослідним шляхом.

Коефіцієнт потужності первинної обмотки визначається за формулою

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_{л1} I_{л1}}, \quad (2.12)$$

де $U_{л1}, I_{л1}$ – середні арифметичні значення лінійних напруг і струмів.

Зміст і порядок виконання роботи

1. За плакатами та розбірними зразками ознайомитись з будовою трифазних трансформаторів і їх магнітопроводів, способами охолодження. Вивчити принцип дії трифазних трансформаторів.

2. Ознайомитись з електровимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної електроустановки, записати їхні технічні дані в звіт про роботу.

3. Здійснити з'єднання фаз обмоток трансформатора за схемами $Y/Y_n - 0$, $Y/\Delta - 11$, $Y_n/\Delta - 11$, $Y/\Delta - 11$ (рис.2.6). Виміряти фазні і лінійні напруги. Результати вимірювань занести в таблицю 2.1.

4. Для вказаного керівником знать з'єднань обмоток трифазного трансформатора експериментально визначити групу з'єднань.

5. Скласти електричну установку згідно рисунку 2.7.

6. Зняти залежності $U_{л2} = f(I_{л2})$, $I_{л1} = f(I_{л2})$ при $U_{л1} = const$, $f = const$, $\cos \varphi_2 = 1$. Результати вимірювань занести в таблицю 2.2.

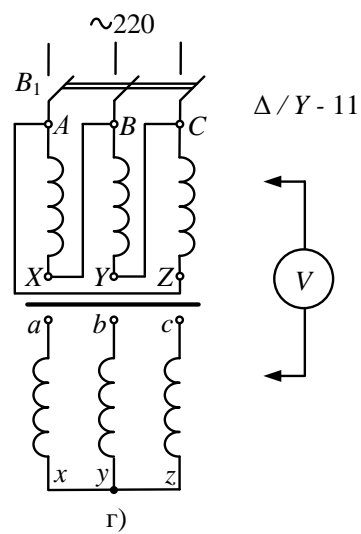
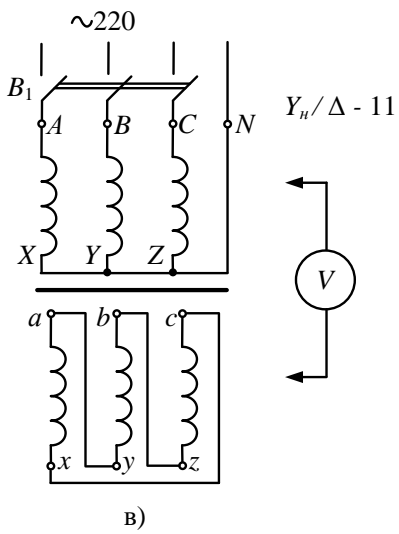
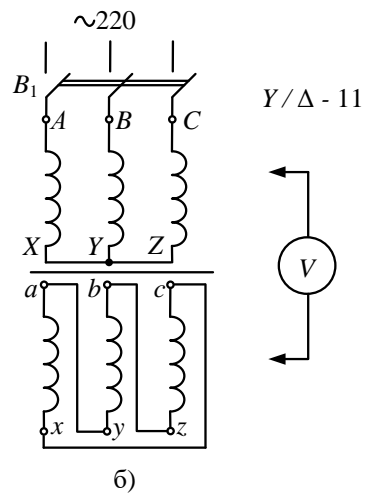
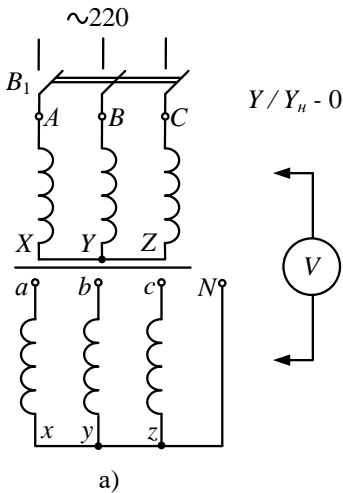


Рисунок 2.6 – Схеми з'єднань фаз обмоток трифазного трансформатора при Y/Y_n - 0, Y/Δ - 11, Y_n/Δ - 11, Δ/Y - 11

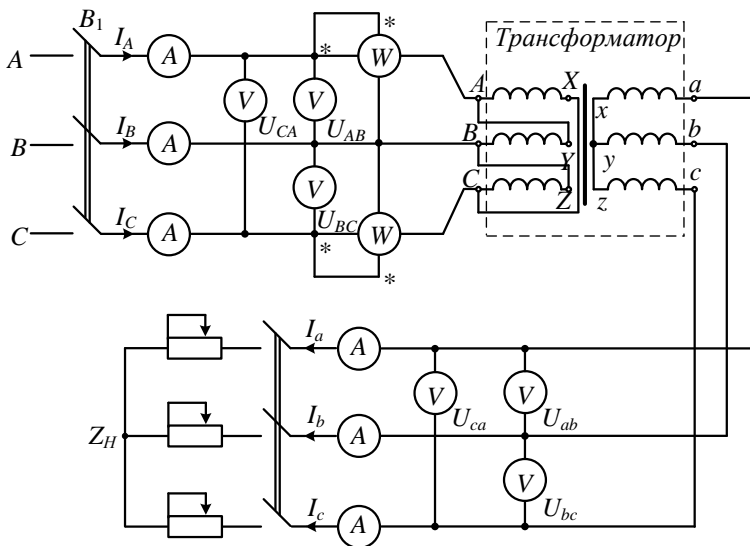


Рисунок 2.7 – Схема для дослідження трифазного трансформатора

Таблиця 2.1 – Визначення коефіцієнтів трансформації

№ досліджу	1	2	3	4
Схема з'єднань	Y / Y _H - 0	Y / Δ - 11	Y _H / Δ - 11	Δ / Y-11
Дані спостережен	$U_{A, B}$			
	$U_{B, B}$			
	$U_{C, B}$			
	$U_{AB, B}$			
	$U_{BC, B}$			
	$U_{CA, B}$			
	$U_{a, B}$			
	$U_{b, B}$			
	$U_{c, B}$			
	$U_{ab, B}$			
	$U_{bc, B}$			
$U_{ca, B}$				
Результати обчислень	$U_{\phi BH, B}$			
	$U_{\phi HH, B}$			
	$U_{\Delta BH, B}$			
	$U_{\Delta HH, B}$			
	$n_{\Delta, -}$			
	$n_{\phi c, -}$			
	$n_{\Delta} / n_{\phi, -}$			

Таблиця 2.2 – Дослідження трансформатора в неробочому режимі і навантаження

№ досліду		1	2	3	4	5	6	7
Дані спостережень	$U_{AB}, В$							
	$U_{BC}, В$							
	$U_{CA}, В$							
	$I_A, А$							
	$I_B, А$							
	$I_C, А$							
	$P_1, Вт$							
	$U_{ab}, В$							
	$U_{bc}, В$							
	$U_{ca}, В$							
	$I_a, А$							
	$I_b, А$							
	$I_c, А$							
Результати обчислень	$U_{Л1}, В$							
	$I_{Л1}, А$							
	$\cos\varphi_1, -$							
	$U_{Л2}, В$							
	$I_{Л2}, А$							
	$P_2, Вт$							
	$\beta, в.о.$							
	$\eta, в.о.$							

Аналіз і обробка результатів експерименту

1. Розрахувати величини, що наведені в таблицях 2.1, 2.2.
2. За даними неробочого ходу визначаємо опори Z_0, R_0, X_0 .
3. В одній координатній системі будуємо характеристики трансформатора $U_{л2} = f(I_{л2}), I_{л1} = f(I_{л2}), \cos\varphi_1 = f(I_{л2}), \eta = f(I_{л2})$, де $U_{л1}, U_{л2}, I_{л1}, I_{л2}$ – середні арифметичні значення лінійних напруг і струмів обмоток трансформатора.
4. Розрахувати номінальний η і річний $\eta_{р\dot{и}чн.}$ коефіцієнти корисної дії трансформатора, якщо він працює 3 місяці з навантаженням 100%, 7 місяців з навантаженням 50% і два місяці в неробочому ході.
5. Зробити аналіз результатів розрахунку і експерименту, в якому вказати: чи можна вмикати на паралельну роботу трансформатори з різними групами сполучення фаз, в якому діапазоні β доцільно експлуатувати досліджуваний трансформатор при $\cos\varphi_2 = 1$, виходячи з умов максимуму коефіцієнта корисної дії.

Контрольні запитання

1. Будова і принцип дії трифазних трансформаторів.
2. Яку роль відіграють трифазні трансформатори в сучасних електричних системах ?
3. Як можна за зовнішнім виглядом відрізнити обмотку *ВН* і обмотку *НН* трансформатора?
4. Як маркуються виводи обмоток *ВН* і *НН* трифазного трансформатора?
5. Що називають фазним і лінійним коефіцієнтом трансформації?
6. Які можуть бути схеми і групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора?
7. Як експериментально визначити групу з'єднань обмоток трифазного трансформатора?
8. Що повинно бути задано для однозначного визначення групи з'єднання обмоток трансформатора?
9. Які втрати енергії мають місце в трифазному трансформаторі і як їх можна визначити експериментально?
10. Як експериментально визначають параметри заступної схеми трансформатора?
11. Як визначається річний ККД трансформатора?
12. Які бувають способи охолодження трансформатора?
13. Назвіть основні виконання магнітопроводів трансформаторів?
14. По якій причині струми фаз в неробочому режимі на дорівнюють один одному?

Лабораторна робота №3

Дослідження трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором

Мета роботи: вивчення будови і принципу дії трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором; визначення затискачів обмоток статора і перевірка їх маркування; вивчення правил пуску, зупинки, регулювання швидкості обертання і реверсу ротора асинхронного двигуна з фазним ротором; дослідження впливу обриву фази статора на роботу двигуна.

Основні теоретичні положення

Трифазні асинхронні електродвигуни – це електричні машини, що перетворюють електричну енергію трифазного струму в механічну, яка використовується для приводу металорізальних і деревообробних верстатів, вентиляторів, ескалаторів, ліфтів, підйомних кранів і багато інших механізмів. Завдяки простоті і відносній дешевизні вони є найбільш поширеним типом сучасного електродвигуна.

Обмотки двигунів малої і середньої потужності виготовляють на напругу 380/220 або 220/127 В. Напруга, що вказана в чисельнику відповідає з'єднані обмоток зіркою, а в знаменнику – трикутником. Таким чином, один і той же асинхронний двигун, при відповідній схемі з'єднання його обмоток, може бути ввімкнений в мережу на одну із двох напруг, що вказані в паспорті.

Виводи обмоток під'єднані до затискачів, що розміщені в коробці виводів, закріпленої на корпусі двигуна. Для затискачів прийнято таке позначення: затискачі, до яких під'єднуються початки *A, B, C* обмоток, позначаються буквами C_1, C_2, C_3 ; кінці *X, Y, Z* обмоток відповідно – C_4, C_5, C_6 . За допомогою металевих пластин (перемичок) фазні обмотки з'єднуються трикутником або зіркою (рис.3.1).

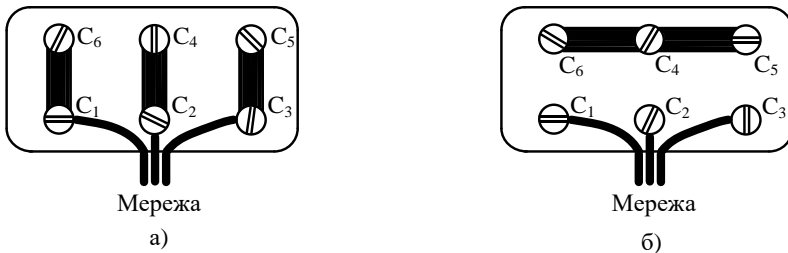


Рисунок 3.1 – Розміщення з'єднувальних пластин на затискачах фазних обмоток статора при з'єднанні їх: а) трикутником; б) зіркою

Розмітка затискачів фаз статора, при відсутності їх маркування виконується за допомогою вольтметра, що під'єднується між одним із проводів мережі змінної напруги і будь-яким затискачем, а другий кінець почергово приєднується до решти затискачів до появи відхилення стрілки вольтметра (рис.3.2).

В такий спосіб визначають по чергово кожні із трьох пар затискачів, що підносяться до окремих фаз статора.

Потім визначають «початки» і «кінці» фаз статора. З цією метою затискачі однієї з фаз статора довільно позначають, наприклад, C_1 і C_4 , з'єднують її послідовно з другою фазою і під'єднують до мережі змінного струму (рис.3.3). До затискачів третьої фази під'єднують вольтметр. Якщо стрілка вольтметра відхиляється, то кінець першої фази C_4 з'єднаний з початком другої фази C_2 , а якщо немає відхилення стрілки, то це означає, що кінець першої фази C_4 , з'єднаний з кінцем другої фази C_5 статора. В такий же спосіб визначають початок і кінець третьої фази.

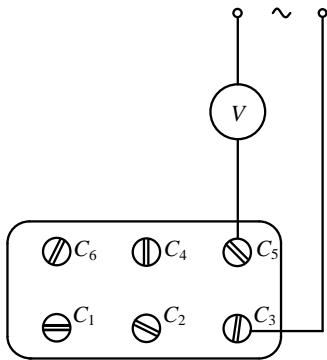


Рисунок 3.2 – До визначення затискачів, що належать одній фазі

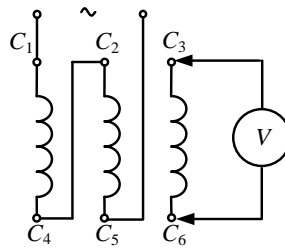


Рисунок 3.3 – До визначення початків і кінців фаз статора

Визначення «початків» і «кінців» вищеописаним трансформаторним способом ґрунтується на тому, що результуючий магнітний потік двох послідовно зєднаних фаз в першому випадку буде перетинати третю обмотку і вольтметр покаже величину ЕРС, що індукуються в ній (рис.3.4, а), а в другому випадку не перетинає третьої обмотки і тому ЕРС в ній дорівнює нулю (рис.3.4, б).

Для отримання кругового обертового магнітного поля обмотка статора початками трьох фаз (або кінцями) під'єднується до трифазного джерела електричної енергії. Як матеріал для обмотки статора використовують мідний провідник круглого або прямокутного перерізу, рідше – алюмінієвий провідник.

Осердя ротора має форму циліндра, що зібраний також із окремих листів електротехнічної сталі з пазами, в які закладається обмотка ротора. Обмотка ротора може бути короткозамкненою або фазною.

Фазна обмотка ротора виконується аналогічно до трифазної обмотки статора і з тим же числом полюсів. Фазні обмотки завжди з'єднуються зіркою, а їх початки приєднуються до трьох контактних кілець, що ізольовані одне від одного і від валу. За допомогою металографітних щіток, що дотикаються до кілець, в коло обмотки ротора можна вводити додатковий опір або додаткову ЕРС для зміни пускових або робочих властивостей двигуна. Додаткові опори вводяться,

як правило, в обмотку ротора тільки при пускові асинхронного двигуна. При роботі асинхронного двигуна пусковий реостат повинен бути повністю виведений, а обмотка ротора замкнена накоротко. Тому іноді двигуни з фазним ротором мають спеціальний пристрій, який дає можливість після завершення пуску замкнути між собою контактні кільця і дещо підняти щітки з метою зменшення втрат від тертя кілець об щітки і електричних втрат в перехідному контактні щіток.

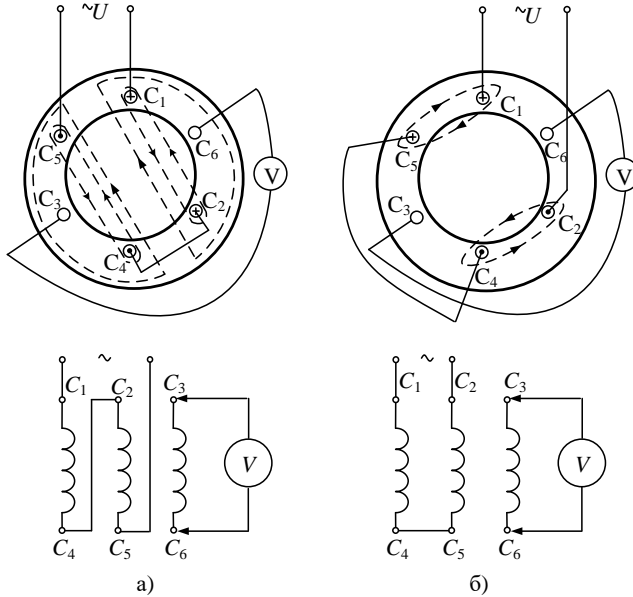


Рисунок 3.4 – До визначення «початків» і «кінців» фаз статора

Повітряний проміжок між статором і ротором в асинхронних двигунах виконується мінімально можливим з умов виробництва і надійності роботи. В двигунах потужністю декілька кіловат величина повітряного проміжку складає 0,4 - 0,5 мм, а в двигунах великої потужності – декілька міліметрів.

На корпусі двигуна закріплена табличка, на якій вказуються номінальні дані асинхронного двигуна (технічні дані, що вказують певні умови роботи, на які розрахований двигун). До номінальних даних відносяться: механічна потужність P_n двигуна, частота мережі f_1 , лінійна напруга і струми для кожного із можливих з'єднань (Y / Δ) у вигляді дробу $U_{лY} / U_{л\Delta}$ і $I_{лY} / I_{л\Delta}$, частота обертання ротора n_n (об/хв), коефіцієнт потужності $\cos\phi_{1n}$, коефіцієнт корисної дії η_n . Для двигунів з контактними кільцями ще вказується напруга на розімкнених кільцях при нерухомому роторі і лінійний струм ротора в номінальному режимі.

Номінальні величини асинхронного двигуна відповідають номінальному тепловому режиму при температурі оточуючого повітря $+40^\circ \text{C}$ і можуть зміню-

ватися в дуже широких межах: номінальна потужність – від долей вата до десятків тисяч кіловат, швидкість обертання ротора – від 500 об/хв (в окремих випадках ще менше) до 100000 об/хв, номінальна напруга – від 24 В до 10 кВ, коефіцієнт корисної дії від 0,2 - 0,65 (мікродвигуни) до 0,65 - 0,95 (при потужності понад 0,5 кВт). Якщо трифазну обмотку статора під'єднати до трифазної симетричної системи напруг, то в ній виникнуть синусоїдні струми i_a , i_b , i_c . $i_a = I_{am} \sin \omega t$; $i_b = I_{bm} \sin(\omega t - 120^\circ)$; $i_c = I_{cm} \sin(\omega t + 120^\circ)$, графіки яких наведені на рисунку 2.5.

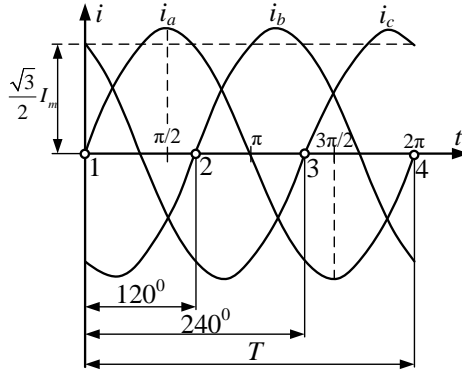


Рисунок 2.5 – Графіки миттєвих значень струмів обмоток статора

Кожна фазна обмотка статора, що розподілена в пазах, утворює розподілене в просторі і пульсуюче в часі за законом синуса магнітне поле (рис.3.6). Три змінних магнітних поля додаються і утворюють результуюче магнітне поле.

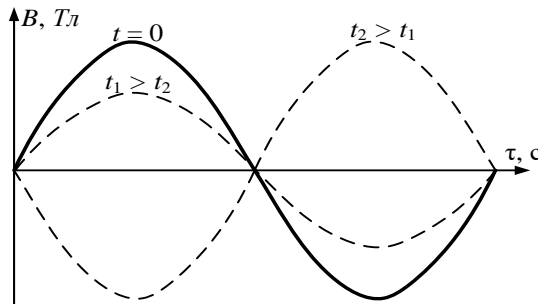


Рисунок 3.6 – Зміна пульсуючої хвилі магнітного поля в часі

Побудуємо картини результуючого магнітного поля для моментів часу, що відповідають точкам 1, 2, 3 на рисунку 3.5.

На рисунку 3.7 наведені поперечні розрізи асинхронного двигуна з найпростішою обмоткою статора і показаний характер магнітного поля статора для трьох моментів часу. Фазна обмотка статора утворює двополюсне магнітне поле і складається з одного витка (перша фаза – провідники A і X , друга фаза – провідники B і Y , третя фаза – провідники C і Z). Провідники кожного витка розміщені по відношенню один до одного на віддалі полюсного ділення

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (3.1)$$

де D – діаметр внутрішньої розточки статора, p – число пар полюсів), яка дорівнює на рисунку 3.7 половині кола. Подвійному полюсному діленню 2τ відповідає кут по колу 360° електричних. Початки фаз A , B , C зсунуті один відносно одного на 120° електричних. В данному випадку $p = 1$, тому електричні і геометричні градуси співпадають $\alpha_{\text{геом.}} = \frac{\alpha_{\text{ел.}}}{p}$.

На рисунку 3.7, а показані напрями струмів в провідниках обмотки статора для моменту часу, що відповідає точці 1 на рисунку 3.5, коли $i_a = 0$,

$i_b = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m$, $i_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m$. Струми фаз вважаються додатними, коли вони в початках фаз напрямлені за площину рисунка і позначається знаком « \times ».

Посередині рисунку 3.7 наведені криві розподілу струмів уздовж розгорнутого статора. З цих кривих видно, що струми (відтак і магнітні потоки) розподілені на поверхні статора уздовж повітряного проміжку за синусоїдним законом. В нижній частині рисунку 3.7 наведені умовні додатні напрями магнітних індукцій.

На рисунку 3.7, б, в показані напрями струмів і характер магнітного поля староста для моментів часу, що відповідають точкам 2 і 3 рисунку 3.5.

Порівнюючи картини магнітних полів і векторні діаграми легко переконатися в тому, що протягом часу $t = \frac{T}{3}$ вектор магнітної індукції \vec{B} результуючого магнітного поля повернеться в просторі на кут 120° електричних. Амплітудне значення індукції результуючого магнітного поля незмінне в часі і більше від амплітудного значення магнітної індукції однієї фази в 1,5 рази.

Таким чином обмотка статора асинхронного двигуна при живленні від трифазної мережі утворює обертове магнітне поле. За один період зміни струму поле повертається на кут, що дорівнює 360° електричних. Число обертів n_1 результуючого магнітного поля за одну хвилину визначається за формулою

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (3.2)$$

де f_1 – частота струму фази статора.

З рівняння (3.2) видно, що швидкість обертання магнітного поля, утвореного дво полюсною трифазною обмоткою, що ввімкнена в промислову мережу, дорівнює 3000 об/хв. В загальному випадку можна виготовити обмотку з $p = 1, 2, 3$ і т.д. При цьому криві розподілу струму і поля уздовж розточки статора будуть мати p пар полюсів.

Магнітне поле обертається в напрямку чергування фаз A, B, C обмотки статора. Для зміни напрямку обертання магнітного поля досить переставити місцями на затискачах обмотки статора кінці двох провідників, що йдуть від мережі живлення.

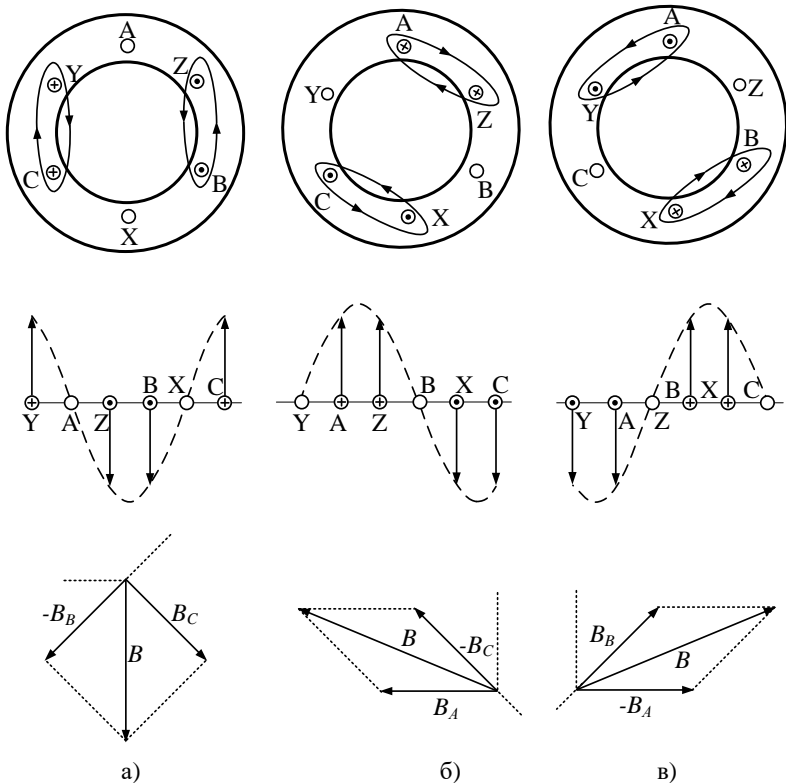


Рисунок 3.7 – До пояснення утворення обертового магнітного поля дво полюсного асинхронного двигуна

Обертове магнітне поле перетинає обмотки ротора і наводить в них (згідно з законом електромагнітної індукції) змінну ЕРС e_2 , напрям якої можна визначити за правилом правої руки. Оскільки обмотка ротора замкнена, то ЕРС e_2

утворить в ній струм того ж напрямку і частоти, що і ЕРС e_2 . В результаті взаємодії струму ротора з обертовим магнітним полем (на основі закону Ампера) виникає сила, що діє на провідники ротора, напрям якої визначається за правилом лівої руки. Сила утворює обертовий момент. Під дією моменту ротор починає обертатися в тому ж напрямку, що і магнітне поле із швидкістю $n < n_1$.

Відношення різниці швидкостей магнітного поля і ротора до швидкості обертання магнітного поля називається ковзанням

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (3.3)$$

Ковзання є характерною величиною, що визначає робочі умови асинхронного двигуна.

Момент пуску двигуна, коли обмотка статора під'єднана до мережі, а ротор ще нерухомий, ковзання дорівнює 1, а при неробочому режимі ротор набирає максимально можливу швидкість, що наближається до синхронної, тому ковзання прямує до нуля, але не досягає його. При номінальному навантаженні ковзання дорівнює 0,01 – 0,05. Отже, величина ковзання не є постійною і залежить від режиму роботи двигуна.

Під час обертання ротора ЕРС і струми в статорній і роторній обмотках мають різну частоту, що зумовлюється ковзанням. Частоти ЕРС, що індукуються обертовим полем в обмотці статора f_1 і в обмотці ротора f_2 можна визначити за формулами

$$f_1 = \frac{p n_1}{60}, \quad f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} \quad \text{чи} \quad f_2 = s f_1. \quad (3.4)$$

Діюче значення ЕРС E_1 в фазі статора і E_2 в фазі ротора визначається з виразів

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{\text{обм.1}}; \quad E_2 = 4,44 f_2 \Phi w_2 k_{\text{обм.2}}, \quad (3.5)$$

де $k_{\text{обм.1}}$ і $k_{\text{обм.2}}$ – обмоткові коефіцієнти обмотки статора і обмотки ротора, які враховують, що результуюча ЕРС однієї фази визначається не арифметичною, а геометричною сумою ЕРС провідників, що розміщені в пазах; $k_{\text{обм.1}} = 0,91-0,96$.

Величина струму в обмотці ротора визначається механічним навантаженням двигуна. Із збільшенням моменту навантаження швидкість обертання ротора зменшується, збільшується швидкість, перетину обертовим магнітним полем обмотки ротора, в зв'язку з чим зростають ЕРС E_2 і струм I_2 обмотки ротора

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (X_2 s)^2}} \quad \text{чи} \quad I_2 = \frac{E_{2k}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}}, \quad (3.6)$$

де E_2 і X_2 – ЕРС та індуктивний опір фазної обмотки нерухомого ротора, коли $f_2 = f_1$. Із (3.6) видно, що із збільшенням ковзання s струм I_2 зростає і досягає найбільшого значення при $s = 1$, тобто в момент пуску двигуна. В цьому випадку пусковий струм $I_{2\text{пуск}} = (5 \div 7) I_{2н}$.

Струм I_1 в кожній із фаз обмоток статора можна розглядати як створений спільною дією фазної напруги мережі U_1 і ЕРС E_1 , що індукується обертовим магнітним полем

$$i_1 = \frac{\dot{U}_1 + \dot{E}_1}{\underline{Z}_1}, \quad (3.7)$$

де \underline{Z}_1 – комплексний опір фазної обмотки статора.

В асинхронному двигуні перетворюється електрична енергія в механічну. Із закону збереження енергії виходить, що чим більше механічне навантаження прикладене до двигуна, тим більшу електричну потужність повинна споживати обмотка статора від джерела живлення. Цей процес відбувається автоматично. Дійсно, зі зростанням гальмівного моменту на валу двигуна струм в обмотці ротора збільшується, що викликає збільшення намагнічуючої сили ротора. Зростаючий магнітний потік ротора зменшить результуючий магнітний потік, внаслідок чого зменшиться ЕРС $E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{\text{обм.1}}$.

Якщо $U_1 = \text{const}$, то при зменшенні E_1 збільшується струм I_1 , що споживається обмоткою статора. Зменшення результуючого магнітного потоку викликано розмагнічуючою дією зростаючої намагнічуючої сили ротора буде компенсуватися відповідно зростаючою намагнічуючою силою статора. Таким чином, намагнічуючі сили і пропорційні їм магнітні потоки статора і ротора, зумовлені збільшенням струму ротора, взаємно компенсуються. З описаної взаємодії намагнічуючих сил виходить, що результуюча намагнічуюча сила при будь-якому режимі роботи двигуна приблизно дорівнює намагнічуючій силі при неробочому режимі роботи двигуна, що визначається з рівняння

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_{10} w_1, \quad (3.8)$$

де I_{10} – струм фази обмотки статора при неробочому режимі роботи.

Струм неробочого режиму роботи асинхронного двигуна значно більший, ніж у трансформатора, внаслідок значного повітряного проміжку і складає 25-50% від номінального струму двигуна.

Енергетичний баланс асинхронного двигуна проілюструємо енергетичною діаграмою наведеною на рисунку 3.8. Із діаграми видно, що споживана з мережі електрична потужність $P_1 = 3U_1 I_1 \cos \phi_1$ не враховуючи потужностей електричних втрат в обмотці статора $\Delta P_{\text{м1}}$ і втрат в сталі статора $\Delta P_{\text{с1}}$ перетворюється в електромагнітну потужність $P_{\text{ем}}$ (потужність обертового магнітного поля).

Механічна потужність $P_{\text{мех}}$ обертового ротора менша за потужність $P_{\text{ем}}$ на величину електричних втрат в обмотці ротора $\Delta P_{\text{м}2}$ і величину втрат в сталі ротора $\Delta P_{\text{с}2}$.

Корисна потужність P_2 на валу двигуна менша за механічну потужність на величину механічних $\Delta P_{\text{мех}}$ і додаткових $\Delta P_{\text{доо}}$ втрат.

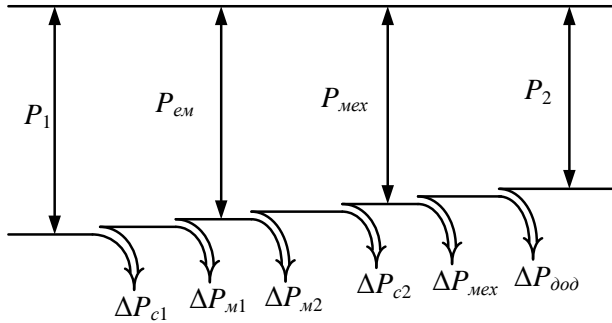


Рисунок 3.8 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

ККД асинхронного двигуна визначається за формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (\Delta P_{\text{с}1} + \Delta P_{\text{м}1} + \Delta P_{\text{с}2} + \Delta P_{\text{м}2} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доо}})}{P_1} \quad (3.9)$$

і при номінальному режимі навантаження має величину 0,75...0,95.

Для аналізу роботи асинхронного двигуна так як і в трансформаторі доцільно використовувати заступну схему, що представляє собою електричну схему, в якій обмотка ротора (вторинна обмотка) електрично з'єднана з обмоткою статора (первинною обмоткою) замість магнітного зв'язку (рис.3.9). На відміну від заступної схеми трансформатора тут більш зручніше магнітний контур під'єднувати паралельно робочому контуру.

В енергетичному відношенні заступна схема асинхронного двигуна відрізняється тим, що в трансформаторі енергія передана пульсуючим магнітним полем вторинній обмотці поступає до споживача у вигляді електричної енергії, а в асинхронному двигуні енергія, що передана обертовим магнітним полем ротору, перетворюється в механічну і знімається споживачем з валу та

враховується в схемі заміщення опором $R_2' \frac{(1-s)}{s}$.

Зведені значення величини визначаються за формулами

$$R_2' = k^2 R_2; \quad X_2' = k^2 X_2; \quad I_2' = \frac{I_2}{k^2},$$

де $k = E_1 / E_{2к}$ – коефіцієнт трансформації асинхронного двигуна, I_{10} – первинний струм ідеального холостого ходу асинхронного двигуна, коли його ротор обертається із синхронною швидкістю ($s = 0$).

Параметри заступної схеми асинхронного двигуна можна визначити розрахунковим шляхом або експериментально за даними дослідів неробочого ходу і короткого замикання.

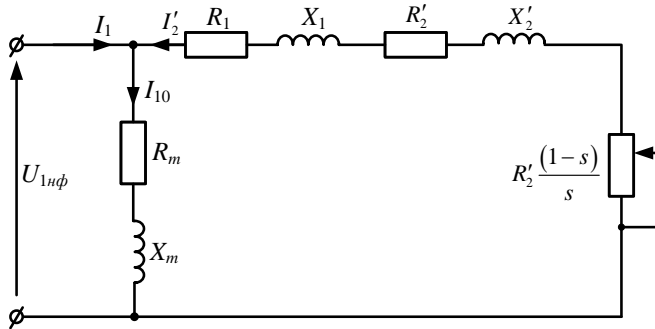


Рисунок 3.9 – Заступна схема асинхронного двигуна

Виразимо електромагнітну потужність $P_{ем}$ і механічну потужність двигуна у вигляді добутку моменту на швидкість

$$P_{ем} = M_{ем} \cdot \omega_1; \quad P_{мех} = M_{ем} \cdot \omega. \quad (3.10)$$

Якщо знехтувати втратами потужності ΔP_{C2} в осерді ротора, за рахунок їх малої величини, то різниця $P_{ем} - P_{мех}$ дорівнює втратам потужності в обмотці ротора

$$M_{ем} \cdot \omega_1 - M_{ем} \cdot \omega = \Delta P_{m2} = 3I_2^2 R_2, \quad (3.11)$$

звідки

$$M_{ем} = \frac{3I_2^2 R_2}{\omega_1 - \omega} = \frac{3I_2^2 R_2}{\omega_1 \cdot s}. \quad (3.12)$$

Момент M , що розвивається двигуном на валу, буде менший електромагнітного моменту $M_{ем}$ на величину $\Delta M_{мех}$, що зумовлена силами тертя в підшипниках, вентиляційними втратами і тертям ротора в повітря. Величина $\Delta M_{мех}$ для двигунів середньої і великої потужності мала, тому в практичних розрахунках приймають, що $M_{ем} = M$.

Замінивши в (3.12) величини I_2 та R_2 через їхні зведені значення і підставивши значення струму I_2 , що визначене із схеми заміщення, одержимо

$$M_{em} = \frac{3I_2'^2 R_2}{\omega_1 s} = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_1 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}. \quad (3.13)$$

Вираз (3.13) представляє собою рівняння механічної характеристики $M = f(s)$, графічне зображення якої наведено на рисунку 3.10.

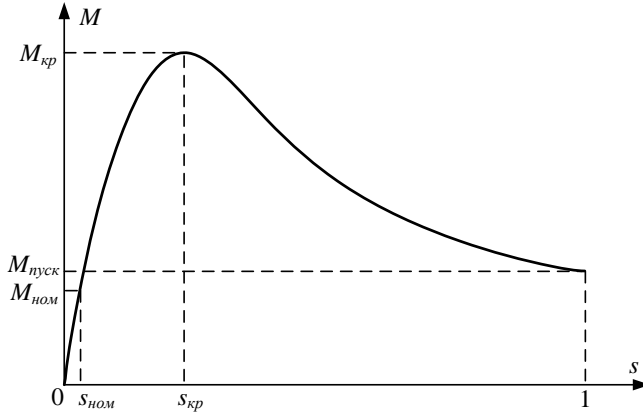


Рисунок 3.10 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Величину критичного ковзання $s_{кр}$, при якому двигун розвиває критичний (максимальний) момент $M_{кр}$, можна визначити, якщо продиференціювати вираз (3.13) по s і прирівняти похідну dM/ds до нуля

$$s_{кр} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (3.14)$$

Підставивши в (3.13) вираз (3.14) одержимо вираз критичного моменту

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (3.15)$$

З виразів (3.13), (3.14), (3.15) слідує, що момент двигуна, пропорційний квадрату напруги, а його максимальне значення не залежить від опору кола ротора. Критичне ковзання пропорційне активному опору кола ротора і не залежить від напруги живлення.

Пуск асинхронних двигунів з фазним ротором здійснюється підключенням обмотки статора до мережі, а в коло ротора попередньо підводиться додатковий опір R_{δ} . Зі зростанням швидкості ротора двигуна опір R_{δ} виводиться і по закінченню пуску дорівнює нулю, а обмотка ротора стає замкну-

тою накоротко. Підведення додаткового опору в коло ротора асинхронного двигуна дає змогу збільшити пусковий момент M_n аж до максимального значення і одночасно значно понизити пусковий струм I_n .

При автоматичному керуванні пуском асинхронного двигуна з фазним ротором пусковий опір R_0 при розгоні ротора двигуна зменшується не плавно, а ступенями за допомогою релейно-контактних апаратів (рис.3.11).

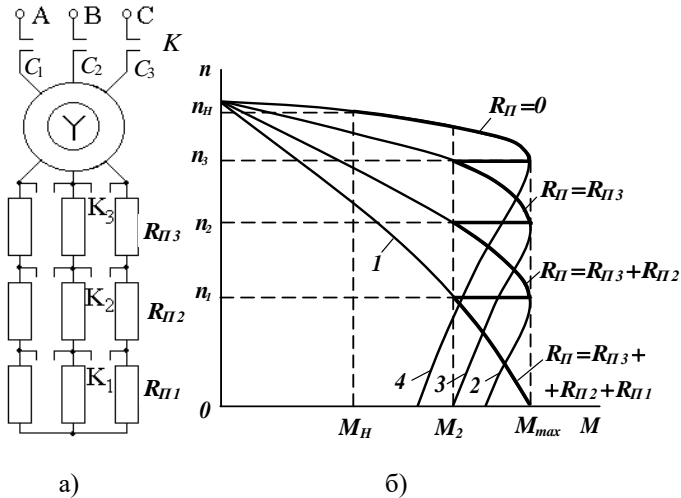


Рисунок 3.11 – Силове коло автоматичної схеми пуску асинхронного двигуна з фазним ротором (а) і механічні характеристики при пуску (б)

Регулювання швидкості обертання ротора асинхронного двигуна з фазним ротором в більшості випадків здійснюється шляхом ввімкнення в коло обмотки ротора додаткового опору. Процес регулювання аналогічний вищеписаному процесу пуску. Такий спосіб регулювання швидкості асинхронного двигуна з контактними кільцями використовується в системах, де робота на реостатних характеристиках короткочасна внаслідок великого виділення тепла в опорі.

Відключення асинхронного двигуна з контактними кільцями від мережі завжди здійснюється при замкненому накоротко колі ротора, для попередження виникнення перенапруг в обмотках статора, які можуть перевищувати номінальну напругу в 3-4 рази.

Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити за розбірним зразком і плакатами будову асинхронного двигуна з фазним ротором. Звернути увагу на будову статора, ротора з контактними кільцями, вентилятора, клемної панелі, корпусу. Вияснити призначення кожної деталі.

2. Ознайомитись з електровимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної установки, записати їх технічні дані в звіт.
3. Визначити за відхиленням стрілки вольтметра (рис.3.3) затискачі, що належать фазі статора.
4. Перевірити маркування виводів обмотки статора (рис.3.4).
5. Виміряти вольтметром і щупами величини лінійних напруг в трифазній мережі і у відповідності з паспортними даними двигуна з'єднати фази статора трикутником або зіркою.
6. Скласти коло згідно схеми, що наведена на рисунку 3.12.
7. Засвоїти правила і здійснити пуск, зупинку і реверс асинхронного двигуна з фазним ротором.
8. Здійснити регулювання швидкості обертання ротора асинхронного двигуна реостатом в колі ротора. (Операцію здійснювати швидко, щоб не перегрівся двигун).
9. Дослідити вплив обриву фази статора двигуна на його роботу в двох випадках: перед пуском і під час роботи.

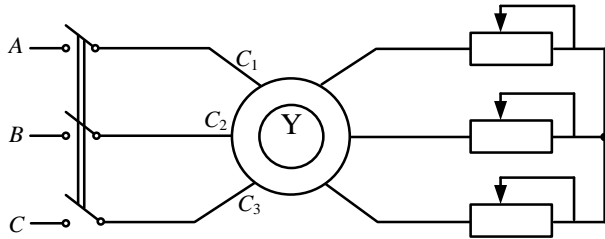


Рисунок 3.12 – Схема пуску асинхронного двигуна з фазним ротором

Аналіз і обробка результатів експерименту

Зробити аналіз результатів експерименту, в якому вказати для чого і яким способом перевіряється маркування виводів обмоток статора, як впливає обрив фази статора двигуна на його роботу.

Контрольні запитання

1. Поясніть будову і принцип роботи асинхронного двигуна з фазним ротором.
2. Від чого залежить швидкість обертання магнітного поля статора асинхронного двигуна?
3. Як можна змінити напрям обертання ротора асинхронного двигуна?
4. Чому при $s = 0$ асинхронна машина не розвиває обертового моменту?
5. Від чого залежить число пар полюсів в асинхронному двигуні і як практично його можна визначити?
6. Як визначаються «початки» і «кінці» фазних обмоток статора при відсутності маркування затискачів?

Лабораторна робота №4

Дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Мета роботи: вивчення будови і принципу дії асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором; вивчення способів пуску та регулювання швидкості обертання ротора двигуна, зняття основних характеристик асинхронного двигуна в режимі навантаження.

Основні теоретичні положення

В промислових електроустановках найбільшого розповсюдження отримали трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Двигун складається з нерухомого статора і рухомого ротора.

На статорі закріплена коробка виводів. Осердя статора виготовляється з листів електротехнічної сталі. В двигунах потужністю до 90 кВт пази статора напівзакриті. Обмотка всипна з круглого провідника.

Осердя ротора виготовляється з тієї ж сталі що й статор і закріплюється на валу гарячою посадкою або за допомогою шпонки. В сучасних машинах короткозамкнена обмотка ротора виготовляється шляхом зливання алюмінію в пази ротора. При цьому одночасно заливаються і короткозамкнені кільця разом з вентиляторними лопатками. В потужних асинхронних двигунах короткозамкнена обмотка виготовляється із закладених в пази ротора мідних або латунних стержнів, які після виходу із осердя ротора в торцевій частині приварюються до короткозамкненого кільця. В короткозамкнених роторах пази розміщують не паралельно осі валу, а зі скосом на одне зубцеве ділення, що зменшує паразитні моменти і шум при роботі двигуна.

Підшипникові щити закріплюються до статини за допомогою болтів. У центрі щитів є отвори для підшипників, що закриваються з обох боків кришками з ущільненнями. Останні запобігають витіканню змащувального матеріалу при роботі двигуна. В двигунах малої потужності встановлюють кулькові підшипники, а при великих і середніх потужностях зі сторони вивідного кінця валу встановлюється роликівий підшипник, а з протилежної сторони – кульковий.

Станина закріплюється до фундаменту за допомогою лап, що мають отвори для болтів кріплення. Охолоджуюче повітря під дією вентиляційних лопаток засмоктується через жалюзі і охолоджує лобові частини обмотки та магнітопровід.

Робота асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, також як і асинхронного двигуна з фазним ротором ґрунтується на електромагнітній взаємодії між обертовим магнітним полем, що створюється системою трифазного струму і струмами, що наводяться в обмотці ротора при перетині її провідників обертовим полем.

Швидкість n_1 обертового поля визначається за формулою

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (4.1)$$

де f_1 і p – відповідно частота і число пар полюсів обмотки статора.

Електромагнітна взаємодія між статором і ротором асинхронного двигуна можлива тільки при різниці швидкостей обертового поля n_1 і ротора n , тобто при умові $n \neq n_1$, тому що при $n = n_1$ поле було б нерухоме відносно ротора і в обмотці ротора не наводилася б ЕРС. Відношення

$$s = \frac{n_1 - n}{n} \quad \text{або} \quad s = \frac{n_1 - n}{n} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

називається ковзанням асинхронного двигуна.

В асинхронному двигуні ротор обертається відносно магнітного поля з швидкістю $n_1 - n$. Тому наведена в роторі ЕРС має частоту

$$f_2 = \frac{p_1(n_1 - n)}{60} = \frac{pn}{60} \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} = f_1 s. \quad (4.3)$$

Робота асинхронного двигуна за своїм фізичним змістом подібна до роботи трансформатора. При цьому статор можна розглядати як первинну обмотку, а ротор – як вторинну, що обертається з швидкістю n .

Створений обмоткою статора обертовий магнітний потік Φ перетинає обмотку статора і обмотку ротора, індукуючи в кожній з них ЕРС, діючі значення яких визначаються за формулами

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{o\delta 1}; \quad E_2 = 4,44 f_2 \Phi w_2 k_{o\delta 2}, \quad (4.4)$$

де w_1, w_2 – числа витків обмотки статора і ротора; $k_{o\delta 1}$ і $k_{o\delta 2}$ – обмоткові коефіцієнти обмоток статора і ротора, величини яких для трифазних обмоток лежать в межах від 0,92 до 0,96, а для короткозамкненої обмотки ротора $k_{o\delta 2} = 1$.

Обертовий магнітний потік статора наводить в обмотці ротора систему трифазних ЕРС, які в замкненому колі ротора будуть підтримувати трифазні струми. Ці струми створять обертовий магнітний потік ротора, швидкість обертання n'_2 якого по відношенню до самого ротора дорівнює

$$n_2 = \frac{60 f_2}{p_2}. \quad (4.5)$$

Ротор обертається в просторі зі швидкістю n . З цією швидкістю він обертає магнітний потік ротора. Отже, магнітний потік ротора обертається зі швидкістю

$$n_2 = n'_2 + n = \frac{60 f_2}{p_2} + n. \quad (4.6)$$

Підставивши в (4.6) значення f_2 з рівняння (4.3) і з врахуванням того, що $p_2 = p_1$ маємо

$$n_2 = 60 \cdot \frac{p_1 \cdot p_2}{60 p_2} \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} + n. \quad (4.7)$$

Після перетворень (4.7) отримаємо

$$n_2 = n_1, \quad (4.8)$$

тобто швидкість n_2 обертання магнітного поля ротора дорівнює швидкості n_1 обертання магнітного поля статора незалежно від того з якою швидкістю обертається ротор. Магнітні потоки статора і ротора обертаються синхронно і є нерухомими один відносно одного. Взаємна нерухомість двох обертових потоків дає змогу розглядати їх взаємодію як взаємодію магнітних потоків, що створюються первинною і вторинною обмотками трансформатора.

За правилом Ленца магнітний потік ротора послаблює магнітний потік статора. Однак при постійності частоти f_1 і напруги мережі U_1 величина результуючого магнітного потоку двигуна при навантаженні приблизно така як і при роботі двигуна в неробочому режимі.

Однією з найважливіших характеристик асинхронного двигуна є механічна характеристика, що є залежністю $M = f(n)$ чи $M = f(s)$. Рівняння механічної характеристики має вигляд

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_1 s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}, \quad (4.9)$$

де R'_2, X'_2 – зведені значення опорів обмотки ротора

$$R'_2 = kR_2; \quad X'_2 = \kappa X_2; \quad k = \frac{\kappa_{\phi 01} W_1}{\kappa_{\phi 02} W_2}.$$

На рисунку 4.1, а, б зображені механічні характеристики.

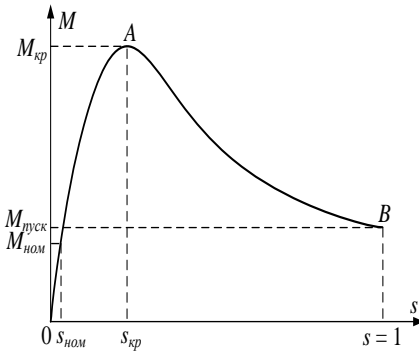


Рисунок 4.1,а – Механічна характеристика АД в координатах $M = f(s)$

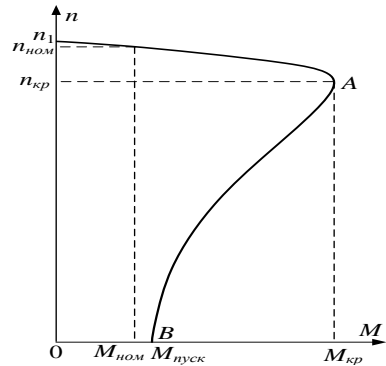


Рисунок 4.1,б – Механічна характеристика АД в координатах $M = f(n)$

Важливою точкою при аналізі роботи двигуна є точка, де момент досягає найбільшого значення. Координати цієї точки ($s_{кр}, M_{кр}$)

$$M_{кр} = \frac{3U_{1\Phi}^2}{2\omega_1 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X')^2} \right]}; \quad (4.10)$$

$$s_{кр} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X')^2}}.$$

Ділянка AO (рис.4.1) характеризує стійку роботу асинхронного двигуна, а ділянка AB – нестійку.

При роботі двигуна на ділянці OA автоматично встановлюється динамічна рівновага моментів, тобто при збільшенні гальмівного моменту на валу двигуна швидкість ротора зменшується (ковзання збільшується), зростає струм I_2 , а разом з ним і обертовий момент, що зрівноважує зростаючий гальмівний момент. Збільшення гальмівного моменту понад $M_{кр}$ призведе до зупинки двигуна, оскільки динамічна рівновага моментів є неможливою (при подальшому збільшенні навантаження зростання ковзання буде зменшувати обертовий момент).

Тому для стійкої роботи асинхронного двигуна необхідно, щоб його максимальний момент був більший за номінальний. Величина $\lambda = M_K / M_H$ характеризує перевантажувальну здатність двигуна за моментом. Для більшості двигунів загальнопромислового призначення $\lambda = 1,7-2,5$.

Пуск асинхронного двигуна характеризується ділянкою AB (рис.4.1). В момент пуску $X_2 > R_2$. В міру розгону ротора ковзання зменшується, а обертовий момент зростає. Індуктивний опір ротора зменшуючись наближується до незмінного за величиною опору R_2 і при $sX_2 = R_2$ момент, що розвивається двигуном, досягає максимального значення. При подальшому зменшенні ковзання виникає нерівність опорів кола ротора $sX_2 < R_2$ і момент, що розвивається двигуном, зменшується. Зменшення моменту призупиниться, коли настане динамічна рівновага обертового і гальмівного моментів.

Пускові властивості асинхронного двигуна визначається наступними величинами: пусковим струмом I_n ; пусковим моментом M_n (при $s = 1$); плавністю і тривалістю пуску, будовою ротора. Кратність пускового значення величини до її номінального значення (I_n/I_n ; M_n/M_n) вказується в каталогах.

З виразів (4.9), (4.10) слідує, що:

1. Момент, що розвивається асинхронним двигуном при будь-якому ковзанні, пропорційний квадрату напруги

$$M \cong cU_{1\phi}^2.$$

2. Критичне ковзання пропорційне опору кола ротора і не залежить від напруги мережі.

В інженерних розрахунках зазвичай користуються спрощеним рівнянням механічної характеристики, за допомогою якого можна розрахувати і побудувати механічну характеристику, використовуючи тільки паспортні і каталожні дані. Спрощене рівняння механічної характеристики (рівняння Клосса) має вигляд

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad (4.11)$$

$$s_{кр} = s_{ном} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right); \quad \lambda = \frac{M_{кр}}{M_{ном}}; \quad s = \frac{n_1 - n_{ном}}{n_1};$$

$$M_{кр} = \lambda M_{ном} = \lambda \frac{9550P_{ном}}{n_{ном}} \quad [Hm].$$

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором потужністю 0,6-100 кВт найбільш часто пускають в хід прямим підключенням обмотки статора до трифазною мережі за допомогою найпростішого комутаційного апарату (рубильника, магнітного пускача). Такий пуск дуже простий і швидкий, але має наступні недоліки:

1. відносно малий пусковий момент $M_n = (1,2-1,6)M_{ном}$;
2. великий пусковий струм $I_n = (5-7)I_{ном}$.

Перший недоліки інколи доводиться усувати шляхом вибору двигуна більшої потужності, ніж вимагається за умовами роботи в номінальному режимі. П'яти-семи кратний струм при пуску відносно безпечний для двигуна, але викликає різке падіння напруги в мережі, що може мати поганий вплив на інших споживачів енергії. Тому при прямому пуску номінальна потужність асинхронного двигуна залежить від потужності живлячої мережі.

Для обмеження пускового струму асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором застосовують пуск при понижений напрузі, який досягається шляхом ввімкнення додаткового опору в коло обмотки статора (рис.4.2, а) чи пуск з переключенням обмотки статора з зірки на трикутник (рис.4.2, б).

Пуск двигуна з додатковим опором в колі статора (рис.4.2, а) здійснюється наступним чином. Перед пуском рубильник P_2 встановлюють в розімкненому положенні, потім вмикають рубильник P_1 . Після закінчення розгону ротора вмикають рубильник P_2 , тим самим шунтують додатковий опір R_d .

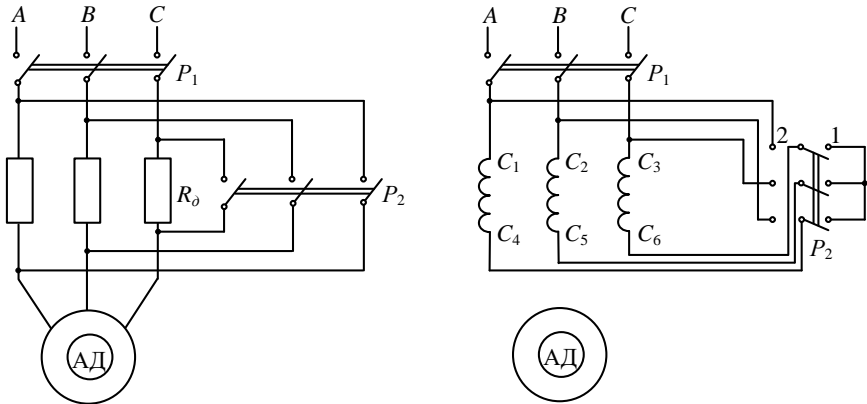


Рисунок 4.2 – Схеми пуску асинхронного двигуна з короткозамкненою обмоткою ротора: з додатковим опором в колі обмотки статора (а) і перемиканням фаз обмотки з зірки на трикутник (б)

Пуск двигуна переключенням фаз обмотки статора з зірки на трикутник (рис.4.2, б) можливий, коли статорна обмотка може бути з'єднана зіркою чи трикутником і лінійна напруга мережі відповідає номінальній фазній напрузі обмотки статора. Встановивши попередньо рубильник P_2 в положенні 1, що відповідає з'єднанню обмотки статора зіркою, рубильником P_1 подають напругу на обмотку статора. Після закінчення розгону ротора рубильник P_2 перемикають в положення 2, завдяки чому обмотка статора з'єднується трикутником.

Зменшення пускового струму, що створюється завдяки пониженню напруги на обмотці статора, викликає зменшення пускового моменту пропорційно квадрату напруги на статорі. Так, наприклад, при переключенні обмот-

ки статора з зірки на трикутник момент зменшується в три рази (фазна напру- га зменшується $\sqrt{3}$). Тому такий спосіб пуску можливий тільки при малих моментах на валу двигуна.

Для регулювання швидкостей обертання асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором зазвичай використовують два методи: частотний метод регулювання частоти обертання магнітного поля шляхом регулювання частоти напруги обмотки статора; метод зміни числа пар полюсів обертового магнітного поля, що дає змогу стрибкоподібно змінювати швидкість обертання магнітного поля.

Частотний спосіб регулювання швидкості ротора асинхронного двигуна потребує окремого джерела чи перетворювача електричної енергії з регульованою частотою. При зміні частоти живлячої напруги пропорційно змінюється швидкість обертання магнітного поля. На рисунку 4.3 зображені механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному способі регулювання швидкості.

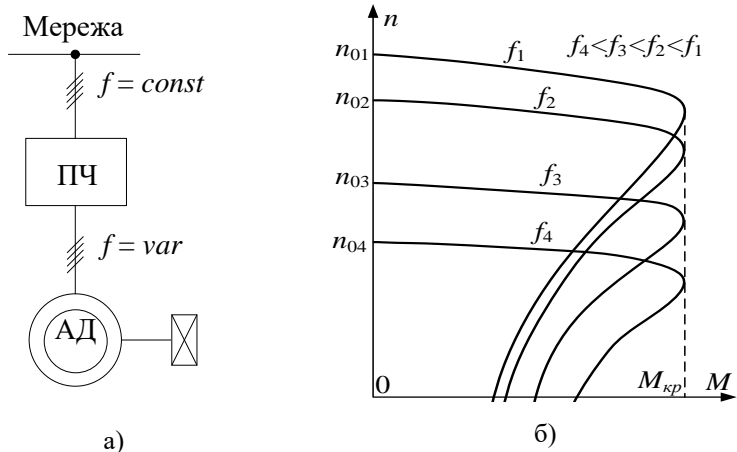


Рисунок 4.3 – Структурна схема (а) і механічні характеристики (б) асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості

При регулюванні частоти напруги живлення необхідно одночасно регулювати амплітуду напруги. Так як магнітний потік повинен при всіх режимах зберігатись одним і тим же, то величину напруги необхідно змінювати прямопропорційно частоті, тобто відношення $U_{1\phi} / f_1$ повинно бути постійним.

Частотний спосіб регулювання швидкості дає змогу отримувати широкий діапазон і плавне регулювання швидкості, але він застосовується рідко, внаслідок низького ККД і великих капітальних витрат.

Регулювання швидкості обертання ротора асинхронного двигуна зміною кількості пар полюсів здійснюється шляхом зміни числа пар полюсів кожної фази обмотки статора. Обертове магнітне поле буде мати стільки ж

пар полюсів, що й магнітне поле однієї фазної обмотки. Слід зазначити, що ніяких переключень в обмотці ротора здійснювати не потрібно, так як обертове магнітне поле ротора завжди утворює стільки ж пар полюсів скільки їх має обертове магнітне поле статора.

В Україні випускаються двошвидкісні двигуни з наступними швидкостями магнітних полів: 3000/1500, 1500/750, 1000/500 об/хв та інші: тришвидкісні – 1500/100/750, 1000/750/500 об/хв; чотиришвидкісні: 3000/1500/1000/500, 1500/1000/750/500 об/хв.

На рисунку 4.4 зображені механічні характеристики двошвидкісного двигуна.

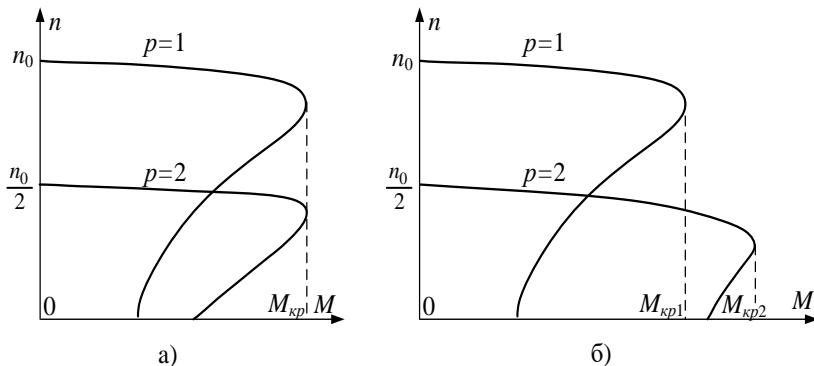


Рисунок 4.4 – Механічні характеристики при регулюванні швидкості обертання асинхронного двигуна переключенням числа пар полюсів: при постійному (а) і змінному (б) магнітному потоці

В двошвидкісних асинхронних двигунах з відношенням швидкостей обертання магнітного поля 1:2 завжди використовують одну обмотку, а при інших співвідношеннях – дві окремі обмотки. Кінці фаз і відповідні їм затискачі в двошвидкісних асинхронних двигунах визначають так само, як і в звичайних одношвидкісних двигунах, але доповнюють попереду великих літер цифрами, що вказують число полюсів.

Для знаходження всіх основних величин, що визначають режим роботи двигуна при різних навантаженнях застосовують його робочі характеристики. Робочими характеристиками асинхронного двигуна називають залежності споживаної потужності P_1 , струму статора I_1 , коефіцієнта потужності $\cos\phi_1$, моменту на валу M_2 , ковзання s і ККД η від корисної потужності P_2 при номінальній напрузі і частоті.

На рисунку 4.5 зображені робочі характеристики асинхронного двигуна потужністю 3 кВт. При $P_2 = 0$ величини I_1 і $\cos\phi_1$ відповідають режиму неробочого ходу.

Робочі характеристики можна побудувати за розрахунковими даними при проектуванні двигуна, а також за даними експерименту.

Корисну потужність на валу асинхронного двигуна в лабораторних умовах зазвичай визначають методом гальмування за допомогою генератора постійного струму на основі потужності $U_2 \cdot I_2$, що віддається генератором і його втрат ΔP_2

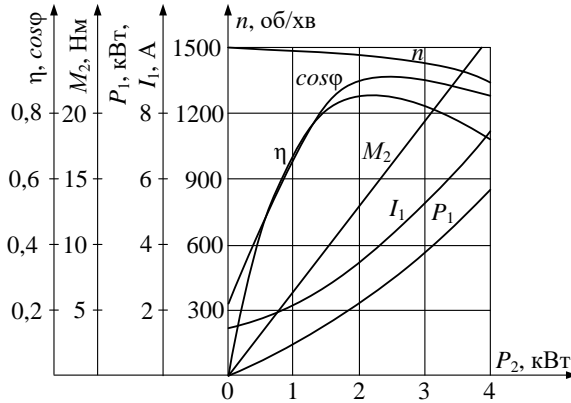


Рисунок 4.5 – Робочі характеристики асинхронного двигуна потужністю 3 кВт

$$P_2 = U_2 I_2 + \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{мех.}} + \Delta P_{\text{ст.}} + \Delta P_{\text{доод.}}$$

де $U_2 \cdot I_2$ – напруга і струм якорного кола генератора, що вимірюється вольтметром і амперметром;

$\Delta P_{\text{я}} = I_2 \cdot R_{\text{я}}$ – втрати в обмотці якоря;

$\Delta P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_2$ – втрати в контактні щіток (приймається, що $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В і не залежить від струму I_2);

$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мех.ном}} \cdot \frac{n}{n_{\text{ном}}}$ – механічні втрати, що приблизно пропорційні швидкості n генератора, $\Delta P_{\text{мех.ном}}$ – механічні втрати в генераторі при номінальній швидкості $n_{\text{ном}}$;

$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст.ном}} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2$ – втрати в сталі генератора, що в першому наближенні пропорційні квадрату зменшення швидкості, $\Delta P_{\text{ст.ном}}$ – номінальні втрати в сталі генератора;

$\Delta P_{\text{доод.}} = \Delta P_{\text{доод.ном}} \cdot \frac{I_{\Gamma}}{I_{\Gamma \text{ном}}}$ – додаткові втрати. Додаткові втрати $\Delta P_{\text{доод.ном}}$ при номінальному режимі дорівнюють 1% від потужності генератора $P_{2 \text{ном.}}$.

Величини $R_{\text{я}}$, $I_{2 \text{ном}}$, $\Delta P_{\text{мех.ном}}$, $\Delta P_{\text{ст.ном}}$, $P_{2 \text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$ для кожного генератора повинні видаватися на занятті викладачем.

Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити будову асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором за плакатами і розбірним зразком. Звернути увагу на будову статора, ротора з короткозамкненою обмоткою (білячою кліткою), вентилятора, панелі з клемами, корпусу. Вияснити призначення кожної деталі.

2. Ознайомитись з електровимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної електроустановки.

3. Вивчити способи пуску і регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

4. Скласти електричне коло згідно рисунку 4.2, б.

5. Провести пуск асинхронного двигуна способом переключення фаз обмотки статора з зірки на трикутник. Значення фазних і лінійних напруг, що встановилися записати в таблицю 4.1.

6. Скласти електричне коло згідно рисунку 4.6.

7. Провести пуск і регулювання швидкості обертання двошвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором зміною кількості пар полюсів. Результати вимірювань швидкості обертання ротора, що встановились, занести таблицю 4.2.

8. Скласти електричне коло згідно рисунку 4.7.

9. Зняти основні характеристики асинхронного двигуна в режимі навантаження. Результати вимірювань занести в таблицю 4.3.

Таблиця 4.1 – Пуск асинхронного двигуна переключенням обмотки статора з зірки на трикутник

Схема з'єднання	U_L	U_ϕ
Y		
Δ		

Таблиця 4.2 – Регулювання швидкості обертання ротора двошвидкісного двигуна переключенням фаз обмотки статора з трикутника на подвійну зірку

Схема з'єднання	n
трикутником	
подвійною зіркою	

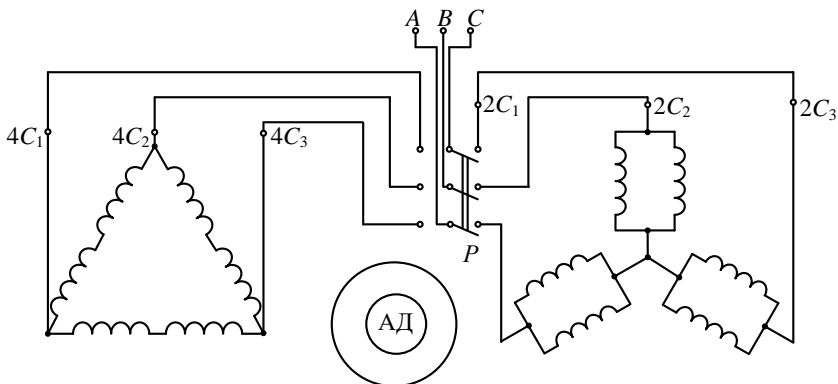


Рисунок 4.6 – Схема пуску двошвидкісного асинхронного двигуна з переключенням фаз обмотки статора з трикутника на подвійну зірку

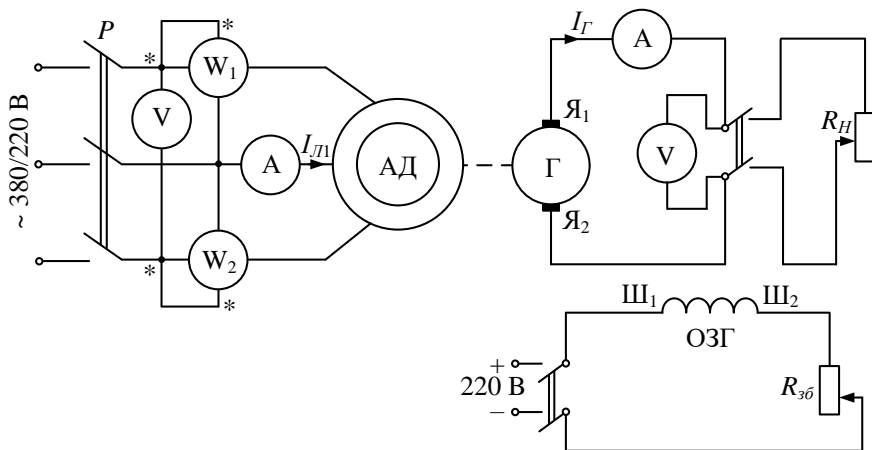


Рисунок 4.7 – Схема експериментальної установки для зняття робочих характеристик асинхронного двигуна

Таблиця 4.3 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

№ П/п	Дані спостережень					Результати обчислень													
	$U_{Л1}$ В	$I_{Л1}$ А	P_{w1} Вт	P_{w2} Вт	n об/хв	$U_{Г}$ В	$I_{Г}$ А	$P_{Г}$ Вт	$\Delta P_{Я}$ Вт	$\Delta P_{Ш}$ Вт	$\Delta P_{Мех}$ Вт	$\Delta P_{С}$ Вт	$\Delta P_{Д}$ Вт	P_2 Вт	P_1 Вт	M Нм	s в.о.	η в.о.	$\cos\phi$ в.о.
1																			
...																			
7																			

Аналіз і обробка результатів експерименту

1. Здійснити розрахунок величин, що наведені в таблиці 4.3.
2. За розрахунковими і експериментальними даними таблиці 4.3 побудувати на одному рисунку залежності $I_{л1}$, n , M , s , η , $\cos\phi_1 = f(P)$.
3. Зробити аналіз результатів розрахунку і експерименту в якому вказати: які існують способи пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, найбільш економічний спосіб регулювання швидкості обертання ротора, які переваги і недоліки має асинхронний двигун з короткозамкненим ротором в порівнянні з двигуном з фазним ротором.

Контрольні запитання

1. Поясніть будову і принцип дії асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.
2. Способи пуску трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.
3. Чому в трифазному асинхронному двигуні утворюється обертовий момент, а в трансформаторі не утворюється?
4. Як визначити швидкість обертання магнітного поля і номінальну швидкість обертання ротора при заданих величинах p , f , s ?
5. У скільки раз зменшаться фазний і пусковий струми двигуна, якщо при пускові обмотку статора з'єднати зіркою замість трикутника?
7. На скільки відсотків зменшаться початковий пусковий і максимальний моменти, якщо напруга на обмотці статора двигуна зменшиться на 10%?
8. Які переваги і недоліки має асинхронний двигун з короткозамкненим ротором в порівнянні з асинхронним двигуном з фазним ротором?
9. Як можна регулювати швидкість обертання ротора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором?

Лабораторна робота №5

Підвищення коефіцієнта потужності споживачів електроенергії

Мета роботи: ознайомитися з підвищенням коефіцієнта потужності споживача електричної енергії активно-індуктивного характеру з допомогою конденсаторів; навчитись визначати коефіцієнт потужності електроустановки і величину компенсуючої ємності конденсаторної батареї для підвищення коефіцієнта потужності установки.

Основні теоретичні положення

Електротехнічні пристрої, по відношенню до живлячих їх мереж виступають як активні або реактивні навантаження. Активно-індуктивні приймачі вважають споживачами реактивної енергії і характеризують додатною реактивною потужністю Q_L , а приймачі, що мають ємнісний характер – генераторами реактивної потужності і характеризуються від'ємною реактивною потужністю Q_C .

Відношення активної потужності P електроустановки до повної потужності S називають коефіцієнтом потужності $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}}. \quad (5.1)$$

Багато електричних пристроїв мають велику індуктивну складову струму, тобто великий кут φ зсуву між напругою і струмом. Це призводить до погіршення $\cos\varphi$ в електротехнічних пристроях, відповідно і коефіцієнта потужності промислового підприємства взагалі. Низьке значення $\cos\varphi$ призводить до поганого використання генераторів і ліній електропередач, які без користі завантажуються реактивним (індуктивним) струмом. Останній збільшує втрати електричної енергії в обмотках двигунів, генераторів, трансформаторів, в провідниках ліній електропередач тощо. Для збільшення $\cos\varphi$ і розвантаження електричного обладнання від реактивної потужності, необхідно ввімкнути паралельно електротехнічному пристрою батарею конденсаторів.

Представимо однофазний приймач у вигляді заступної схеми, що наведена на рисунку 5.1.

Як видно з векторної діаграми, реактивний (ємнісний) струм I_C батареї конденсаторів компенсує частину реактивного (індуктивного) I_{PI} споживача. Коефіцієнт потужності після підключення батареї конденсаторів збільшується ($\cos\varphi > \cos\varphi_{PI}$).

Як правило, проводять неповну компенсацію кута зсуву фаз, $\cos\varphi=0,95-0,98$, так як при $\cos\varphi = 0,95$ $I_{PI} \approx \sqrt{I_{AI}^2 + I_{PI}^2} \approx I_{AI}$.

Повна ж компенсація реактивного струму потребує додаткової установки конденсаторів, що не завжди оправдовує себе з економічної точки зору.

Якщо відомо струм I_{II} приймача, коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{II}$, то необхідне значення ємності C конденсатора можна визначити за формулою

$$C = \frac{P}{\omega \cdot U^2} (tg\varphi_{II} - tg\varphi), \quad (5.2)$$

де $P = U \cdot I_A$ – активна потужність приймача.

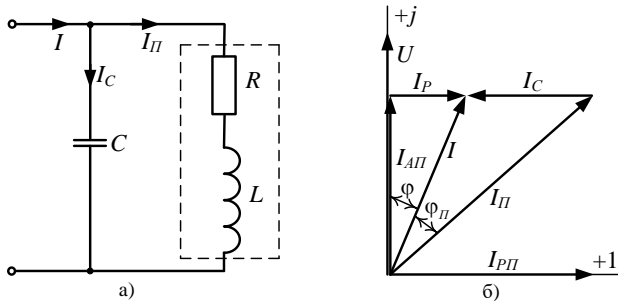


Рисунок 5.1 – Заступна схема а) і векторна діаграма б) активно-індуктивного приймача

Найбільш поширеним трифазним споживачем реактивної потужності є асинхронний двигун. Підвищення $\cos\varphi$ асинхронних двигунів покращує роботу генераторів, трансформаторів і електричних мереж, зменшуючи їхні навантаження реактивною потужністю. Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$ асинхронного двигуна завжди менший за одиницю і в сучасних двигунах досягає величини 0,75-0,95. Це означає, що споживаний асинхронним двигуном реактивний струм складає від 66% до 32% його номінального струму.

З векторної діаграми асинхронного двигуна рисунку 5.2 видно, що кут φ між прикладеною напругою U_1 і струмом статора I_1 залежить від навантаження.

При неробочому ході двигуна струм неробочого ходу I_{10} залежно від величини повітряного проміжку складає по величині 20-50% номінального струму. В цьому режимі роботи асинхронний двигун є споживачем порівняно великої реактивної потужності, оскільки при номінальній напрузі збудження обертове магнітне поле максимальної величини при незначній активній потужності, яка витрачається тільки на покриття невеликих електричних, магнітних і механічних (тертя в підшипниках і тертя ротора в повітря) втрат в двигуні. Тому при роботі двигуна в неробочому ході $\cos\varphi_1$ знаходиться в межах 0,1-0,25, тобто кут зсуву фаз між струмом I_{10} неробочого режиму і напругою мережі U_1 близько до 90° .

Зі зростанням навантаження двигуна споживана ним активна потужність збільшується, а реактивна практично залишається постійною, так як при незмінній напрузі мережі магнітне поле зберігає таку саму величину, що й

при неробочому режимі. Отже, зі збільшенням навантаження двигуна його коефіцієнт потужності також зростає і досягає свого максимального значення (0,75-0,95) при номінальному навантаженні.

Залежності коефіцієнта потужності асинхронного двигуна від коефіцієнта завантаження $\beta = I_2 / I_{2\text{НОМ}}$ зображена на рисунку 5.3.

Для підвищення $\cos\phi$ асинхронного двигуна перш за все слід правильно вибрати двигун за потужністю і повністю його завантажувати (уникати тривалого неробочого режиму), слідкувати щоб потужність пристрою, що вводиться в роботу, незначно відрізняється від номінального значення. Підвищення $\cos\phi_1$ досягається штучно компенсацією кута зсуву фаз. Так, наприклад, при роботі двигуна з значним недовантаженням ($P_2 < P_{\text{НОМ}}$) знижують напругу статорної обмотки, зменшуючи тим самим магнітний потік, а відтак, і реактивну потужність. З метою підвищення коефіцієнта потужності застосовують конденсатори або синхронні компенсатори.

Розрахункові формули для визначення ємності батареї конденсаторів, необхідної для підвищення коефіцієнта потужності трифазного споживача мають вигляд:

а) при з'єднанні конденсаторів трикутником

$$C = \frac{P}{3 \cdot \omega \cdot U^2} (\operatorname{tg}\phi_{\text{II}} - \operatorname{tg}\phi), \quad (5.3)$$

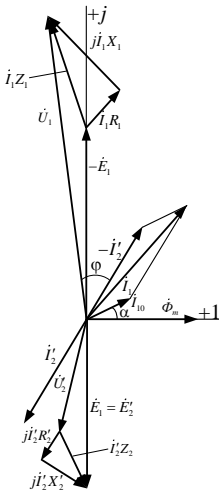


Рисунок 5.2 – Векторна діаграма асинхронного двигуна при навантаженні

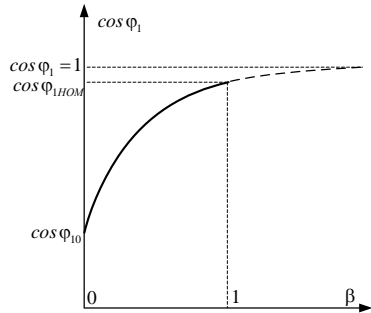


Рисунок 5.3 – Залежність $\cos\phi_1$ асинхронного двигуна від коефіцієнта навантаження

б) при з'єднанні конденсаторів зіркою

$$C = \frac{P}{\omega \cdot U^2} (tg\varphi_{II} - tg\varphi), \quad (5.4)$$

де C – ємність конденсаторів однієї фази; ω – кутова частота напруги $\omega = 2\pi \cdot f$; φ_{II} – кут зсуву фаз між напругою і струмом споживача до підключення конденсаторів; φ – кут зсуву фаз між напругою і струмом споживача після підключення конденсатора.

Кут зсуву фаз трифазного приймача визначають за формулою

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1} = \frac{P_1}{S}, \quad (5.5)$$

де P_1 – споживана з мережі активна потужність; U_1, I_1 – лінійні напруга і струм.

Повна S і реактивна Q потужності визначаються з виразів:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_1 I_1; \quad Q = \sqrt{3} \cdot U_1 I_1 \sin\varphi. \quad (5.6)$$

Зміст і порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з електровимірювальними приладами і обладнанням, записати їхні технічні дані в звіт про роботу.
2. Скласти електричне коло, схема якого наведена на рисунку 5.4.
3. Виміряти потужність, напругу і струми в колі без компенсації реактивної потужності (P_2 – розімкнений) і з компенсацією (P_2 – замкнений), встановивши попередньо розраховане значення ємності, необхідної для компенсації кута φ зсуву при якому $\cos\varphi = 0,95$. Результати вимірювань занести в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Підвищення коефіцієнта потужності однофазного приймача електричної енергії

Дані спостережень						Результати обчислень						
Схема	P_{II}	I_{II}	I	I_C	U	S	Q_{II}	Q_C	Q	$\cos\varphi$	C $\cos\varphi=0,9$	C $\cos\varphi=1$
	Вт	А	А	А	В	ВА	ВАр	ВАр	ВАр	-	Ф	Ф
без компенсації												
з компенсацією												

4. Скласти електричне коло, схема якого наведена на рисунку 5.5.

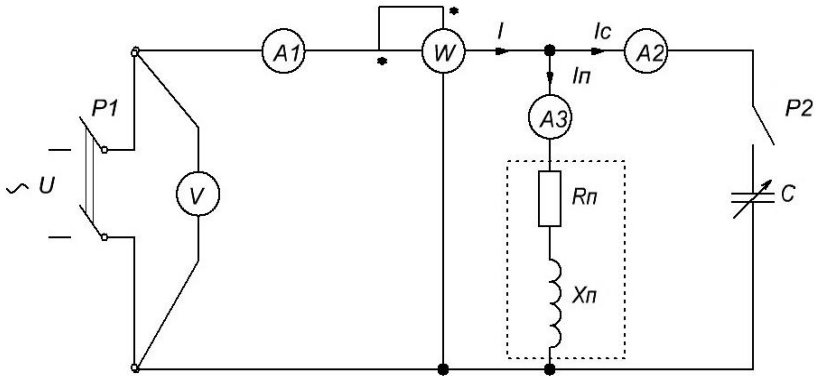


Рисунок 5.4 – Схема електричного кола для підвищення коефіцієнта потужності приймача електричної енергії

5. Зняти покази приладів при ввімкнених і вимкнених конденсаторах при неробочому ході і навантаженні асинхронного двигуна. Результати вимірювань занести в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Підвищення коефіцієнта потужності трифазного приймача електричної енергії.

Дані спостережень									Результати обчислень					
Схема включення	U_L	I_L	P_1	P_2	I_L	I	I_C	S	P	$\cos\varphi$	C	Q_L	Q_C	Q
	В	А	Вт	Вт	А	А	А	ВА	Вт	-	Ф	ВАр	ВАр	ВАр
Неробочий хід без C														
Неробочий хід з C														
Навантаження без C														
Навантаження з C														

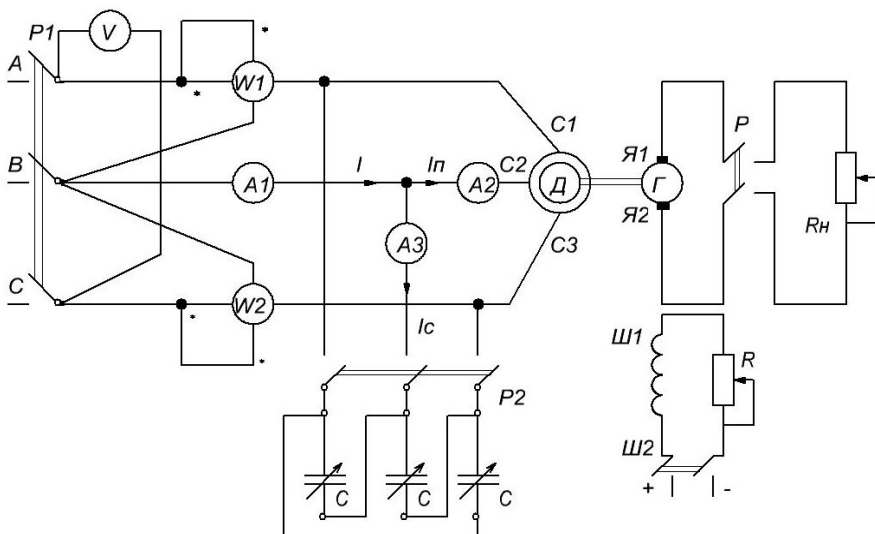


Рисунок 5.5 – Підвищення коефіцієнта потужності трифазного приймача електричної енергії

Аналіз і обробка результатів експерименту

1. Здійснити розрахунок величин наведених в таблицях 5.1, 5.2.
2. Здійснити аналіз результатів розрахунку і експерименту, в якому вказати: з якою метою підвищують коефіцієнт потужності електроустановок, від яких величин він залежить, яку користь і які затрати маємо при підвищенні коефіцієнта потужності електроустановок за допомогою конденсаторів.

Контрольні запитання

1. Як визначається коефіцієнт потужності електроустановки?
2. Чому прагнуть експлуатувати електроустановки при більшому значенні коефіцієнта потужності?
3. Як змінюється коефіцієнт потужності асинхронного двигуна при переході від неробочого ходу до номінального навантаження?
4. Чому конденсатори, що вмикаються електричне коло для підвищення $\cos\varphi$ трифазного споживача, з'єднуються трикутником?
5. Які існують способи підвищення $\cos\varphi$ установки?
6. Як повинен бути коефіцієнт потужності в електротехнічних установках згідно правил?
7. Чому для компенсації реактивної потужності конденсатори вмикають не послідовно, а паралельно до споживача?
8. За якими формулами розраховується величина ємності необхідна для отримання заданого $\cos\varphi$?

Лабораторна робота №6

Дослідження трифазного явнополюсного синхронного генератора, що працює на автономне навантаження

Мета роботи: вивчення будови трифазного явнополюсного синхронного генератора, зняття основних характеристик генератора при його роботі на автономне навантаження.

Основні теоретичні положення

Електрична машина змінного струму, в якій в усталеному режимі швидкість обертання ротора дорівнює швидкості обертання магнітного поля, що створюються струмами трифазної обмотки статора, називається синхронною.

Синхронні машини використовуються в якості генераторів електричної енергії, електродвигунів і синхронних компенсаторів, що призначені для покращення коефіцієнта потужності електротехнічних пристроїв. Синхронні машини використовуються в основному в якості промислових генераторів електричної енергії потужністю до 1500 МВА на електростанціях і значно меншої потужності в автономних електроенергетичних установках. Синхронні двигуни не отримали такого широкого розповсюдження як асинхронні і їх, як правило, застосовують в установках середньої і великої потужності (декілька десятків мегават), що не потребують електричного регулювання швидкості і пусків.

Основними частинами синхронної машини є: нерухома частина статора (якір) і рухома частина – ротор (індуктор). Статор синхронної машини (рис.6.1) має таку ж будову як і статор асинхронної машини. Він складається з сталюого або чавунного корпусу 1, в якому закріплений циліндричний сердечник 2 статора, що набраний з ізолюваних одна від одної пластин електротехнічної сталі. В пазах сердечника статора з внутрішньої сторони укладена трифазна обмотка 3, яка виготовляється з таким же числом пар полюсів як і ротор. Фазні обмотки можна з'єднувати зіркою або трикутником, що дає можливість отримати від генератора дві різні напруги, наприклад, 127 В і 220 В або 220 В і 380 В.

Початок фазних обмоток, що позначаються C_1 , C_2 , C_3 і їхні кінці, що позначаються C_4 , C_5 , C_6 , виводяться до затискачів клемної коробки, яка закріплена на зовнішній поверхні статора. До цих затискачів під'єднується зовнішнє коло. В підшипникових щитах, закріплених з торцевих сторін до корпусу, розміщені підшипники з валом 4 ротора.

Ротор синхронної машини має обмотку збудження, що живиться через два контактних кільця 5 і нерухомі щітки 6 постійним струмом. Призначення обмотки збудження – створення в машині первинного магнітного поля. Затискачі виводів обмотки ротора позначаються I_1 , I_2 . Джерелом постійного струму найчастіше використовуються генератор постійного струму – збудник, що встановлюється, як правило, на одному валу з генератором і приво-

дяться в рух тим же двигуном, що й синхронний генератор. Потужність збудника складає (0,25-3)% від потужності синхронної машини.

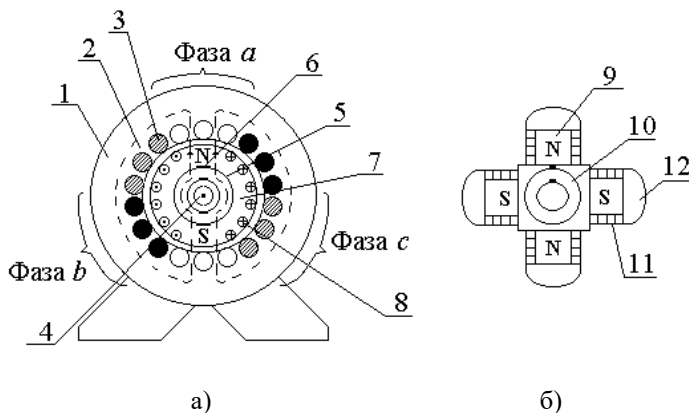


Рисунок 6.1 – Будова синхронної машини з неявно вираженими полюсами (а) і ротор машини з явновираженими полюсами (б)

Ротори синхронних генераторів бувають двох типів – з неявновираженими полюсами (рис.6.1, а) і явно вираженими полюсами (рис.6.1, б). Неявнополюсний ротор має форму циліндричного сердечника 7, виготовленого з суцільної сталеві поковки. Обмотка збудження 8 закладається в пазах сердечника ротора. Така конструкція забезпечує високу механічну міцність ротора і використовується у генераторі з великим числом обертів ротора (3000 об/хв або 1500 об/хв). Ці генератори приводяться в рух паровими або газовими турбінами, а тому їх називають турбогенераторами.

Явно виражені полюси 9 виготовляють з окремих сталевих листів і закріплюються на ободі 10 ротора. Обмотку збудження 11 виготовляють у вигляді котушок, що насаджуються на явно виражені полюси і з'єднуються між собою так, щоб північні і південні полюси чергувалися. Така конструкція ротора використовується в тихохідних генераторах. Їх з'єднують з тихохідними двигунами – гідротурбінами або двигунами внутрішнього згорання і називають відповідно гідрогенераторами або дизель-генераторами.

Для отримання в обмотці статора синусоїдної електрорушійної сили, при виготовленні синхронних машин приймаються міри для того, щоб розподіл індукції поля збудження вздовж кола статора був якомога ближчим до синусоїдного. В машинах з явно вираженими полюсами це досягається вибором відповідної форми полюсних наконечників 12, а в машинах з неявно вираженими полюсами – за рахунок розподілу обмотки збудження в пазах сердечника ротора.

Якщо обмотку збудження під'єднати до джерела постійного струму і ротор синхронного генератора привести в рух з швидкістю n об/хв, то магнітний потік Φ_0 обмотки збудження, що обертається разом з ротором, буде перетинати провідники обмотки статора і в результаті цього в трьох фазних обмотках статора будуть індукуватися три однакових за амплітудою електро-рушійні сили частотою:

$$f = \frac{pn}{60}, \quad (6.1)$$

де p – число пар полюсів.

Для отримання стандартної частоти 50 Гц при різних швидкостях обертання ротора синхронні генератори виготовляються з різними числами пар полюсів.

Діюче значення електрорушійної сили, що генерується в кожній фазі якоря синхронного генератора можна визначити як і в асинхронній машині за формулою:

$$E_0 = 4,44wk_{об}\Phi, \quad (6.2)$$

де $k_{об}$, w – обмотковий коефіцієнт і число витків обмотки статора.

При неробочому ході генератора струм обмотки статора дорівнює нулю, тому фазна напруга генератора дорівнює E_0 . Оскільки $\Phi = f(I_{зб})$, то

$$E_0 = f(I_{зб}). \quad (6.3)$$

Залежність (6.3), яка знята для декількох значень струму збудження $I_{зб}$ при постійній швидкості обертання ротора називається характеристикою неробочого ходу (рис.6.2). При $I_{зб} = 0$ генератор має невеликий потік $\Phi_{зал}$ залишкового намагнічування і відповідну йому електрорушійну силу $E_{зал}$, що складає 2-6% від номінальної. Із збільшенням струму $I_{зб}$ спочатку спостерігається швидке збільшення магнітного потоку і електрорушійної сили. В міру насичення магнітного кола темп зростання магнітного потоку і ЕРС знижується. Кожному значенню струму $I_{зб}$ при його зменшенні, внаслідок гістерезису, відповідає дещо більше значення потоку і ЕРС, ніж при збільшенні струму $I_{зб}$. Крива, що розміщена між низхідною і висхідною кривими характеристики неробочого ходу (пунктирна лінія), називається розрахунковою характеристикою неробочого ходу. Вона відповідає кривій намагнічування магнітної системи синхронної машини.

Після під'єднання трифазної обмотки якоря до навантаження, під дією ЕРС в фазах обмотки якоря і споживача виникнуть струми. Обмотка статора створить таке ж за своїм характером обертове магнітне поле, як і обмотка статора асинхронної машини. Це поле статора обертається в напрямку обертання ротора із швидкістю, що дорівнює швидкості обертання ротора. Вна-

слідок цього магнітні поля нерухокої обмотки якоря і рухокої обмотки збудження є нерухомими одне відносно одного і знаходяться в постійній взаємодії. Дія магнітного поля обмотки якоря на магнітне поле збудження називається реакцією якоря. Результируючий магнітний потік Φ , що відповідає магнітним потоком збудження Φ_0 і потоку якоря $\Phi_{\text{я}}$

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_{\text{я}}. \quad (6.4)$$

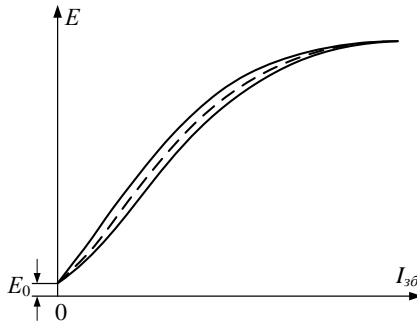


Рисунок 6.2 – Характеристика неробочого ходу синхронного генератора

Найпростіша схема вмикання синхронного генератора на автономне навантаження $Z = R_n + jX_n$ наведена на рисунку 6.3.

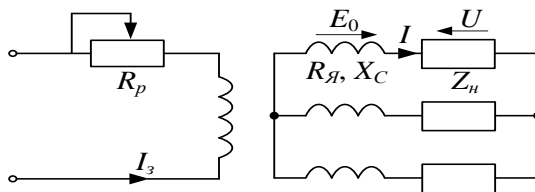


Рисунок 6.3 – Схема вмикання синхронного генератора на автономне навантаження

Розглянемо спочатку реакцію якоря для випадків, коли відносно електрорушійної сили E_0 , що індукуються магнітним потоком обмотки збудження, струм I якоря є чисто активним, індуктивним і ємнісним. Для наглядності будемо мати на увазі двополосну машину.

Нехай кут зсуву фаз між струмом якоря I та ЕРС E_0 дорівнює нулю (активне навантаження). Напрямок струмів фаз можна встановити за правилом правої руки. В положенні ротора, що зображено на рисунку 6.4, а напрямки струмів фаз показані хрестиками (від спостерігача) і крапки (до спостерігача). Такий напрям струмів створює магнітне поле реакції якоря, магнітні силові лінії якого, як зображено на рисунку 6.4, а направлені поперек повздожньої

осі полюсів. В теорії синхронних машин вісь, що направлена за віссю симетрії полюсів, називають повздожньою і позначають буквою d , а вісь, що відстає від неї на кут 90 електричних градусів, називають поперечною і позначають буквою q .

Отже, магнітний потік $\Phi_{я}$ реакції якоря діє в напрямку поперечної осі. Слід відмітити, що така дія магнітного поля реакції якоря зберігається при будь-якому положенні рухомого ротора, так як ротор і поле реакції якоря обертаються синхронно.

Поперечна реакція якоря викликає спотворення кривої поля в повітряному проміжку. Поперечне поле реакції якоря відхиляє результуюче поле від повздожньої осі в генераторному режимі в сторону протилежну обертанню якоря послаблює магнітний потік на набігаючому краю полюсного наконечника і підсилює його на збігаючому.

Якщо струм якоря I відстає від ЕРС E_0 на кут 90^0 (індуктивне навантаження), то максимум струму у фазі A настає порівняно з попереднім випадком на четвертину періоду пізніше, коли ротор повернеться на 90^0 (рис.6.4, б). Струми фаз в даному випадку мають такі ж значення як і на рисунку 6.4, а, отже і орієнтація магнітного потоку якоря в просторі є такою ж. Як видно з рисунка 6.4, б, при відстаючому на кут 90^0 струмі, реакція якоря діє в напрямку повздожньої осі і є за відношення до поля збудження чисто розмагніченою.

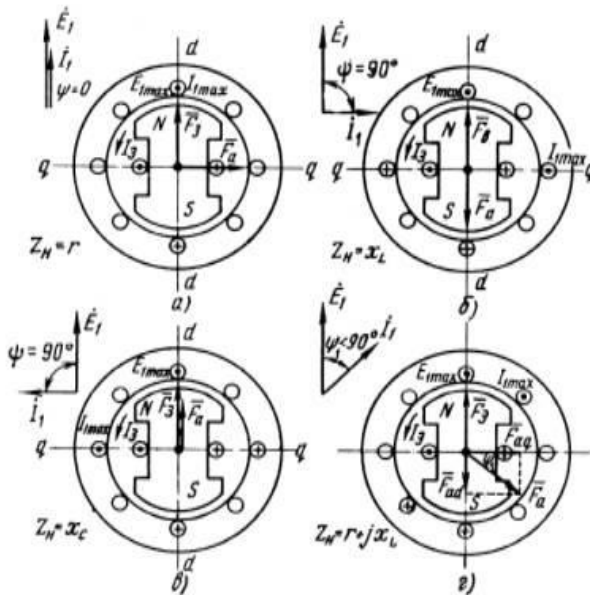


Рисунок 6.4 – До вияснення дії реакції якоря при активному (а), індуктивно-му (б), ємнісному (в) і активно-індуктивному (г) навантаженнях

На рисунку 6.4, в зображена картина магнітного поля реакції якоря, коли струм I випереджує ЕРС E_0 на кут 90° (ємнісне навантаження). Максимум струму в фазі A настає порівняно з випадком зображеним на рисунку 6.4, а на четвертину періоду раніше і в цей момент часу ротор займає по відношенню до рисунка 6.4, а положення, що повернуте на 90° проти напрямку обертання. Струми фаз на рисунку 6.4, в мають таке ж значення як і на рисунку 6.4, а. З рисунка 6.4, в видно, що при випереджаючому на кут 90° струмі реакція якоря також як і в попередньому випадку діє в напрямку поздовжньої осі, але є по відношенню до магнітного поля збудження чисто намагнічуючою, тобто вона збільшує магнітний потік в напрямку поздовжньої осі синхронної машини.

В загальному випадку, коли струм I не співпадає по фазі з електрорушійною силою і не зсунутий відносно неї на кут 90° має місце поперечна і поздовжня (розмагнічуюча або підмагнічуюча) складові реакції якоря.

Для виявлення властивостей і характеристик синхронного генератора необхідно мати рівняння електричної рівноваги і векторні діаграми кола якоря при різних навантаженнях генератора.

З метою спрощення аналізу роботи синхронного генератора розглянемо синхронну машину з неявно вираженими полюсами і ненасиченим магнітним колом.

При складанні рівнянь необхідно врахувати наступне:

1. Обертовий момент магнітний потік Φ_0 обмотки збудження в кожній фазі якоря індукує ЕРС E_0 .

2. Обмотка якоря характеризується активним R_J та індуктивним X_J опорами. Струм I , що протікає по обмотці якоря, створює спад напруги $I \cdot R_J$ на активному і спад напруги $I \cdot X_J$ на індуктивному опорах.

3. Аналогічно трансформатору і асинхронному двигуну обмотка якоря синхронної машини має потік Φ_σ розсіяння, що індукує в обмотці якоря ЕРС самоіндукції E_σ , яку можна замінити спадом напруги в деякому штучно введеному індуктивному опорі X_σ , що зумовлений потоком розсіяння ($E_\sigma = I \cdot X_\sigma$).

4. Необхідно врахувати явище реакції якоря із-за якого обертовий магнітний потік Φ машини при навантаженні відрізняється від потоку Φ_0 , отже і ЕРС обмотки якоря при навантаженні відрізняється від E_0 . Залежно від характеру навантаження синхронного генератора реакція якоря, як уже відзначалося вище, проявляє себе по різному. Прийняте для спрощення аналізу роботи синхронного генератора допущення про те, що сердечник статора і ротора при будь-яких режимах роботи залишається ненасиченим, дає можливість розглядати результуючий обертовий магнітний потік Φ синхронної машини як наслідок накладання двох магнітних потоків – потоку Φ_0 збудження і потоку Φ_J реакція якоря прямопропорційних намагнічуючим силам відповідно обмоток збудження і якоря. Окреме існування потоків Φ_J і Φ_0 можна врахувати ввівши в рівняння електричної рівноваги фази якоря електрорушійну силу самоіндукції якоря $E_J = I \cdot X_J$, що зумовлена магнітним потоком Φ_J .

З урахуванням вищесказаного для будь-якої фази обмотки якоря (рис.6.3) можна записати таке рівняння

$$\dot{E}_0 = \dot{I}R_0 + j\dot{I}X_{\mathcal{Я}} + j\dot{I}X_{\sigma} + \dot{U} = \dot{I}R_{\mathcal{Я}} + j\dot{I}X_C + \dot{U}, \quad (6.5)$$

де $X_C = X_{\sigma} + X_{\mathcal{Я}}$ – синхронний індуктивний опір, який за прийнятих допущень можна вважати постійним при будь-яких навантаженнях синхронного генератора.

При якісному аналізі явищ в синхронних машинах опір $R_{\mathcal{Я}}$ можна не враховувати оскільки $R_{\mathcal{Я}} \ll X_C$, тоді рівняння (6.5) запишеться у вигляді

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}X_C + \dot{U}. \quad (6.6)$$

Представимо напругу генератора як:

$$\dot{U} = \dot{I}\underline{Z}_H = \dot{I}R_H + j\dot{I}X_H \quad (6.7)$$

і підставимо в рівняння (6.6)

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}X_C + \dot{I}R_H + j\dot{I}X_H. \quad (6.8)$$

З рівнянь (6.6) і (6.8) отримаємо вираз для визначення струму і напруги генератора

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0}{R_H + j(X_C + X_H)}; \quad \dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}X_C. \quad (6.9)$$

Активна потужність P_{Ψ} , що виробляється генератором, і активна потужність P_{Φ} , що віддається ним споживачу визначаються за формулами:

$$P_{\Psi} = 3\dot{E}_0\dot{I}\cos\varphi; \quad P_{\Phi} = 2\dot{U}\dot{I}\cos\varphi, \quad (6.10)$$

де $\varphi = \arctg\left(\frac{X_H}{R_H}\right)$, $\psi = \arctg\left(\frac{X_H + X_C}{R_H}\right)$.

Потужність P_{Ψ} відрізняється від потужності P_{Φ} на величину втрат потужності $\Delta P_{\mathcal{Я}} = 3I^2R_{\mathcal{Я}}$ в активному опорі обмотки якоря.

Для вивчення впливу зміни навантаження синхронного двигуна на зміну напруги необхідно побудувати векторні діаграми кола якоря генератора при різних навантаженнях.

Побудову векторної діаграми, що відповідає рівнянню (6.6), необхідно почати з побудови вектора ЕРС E_0 (рис.6.5, а). Потім під кутом ψ до вектора \dot{E}_0 відкладаємо вектор струму \dot{I} . З урахуванням характеру навантаження генератора, наприклад, активно-індуктивного, під кутом φ до вектора струму

І необхідно провести лінію OB , на якій буде розміщений вектор \dot{U} (рис.6.5, а). З кінця вектора \dot{E}_0 опускаємо перпендикуляр на вектор струму \dot{I} до перетину з прямою OB в точці K , яка визначить кінець і початок векторів напруги і спаду напруги \dot{IX}_c . Згідно (6.6) сума векторів \dot{U} і \dot{IX}_c дорівнює вектору \dot{E}_0 .

Кут θ між векторами \dot{E}_0 і \dot{U} називається кутом навантаження. У режимі генератора вектор \dot{E}_0 завжди випереджує вектор \dot{U} і кут θ при цьому вважається додатнім. Назва цього кута походить від того, що його величина залежить від навантаження генератора.

На рисунку 6.5, б, в, г зображені векторні діаграми синхронного генератора при його роботі на активне, активно-емнісне навантаження і неробочому ході. Порядок побудови цих векторних діаграм такий же, як і для активно-індуктивного навантаження.

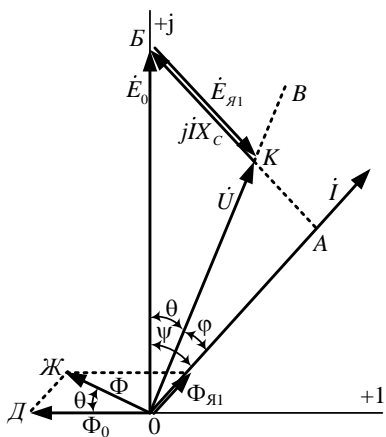
На векторних діаграмах зображені вектори магнітних потоків $\dot{\Phi}_0$, $\dot{\Phi}_я$, $\dot{\Phi}$ пов'язані між собою рівнянням (6.4).

Основними характеристиками синхронного генератора в режимі навантаження є зовнішня і регульовальна. Ці характеристики можна отримати розрахунковими або дослідним шляхом.

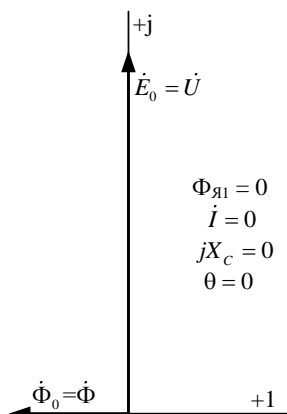
Зовнішньою характеристикою називається залежність напруги на затискачах генератора від струму якоря $U = f(I)$ при постійних струмі збудження, швидкості обертання і куту навантаження. Вона показує зміну напруги на затискачах генератора при збільшенні струму навантаження, якщо струм збудження і характер навантаження постійний. Сімейство зовнішніх характеристик при різних кутах навантаження зображено на рисунку 6.6.

Вигляд зовнішніх характеристик синхронного генератора пояснюється характером дії реакції якоря. При активно-індуктивному навантаженні ($\varphi > 0$) існує значна повздовжня розмагнічуюча реакція якоря, яка зростає із збільшенням струму навантаження I , і тому напруга U зі збільшенням струму I зменшується. При чисто активному навантаженні ($\varphi = 0$) розмагнічуючий ефект реакції якоря менший і зменшення напруги U зі збільшенням струму I відбувається повільніше.

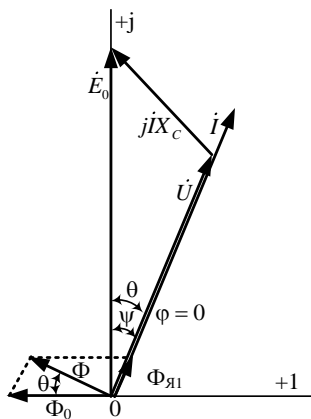
Регульовальною характеристикою синхронного генератора називається залежність струму збудження від струму якоря $I_{зб} = f(I)$ при постійних напрузі, кутовій швидкості обертання ротора і куту навантаження. Вона показує, як потрібно регулювати струм збудження $I_{зб}$, щоб при зменшенні опору навантаження напруга U залишалась незмінною. Сімейство регульовальних характеристик синхронного генератора при різних кутах навантаження зображено на рисунку 6.7.



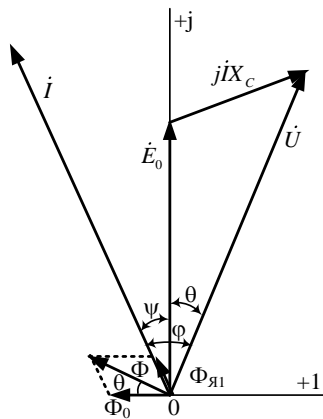
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6.5 – Векторні діаграми синхронного генератора для режимів:

а) активно- індуктивного навантаження ($Z_H = R + jX_L$) ;

б) при роботі генератора в режимі неробочого ходу ($Z_H = \infty$) ;

в) активного навантаження ($Z_H = R$) ;

г) активно-емнісного навантаження ($Z_H = R - jX_C$)

Таким чином найбільш різке зниження напруги буде відбуватися при чисто індуктивному навантаженні ($\varphi = 90^\circ$), найменш різке – при активному навантаженні ($\varphi = 0$). При активно-емнісному навантаженні виникає повздовжня намагнічуюча реакція якоря і тому зі збільшенням струму I напруга U зростає.

Вигляд регулювальних характеристик пояснюється дією реакції якоря. При активно-індуктивному навантаженні ($\varphi > 0$) реакція якоря має розмагнічуючий характер і для підтримки постійної напруги необхідно збільшувати струм збудження. Найбільше збільшення струму збудження необхідне при чисто індуктивному навантаженні ($\varphi = 90^\circ$), найменше – при чисто активно-навантаженні ($\varphi = 0$). При активно-ємнісному навантаженні ($\varphi < 0$) реакція якоря намагається збільшувати магнітний потік Φ , отже і напруги U . Тому, для збереження постійної напруги U необхідно із збільшенням струму якоря I зменшувати струм збудження $I_{зб}$.

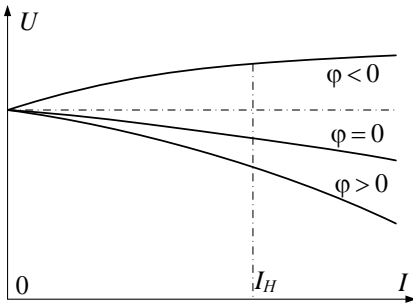


Рисунок 6.6 – Зовнішні характеристики синхронного генератора

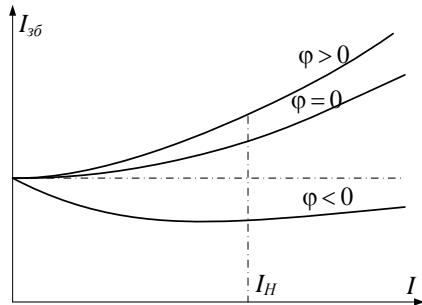


Рисунок 6.7 – Регулювальні характеристики синхронного генератора

Синхронні генератори, що працюють на автономне навантаження використовуються в електрифікованих пересувних установках, невеликих електростанціях і в інших випадках. На потужних електростанціях встановлюють, як правило, декілька генераторів які вмикають на паралельну роботу в загальну мережу. Об'єднання великої кількості генераторів і споживачів у загальну електричну систему значно вигідніше ніж виділення окремих генераторів для живлення автономних груп споживачів, так як при цьому підвищується надійність роботи електростанції, з'являється можливість проведення ремонту генераторів без відключення споживачів і маневрування енергоресурсами сезонного характеру.

Вмикання синхронних генераторів на паралельну роботу є досить відповідальним завданням, так як неправильна синхронізація генераторів може викликати суттєві пошкодження обладнання.

Тому при вмиканні генераторів на паралельну роботу повинні бути виконані наступні вимоги: напруга генератора повинна дорівнювати напрузі мережі, частота генератора повинна дорівнювати частоті мережі, чергування фаз генератора і мережі повинно бути однаковими, напруга генератора і мережі в момент вмикання повинна співпадати по фазі.

Завантаження синхронізованого з мережею генератора активною потужністю здійснюється шляхом збільшення обертового моменту, що прикла-

дається до валу генератора зі сторони первинного двигуна. Для завантаження генератора реактивною потужністю змінюють струм збудження генератора.

Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити будову, принцип дії і призначення окремих вузлів синхронної машини. Розглянути складові частини трифазного явнополюсного синхронного генератора на розбірних зразках.
2. Ознайомитися з електровимірвальними приладами і обладнанням досліджувальної електроустановки.
3. Скласти електричне коло, схема якого наведена на рисунку 6.8.
4. Зняти характеристику неробочого ходу, зовнішню і регульовальну характеристики. Результати вимірювань занести в таблиці 6.1, 6.2, 6.3.

Таблиця 6.1 – Характеристика неробочого ходу

№ досліджу	1	2	3	4	5	6	7	8
Висхідна	$I_{3\phi}$, А							
	U , В							
Низхідна	$I_{3\phi}$, А							
	U , В							

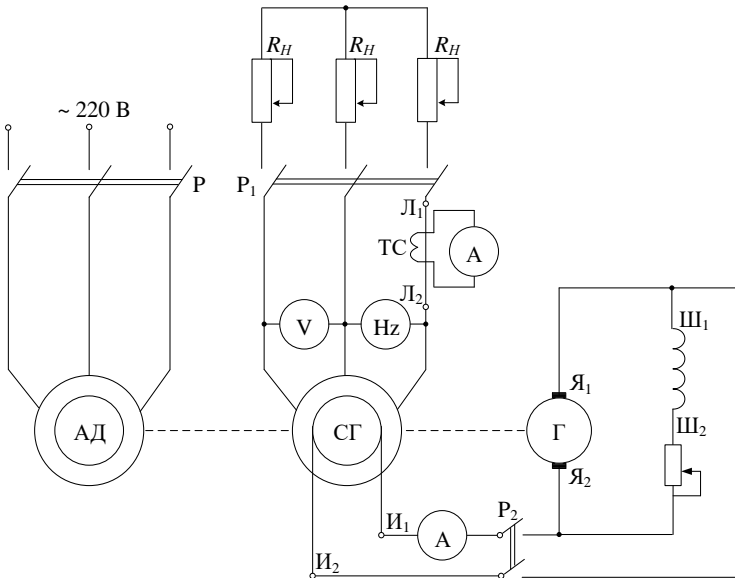


Рисунок 6.8 – Схема експериментальної установки для дослідження синхронного генератора, що працює на автономне навантаження

Таблиця 6.2 – Зовнішня характеристика

№ досліду	1	2	3	4	5	6	7	8
I, A								
U_d, B								
U_ϕ, A								

Таблиця 6.3 – Регульовальна характеристика

№ досліду	1	2	3	4	5	6	7	8
I, A								
I_3, A								

Аналіз і обробка результатів експерименту

1. Дослідження синхронного генератора в режимі неробочого ходу здійснюється при розімкненому рубильнику P_1 . Перший відлік показів вольметра при знятті характеристики неробочого ходу синхронного генератора відбувається при розімкненому рубильнику P_2 ($I_{3\phi} = 0$). При цьому ЕРС в обмотці якоря наводиться полем залишкового магнетизму. Заклавши рубильник P_2 , поступово збільшуємо струм збудження синхронного генератора шляхом зменшення опору R_p регульовального реостату в колі збудження збудника до такого, при якому $U = 1,2U_H$. Щоб запобігти впливу гістерезису, повзунк реостату необхідно переміщувати тільки в напрямі зменшення опору R_p . Результати вимірювань записати в перші дві стрічки таблиці 6.1.

Потім, змінюючи опір R_p тільки в напрямку збільшення, проводимо вимірювання величин $I_{3\phi}$ та U синхронного генератора. Результати вимірювань записати в дві нижні стрічки таблиці 6.1.

Побудувати в одному масштабі висхідну, низхідну, і усереднену криві характеристики неробочого ходу синхронного генератора.

2. Дослідження синхронного генератора, що працює автономно, в режимі навантаження відбувається при замкненому рубильнику P_1 . Переміщення повзунка реостату R_p встановлюється величина напруги на затискачах синхронного генератора, що дорівнює номінальній (при номінальній швидкості обертання ротора).

Зняття зовнішньої характеристики. За допомогою трифазного навантажувального реостату R_H змінюємо величину опору навантаження, зберігаючи при цьому незмінними струм збудження і частоту напруги синхронного генератора. Проводимо 6-8 відліків лінійної напруги U для різних значень струму в межах від $I = 0$ до $I = 1,2 I_H$. Величина I_H задається керівником занять. Результати вимірювань занести в таблицю 6.2.

Будуємо зовнішню характеристику $U = f(I)$ синхронного генератора і визначаємо величину зміни напруги

$$\Delta U = \frac{U_0 - U}{U_0} \cdot 100\%,$$

де U_0 , U – напруги на затискачах генератора при $I = 0$ та $I = I_H$.

Зняття регулювальної характеристики. Встановлюємо струм збудження такої величини, щоб при неробочому ході генератора (рубильник P_1 розімкнутий) напруга на його затискачах була номінальною. Замикаємо рубильник P_1 і збільшуємо навантаження генератора, при цьому струм збудження синхронного генератора змінюємо за допомогою реостата R_p так, щоб напруга на затискачах генератора не змінювалася. Результати вимірювань заносимо в таблицю б.3.

Будуємо регулювальну характеристику $I_{зб} = f(I)$ та визначаємо процентну зміну струму збудження

$$\Delta I_{зб} = \frac{I_{збH} - I_{зб0}}{I_{збH}} \cdot 100\%,$$

де $I_{збH}$, $I_{зб0}$ – струми збудження відповідно при номінальному навантаженні і відсутності навантаження.

3. Провести аналізи результатів експерименту і розрахунків.

Контрольні запитання

1. Будова, принцип дії і призначення трифазних синхронних генераторів.
2. Назвіть основні характеристики синхронного генератора.
3. На яких електростанціях використовують швидкохідні генератори, а на яких тихохідні? Чим це зумовлено?
4. За якою формулою визначається частота ЕРС синхронного генератора?
5. Що називається характеристикою неробочого ходу? Про які властивості синхронного генератора можна судити за цією характеристикою?
6. Графіком якої залежності є зовнішня характеристика?
7. Що таке регулювальна характеристика?
8. Як впливає реакція якоря при різних навантаженнях синхронного генератора на характер зовнішньої і регулювальної характеристик.
9. Яким чином досягається синусоїдний розподіл магнітного поля в повітряному проміжку уздовж розточки статора синхронної машини?
10. Як можна регулювати частоту і величину напруги синхронного генератора?
11. За якими формулами визначається активна, реактивна і повна потужності синхронного генератора, що працює на автономне навантаження?
12. Як проводиться побудова векторних діаграм синхронного генератора при активному, активно-індуктивному і активно-ємнісному навантаженнях?

Лабораторна робота № 7

Дослідження генератора постійного струму паралельного збудження

Мета роботи: вивчити будову і принцип роботи електричної машини постійного струму. Провести дослідження машини постійного струму в режимі генератора. Зняти основні характеристики генератора постійного струму паралельного збудження.

Основні теоретичні положення

Електрична машина постійного струму – це електромеханічний пристрій, який в генераторному режимі перетворює механічну енергію в електричну енергію постійного струму, а в режимі двигуна – енергію постійного струму в механічну енергію. Таким чином машини постійного струму можуть використовуватись як генератори і як двигуни. Будова генераторів і двигунів однакова (рис.7.1).

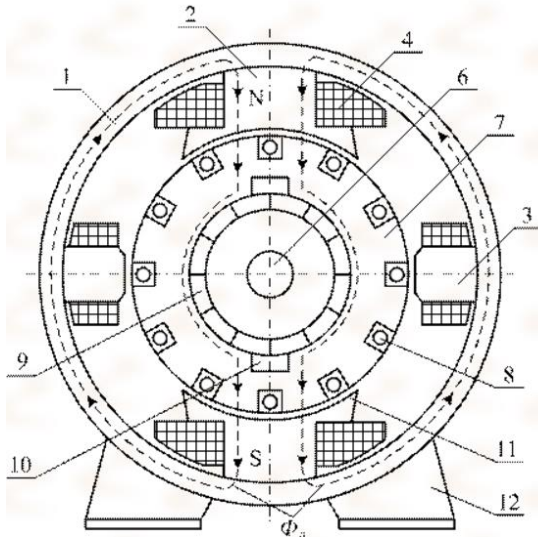


Рисунок 7.1 – Будова машини постійного струму

Нерухома частина машини, яка називається статором (індуктором), складається з циліндричної станини (ярма) 1, до якої болтами кріпляться головні полюси 2 і додаткові полюси 3. Для зменшення магнітних втрат (втрат потужності від вихрових струмів і на перемагнічування) головні полюси виготовляються з окремих сталевих пластин. Додаткові полюси виготовляються суцільними або також набираються з пластин. На сердечниках головних по-

люсів розміщені котушки обмоток збудження 4, на додаткових полюсах – котушки 5 обмоток додаткових полюсів.

До ярма з обох торців болтами кріпляться підшипникові щити, в яких розташовані підшипники, що несуть вал 6 обертової частини машини, яка називається якорем. На валу закріплене осердя 7 якоря, який для зменшення магнітних втрат набирається з ізолюваних одна від одної сталевих пластин. В пазах, розташованих на поверхні сердечника якоря, укладена обмотка 8.

Обмотки якоря, збудження і додаткових полюсів виготовляють з мідних ізолюваних проводів. Обмотка якоря складається з секцій, кінці яких приєднуються до розташованого на валу колектора 9, набраного із мідних пластин ізолюваних одна від одної.

Колектор – це циліндр, що складається з мідних пластин, ізолюваних одна від одної і від вала. До колектора за допомогою пружин притискаються графітні або вуглеграфітні, або металографітні щітки 10. Вони розташовані в щіткотримачах, закріплених на траверсі. Обмотка збудження машини живиться постійним струмом і призначена для створення основного магнітного поля, показаного на рисунку 7.1 умовно за допомогою двох ліній магнітної індукції (зображені штриховою лінією).

Головні полюси закінчуються полюсними наконечниками 11, що призначені для отримання на більшій частині окружності якоря однакового повітряного зазору між сердечником якоря і головними полюсами. Додаткові полюси призначені для зменшення іскріння під щітками.

За допомогою колектора і щіток обертова обмотка якоря з'єднується з зовнішнім електричним колом. При неробочому ході генератора магнітне поле і ньому утворюється тільки обмоткою збудження головних полюсів.

Якір генератора приводиться в рух за допомогою первинного двигуна (двигун внутрішнього згоряння, парова турбіна та ін.). При обертанні якоря в постійному магнітному полі (поле головних полюсів), секції обмотки якоря будуть пронизуватись змінним магнітним потоком, у відповідності з законом

електромагнітної індукції $\left(e = -W \frac{d\Phi}{dt} \right)$ в провідниках обмотки якоря буде наводитись змінна ЕРС, яка за допомогою колектора і щіток перетворюється в ЕРС постійного напрямку. Величина цієї ЕРС може бути визначена за формулою

$$E = C_E n \Phi, \quad (7.1)$$

де C_E – постійна величина, що залежить від конструктивних параметрів даної машини; n – число обертів якоря; Φ – магнітний потік головних полюсів.

Під'єднання до генератора навантаження викликає в колі якоря струм $I_{\text{я}}$ та відповідний спад напруги в колі якоря

$$\Delta U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (7.2)$$

Напруга на затискачах генератора менша, ніж ЕРС на величину спаду напруги в якорі

$$U = E - I_{я} R_{я} . \quad (7.3)$$

Таким чином, генератор постійного струму перетворює механічну енергію первинного двигуна в електроенергію постійного струму.

Властивості генератора постійного струму визначаються способом підключення обмоток збудження генератора. Якщо обмотки збудження живляться від стороннього джерела електричної енергії, генератор називається генератором незалежного збудження. В тих випадках, коли ці обмотки отримують живлення від цього ж генератора, він називається генератором з самозбудженням.

Обмотки збудження головних полюсів генераторів з самозбудженням мають виводи до відповідних затискачів машини і з'єднуються з колом якоря паралельно або послідовно. Виводи кола якоря позначаються Y_1 і Y_2 . Паралельні обмотки збудження мають більшу кількість витків і значний опір. Затискачі паралельних обмоток маркуються $Ш_1$ і $Ш_2$ під'єднуються до якоря паралельно.

Послідовні обмотки збудження мають малу кількість витків і незначний опір. Затискачі послідовних обмоток позначаються C_1 і C_2 і під'єднуються до якоря послідовно.

Обмотки додаткових полюсів мають невелику кількість витків, малий опір, виводи їх позначають D_1 і D_2 . Ці обмотки з'єднують послідовно з колом якоря так, щоб збуджене ними магнітне поле було зустрічне по відношенню до магнітного поля якоря в зоні щіток. В двополюсних машинах з одним додатковим полюсом, виводи Y_2 і D_1 з'єднуються між собою всередині машини, а назовні виводять тільки виводи Y_1 і D_2 . В чотириполюсних машинах обмотки однієї пари додаткових полюсів під'єднані до виводу, а другої пари – до виводу, в результаті чого назовні виходять тільки виводи D_1 і D_2 .

Згідно способу збудження (рис.7.2) розрізняють: 1) генератори незалежного збудження; 2) генератори паралельного збудження (шунтовий); генератори послідовного збудження (серієсні); 4) генератори змішаного збудження (компаундні).

Генератори паралельного, послідовного і змішаного збудження є генераторами з самозбудженням: енергія необхідна для збудження головних полюсів, поступає з якоря самого генератора.

Генератор паралельного збудження самозбуджується до включення навантаження – при неробочому ході.

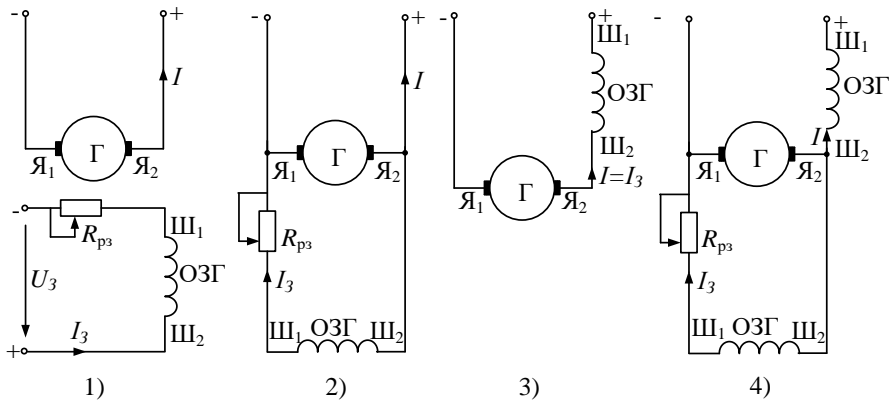


Рисунок 7.2 – Схеми збудження генераторів постійного струму:

- 1) генератор незалежного збудження; 2) генератор паралельного збудження;
- 3) генератор послідовного збудження; 4) генератор змішаного збудження

Умовами самозбудження є:

1. Генератор повинен мати магнітний потік залишкового намагнічування Φ_0 . Потік залишкового намагнічування, який складає (2-3)% від номінального потоку машини, зберігається в магнітному полі машини, якщо по обмотці збудження хоча б один раз (при випробуваннях на заводі) протікав струм.

2. Обмотка збудження повинна бути під'єднана до якоря так, щоб в ній утворювався магнітний потік, який співпадає по напрямку з потоками залишкового намагнічування Φ_0 .

3. Опір кола збудження повинен бути менший критичного.

При обертанні якоря генератора постійного струму самозбудження може не настати із-за відсутності залишкового намагнічування головних полюсів, обриву кола збудження, неправильного під'єднання обмоток збудження, підвищеного опору кола збудження, забруднення колектора, неправильного положення щіток на колекторі, а також внаслідок недостатньої частоти обертання якоря.

Якщо умови самозбудження будуть виконані, то при обертанні якоря на затискачах з'явиться напруга.

Робочі властивості генераторів прийнято аналізувати за допомогою графіків – характеристик, які можна зняти експериментально. Такими характеристиками є:

1. Характеристика неробочого ходу є залежністю ЕРС якоря E від струму збудження $I_{\text{зб}}$ при роботі генератора в режимі неробочого ходу при номінальній швидкості обертання і відсутності навантаження (струм навантаження $I = 0$)

$$E = f(I_{зб}) \text{ при } I = 0 \text{ при } n = n_{ном} = const.$$

Потужність, що споживається обмоткою збудження $P_{збн}$ і струм збудження $I_{збн}$ невеликі. Зазвичай вони складають: $P_{збн} = (2-5)\% P_{ном}$, $I_{збн} = (2-5)\% I_{ном}$, де $P_{ном}$ та $I_{ном}$ – номінальні потужність і струм якоря генератора; $P_{збн}$ та $I_{збн}$ – відповідно потужність і струм збудження при номінальному режимі.

В режимі неробочого ходу

$$U_0 = E - I_{я} R_{я}; \quad I_{я} = I + I_{зб}.$$

Спадом напруги $I_{я} R_{я}$ можна знехтувати. Тоді напруга на затискачах генератора в режимі неробочого ходу буде дорівнювати ЕРС генератора.

$$U_0 = E.$$

Характеристику неробочого ходу знімають наступним чином. Спочатку, для визначення границь збудження струму $I_{зб}$ генератор збуджуємо, змінюючи опір реостата збудження $R_{ш}$, до номінальної напруги. Величина ЕРС E_0 , що викликана магнітним потоком залишкового магнетизму, вимірюється при відключеній обмотці збудження. Вона складає $E_0 = (2-6)\% E_{ном}$, де $E_{ном}$ – номінальна ЕРС генератора.

Потім збільшуємо струм збудження на величину 10-15% від номінального і знімаємо точки характеристики $U_0 = E = f(I_{зб})$. Характеристику знімаємо до тих пір, поки напруга не перевищить номінальну на 20%. Після цього починаємо зменшувати струм збудження, одночасно фіксуючи напругу. Завдяки явищу гістерезису, при зменшенні струму збудження, характеристика пройде вище, ніж при його збільшенні. Струм збудження необхідно змінювати тільки в одну сторону: при збільшенні струму збудження – тільки збільшувати, а при зменшенні – тільки зменшувати. Характеристика неробочого ходу показана на рисунку 7.3. В якості розрахункової приймають характеристику 3, що розміщена між характеристиками 1 і 2. Точка А, яка відповідає номінальним даним генератора, розміщена на перегині характеристики неробочого ходу. Таку характеристику неробочого ходу називають практичною.

На рисунку 7.4 наведена повна характеристика неробочого ходу, що має вигляд петлі гістерезису. Ця характеристика знімається в заводських умовах для повністю розмагніченої машини із змінною струму збудження як в область додатних, так і в область від'ємних значень.

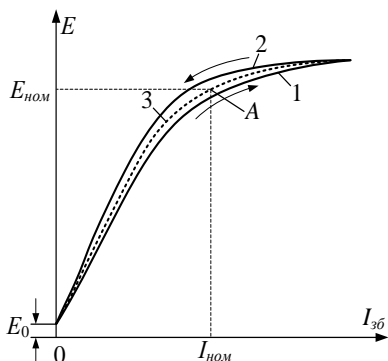


Рисунок 7.3 – Характеристика неробочого ходу генератора паралельного збудження

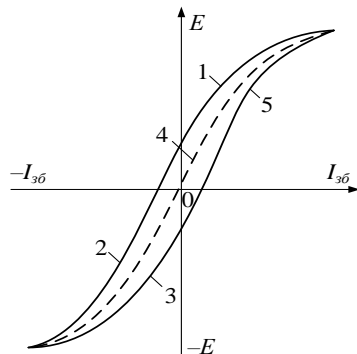


Рисунок 7.4 – Повна характеристика неробочого ходу генератора паралельного збудження

2. Зовнішня характеристика $U = f(I)$ є залежністю напруги на затискачах генератора від струму навантаження при $n = n_{ном} = const$ і $R_{ш} = const$ (при збільшенні навантаження генератора оберти будуть дещо зменшуватись; $R_{ш}$ – опір регульовального реостата в колі обмотки збудження).

Напругу на затискачах генератора можна визначити за співвідношенням

$$U = E - I_{я} R_{я} \approx E - IR_{я},$$

де $I_{я} = I + I_{зб} \approx I_{я}$ (струмом збудження можна знехтувати в наслідок його малої величини); $R_{я}$ – опір обмотки якоря. При збільшенні струму навантаження I , напруга на затискачах генератора буде зменшуватись за рахунок збільшення спаду напруги в якорі $I_{я} R_{я}$. Крім того, напруга буде зменшуватись за рахунок пониження ЕРС при навантаженні. ЕРС буде зменшуватись за рахунок часткового зменшення струму збудження і за рахунок реакції якоря.

Характеристика $U = f(I)$ наведена на рисунку 7.5. Характеристику необхідно знімати змінюючи струм навантаження I від нуля до номінального значення $I = I_{ном}$. Зовнішня характеристика дає змогу обчислити процентний спад напруги на затискачах генератора.

$$\Delta U\% = \frac{U_0 - U_H}{U_H} \cdot 100\% = \frac{\Delta U}{U_H} \cdot 100\% \approx (10 - 15\%).$$

Зменшення напруги на затискачах генератора паралельного збудження є основним його недоліком. Для попередження цього явища на головні полюси машини поміщають ще одну обмотку збудження, так звану послідовну або серієсну обмотку. Ця обмотка вмикається послідовно з обмоткою якоря і

узгоджена з шунтовою обмоткою. В цьому випадку ми отримуємо генератор змінного збудження. При навантаженні такого генератора магнітне поле його підсилюється завдяки дії послідовної обмотки збудження, збільшується ЕРС, а отже напруга на затискачах генератора залишається майже постійною. Напруга на затискачах генератора змішаного збудження не залежить від навантаження.

3. Регульовальна характеристика $I_{зб} = f(I)$ є залежністю струму збудження від струму навантаження при постійних обертах, що дорівнюють номінальним і при номінальній нарузі на затискачах генератора:

$$I_{зб} = f(I) \text{ при } U = U_{ном} = const, n = n_{ном} = const.$$

Ця характеристика показує, як необхідно змінювати струм збудження при збільшенні струму навантаження, щоб при постійних обертах напруга на затискачах генератора була номінальною і постійною.

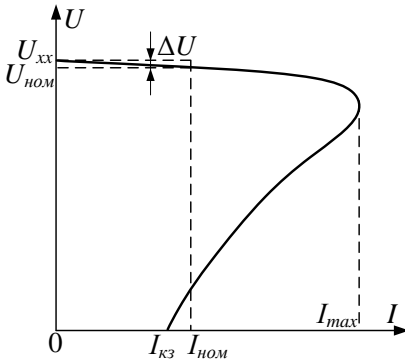


Рисунок 7.5 – Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

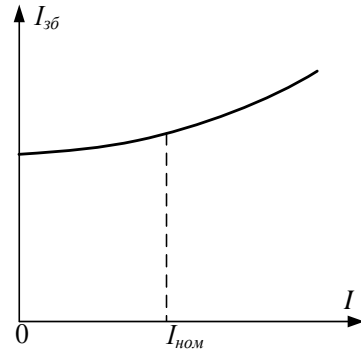


Рисунок 7.6 – Регульовальна характеристика генератора паралельного збудження

При збільшенні навантаження генератора у зв'язку із збільшенням спаду напруги в якорі $I_{я}R_{я}$ і реакцією якоря, напруга U на затискачах генератора зменшується. Щоб підтримувати напругу постійною, необхідно збільшити ЕРС генератора, збільшуючи струм збудження.

Для зняття регульовальної характеристики необхідно встановити на затискачах генератора номінальну напругу. Першу точку характеристики зняти при відсутності навантаження ($I = 0$) і далі рівномірно збільшувати струм навантаження до номінального, а напругу підтримувати постійною і номінальною, змінюючи струм збудження. Машину завантажити до номінального струму. На рисунку 7.6 наведена регульовальна характеристика генератора з паралельним збудженням.

Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити будову і принцип дії генератора постійного струму за плакатами, на розбірному зразку. Звернути увагу на будову статора з головними і додатковими полюсами, на будову якоря з колектором, на щіткотримачі з щітками. Зрозуміти призначення кожної деталі.

2. Ознайомитись з вимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної установки, записати технічні дані в звіт про роботу.

3. Скласти електричне коло згідно схеми, що наведена на рисунку 7.7.

4. Вивчивши правила пуску, провести пуск і привести генератор постійного струму в обертання. Впевнитися в відповідності напрямку обертання якоря генератора паспортним даним.

5. Перевірити за допомогою вольтметра чи збудиться генератор постійного струму. Якщо генератор не збудився, прийняти відповідні міри для самозбудження генератора.

6. Зняти характеристику неробочого ходу $E = f(I_{зб})$ при $I = 0$ при $n = n_{ном} = const$. Результати експерименту записати в таблицю 7.1.

7. Зняти зовнішню характеристику генератора $U = f(I)$ при $n = n_{ном} = const$ і $R_{ш} = const$. Результати експерименту занести в таблицю 7.2.

8. Зняти регульовальну характеристику генератора $I_{зб} = f(I)$ при $U = U_{ном} = const$, $n = n_{ном} = const$. Результати експерименту занести в таблицю 7.3.

9. Увімкнути послідовно (серієсну) обмотку збудження послідовно з обмоткою якоря і впевнитись в тому, що для генератора змішаного збудження, напруга майже не залежить від струму навантаження.

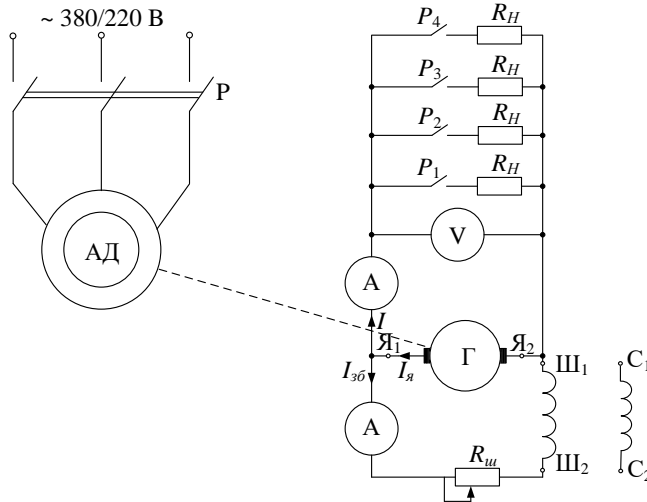


Рисунок 7.7 – Схема експериментальної установки для зняття основних характеристик генератора постійного струму з паралельним збудженням

Таблиця 7.1 – Характеристика неробочого ходу

$I_{3\phi}$	A													При збільшенні струму $I_{3\phi}$
E	B													
$I_{3\phi}$	A													При зменшенні струму $I_{3\phi}$
E	B													

Таблиця 7.2 – Зовнішня характеристика

I	A												
U	B												

Таблиця 7.3 – Регульовальна характеристика

I	A												
$I_{3\phi}$	B												

Аналіз і обробка результатів експерименту

1. За даними таблиці 7.1, 7.2, 7.3 побудувати наступні характеристики генератора з паралельним збудженням:

а) характеристики неробочого ходу $E = f(I_{3\phi})$;

б) зовнішню характеристику $U = f(I)$;

в) регульовальну характеристику $I_{3\phi} = f(I)$.

2. Описати роботу схеми при досліді і провести аналіз знятих характеристик.

Контрольні запитання

1. Пояснити будову і принцип дії генератора постійного струму з паралельним збудженням.

2. В чому полягає закон електромагнітної індукції.

3. Пояснити принцип дії генератора постійного струму змішаного збудження.

4. Умови самозбудження генератора постійного струму.

5. Від чого залежить ЕРС генератора постійного струму?

6. Від чого залежить напруга генератора постійного струму?

7. Що називається характеристикою неробочого ходу і як її знімають?

8. Які причини викликають зниження напруги генератора постійного струму паралельного збудження при збільшенні навантаження?

9. Як можна регулювати напругу генератора постійного струму паралельного збудження при змінному навантаженні?

10. Які переваги і недоліки генератора паралельного збудження?

11. Яке значення має регульовальна характеристика при оцінці властивостей генератора постійного струму?

Лабораторна робота №8

Дослідження двигуна постійного струму паралельного збудження

Мета роботи: ознайомлення з будовою двигуна постійного струму, вивчення правил пуску, зупинки, реверсу і регулювання швидкості обертання; зняття основних характеристик двигуна постійного струму.

Основні теоретичні положення

Згідно з принципом зворотності, в електричних машинах постійного струму напрям перетворення енергії може бути змінений на протилежний, тобто машина постійного струму може працювати як генератором, так і двигуном. Двигуни постійного струму знаходять широке використання в промислових, транспортних та інших установках, де потрібне широке і плавне регулювання швидкості обертання (прокатні стани, металорізальні верстати, електрична тяга на транспорті). Будова двигуна і генераторів постійного струму аналогічна. Схема будови двигуна постійного струму наведена на рисунку 8.1.

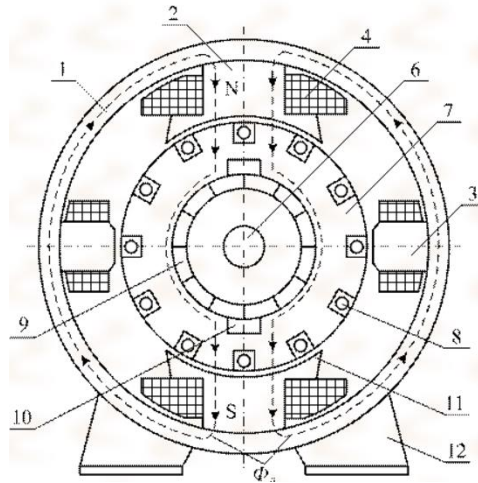


Рисунок 8.1 – Будова двигуна постійного струму

Основні або головні полюси 2 закріплені на внутрішній поверхні станини 1, яка є частиною магнітопроводу. На полюсах розміщені котушки 4, які з'єднані послідовно і утворюють обмотку збудження.

Магнітне поле утворюється струмом збудження в котушках головних полюсів. Коло збудження – це допоміжне коло машини. Магнітна система і поле машини симетричні відносно повздовжніх осей полюсів N – S. На валу машини закріплено якорь 7 з робочою обмоткою 8. Обмотка якоря 8 складається з вкладених в пази провідників, які з'єднані у витки (секції) так, що вона завжди представляє собою замкнений контур.

Оскільки обмотка якоря обертається разом з якорем, зв'язок її з зовнішнім колом здійснюється ковзаючим контактом за допомогою колектора 9 і нерухомих електрографічних щіток 10. Коло якоря – це головне коло машини. Щітки, дотикаються не до провідників, вкладених в пази якоря, а з'єднаних з ними відповідних пластин колектора. Колектор 9 – це циліндр, набраний з мідних пластин, що ізолювані одна від одної прокладками і закріплені на валу.

Розглянемо принцип роботи двигуна постійного струму, схема-тичне зображення якого наведене на рис.2. Згідно закону Ампера, на відрізок l контуру з постійним струмом I , що знаходиться в зовнішньому стаціонарному магнітному полі в немагнітному середовищі, діє електромагнітна сила

$$F_{np} = B l I, \quad (8.1)$$

де B – вектор магнітної індукції; l – відрізок провідника з струмом, який знаходиться в магнітному полі; I – струм в провіднику. Ця сила утворює обертовий механічний момент M_{EM} , який називається електромагнітним моментом

$$M_{EM} = F_{np} D_{я} = B l I D_{я}, \quad (8.2)$$

де $D_{я}$ – діаметр якоря. В подальшому індекс EM будемо опускати.

Якщо до обмоток якоря машини підвести постійний струм від зовнішнього джерела, то машина буде працювати в режимі двигуна, перетворюючи електричну енергію в механічну. При цьому на провідники обмотки якоря будуть діяти електромагнітні сили F_{np} і виникне електромагнітний момент M . Величини F_{np} і M визначаються згідно рівнянь (8.1) і (8.2).

При достатній величині M якорі машини почне обертатись і буде розвивати електромагнітну потужність. Момент M при цьому є рушійним і діє у напрямку обертання.

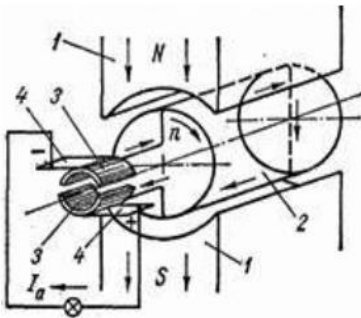


Рисунок 8.2 – Найпростіший двигун постійного струму

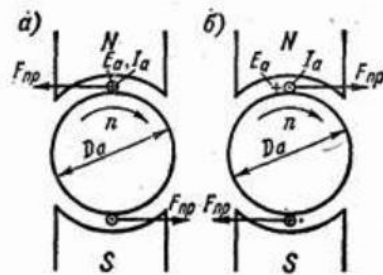


Рисунок 8.3 – Напряв ЕРС, струму і моментів в двигуні постійного струму

Провідники обмоток якоря двигуна обертаються в магнітному полі і тому в обмотці якоря двигуна індукуються ЕРС E

$$E = C_E \Phi n, \quad (8.3)$$

де C_E – конструктивна постійна машини, що залежить від типу обмотки якоря і числа пар полюсів, Φ – магнітний потік пари полюсів машини, n – швидкість обертання якоря.

Напрямок цієї ЕРС в двигуні такий самий, як і в генераторі. Таким чином в двигуні ЕРС якоря E направлена проти струму $I_{я}$ і прикладеної до затискачів якоря напруги U . Тому ЕРС якоря двигуна називається також протиелектрорушійною силою. Прикладена до якоря двигуна напруга зрівноважується ЕРС E і спадом напруги в обмотці якоря

$$U = E + I_{я} \cdot R_{я}; \quad I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}}, \quad (8.4)$$

де $R_{я}$ – опір обмотки якоря двигуна.

Отже, для двигуна постійного струму

$$U > E. \quad (8.5)$$

Наприклад дії механічних і електричних величин в якорі двигуна постійного струму показані на рисунку 8.3.

Згідно першого закону Ньютона при використанні до обертового руху, діючі на обертове тіло рушійний і гальмівний моменти зрівноважують один одного. Тому в двигуні при усталеному режимі роботи електромагнітний момент визначається за формулою

$$M = C_M \Phi I_{я} = M_{ТВ} + M_{ТР} + M_C, \quad (8.6)$$

де $M_{ТВ}$ – гальмівний момент двигуна, який розвивається машиною, що працює (станок, насос тощо); $M_{ТР}$ – момент сили тертя в підшипниках, об повітря і на колекторі електричної машини; M_C – гальмівний момент, що викликаний втратами на генезис і вихрові струми в сердечнику якоря; $C_M = \frac{60 C_E}{2\pi}$ – величина, що постійна для даної машини.

Потужність P , що розвивається електромагнітним моментом M називається електромагнітною потужністю

$$P = M \omega = E \cdot I_{я}, \quad (8.7)$$

де $\omega = \frac{\pi n}{30}$ – кутова швидкість обертання.

З рівняння (8.4) отримаємо

$$U \cdot I_{я} = E \cdot I_{я} + I_{я}^2 \cdot R_{я}. \quad (8.8)$$

Це рівняння балансу потужностей двигуна постійного струму. Електрична потужність на затискачах якоря дорівнює сумі електромагнітної потужності якоря і електричних втрат в якорі. Ці співвідношення є вираженням закону збереження енергії і відтворюють процес перетворення енергії в машині постійного струму.

Виразивши потужність P у ватах, а кутову швидкість обертання ω через число обертів за хвилину n , з виразу (8.7) отримаємо

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{\pi n}{30}} = \frac{30}{3,14} \cdot \frac{P}{n} = 9,55 \frac{P}{n} \quad [H \cdot m]. \quad (8.9)$$

Одним з факторів, що впливають на роботу машини постійного струму, є процес комутації. Розглянемо це явище. На рисунку 8.4 зображена найпростіша схема машини постійного струму з числом пар полюсів $2p = 2$ і обмоткою на якорі машини. Із зовнішнім колом обмотки якоря зв'язана щітками.

Обмотка якоря по відношенню до щіток має дві паралельні вітки і складається з окремих секцій. При обертанні якоря секції переходять по чергово з однієї вітки в другу, при чому під час такого переходу секція замикається накоротко щіткою і в ній проходить зміна напрямку струму. Це явище називається комутацією секції. Явища в короткозамкнутій секції впливають на величину струмів в щітковому контакті і на роботу щіток. Сукупність явищ, що пов'язані з замиканням секції накоротко щітками, переходом цих секцій з одних паралельних віток обмотки в інші і протіканням струму через ковзаючий контакт між колектором і щіткою називається комутацією машини. Послідовність моментів процесу комутації зрозуміла з рисунка 8.5.

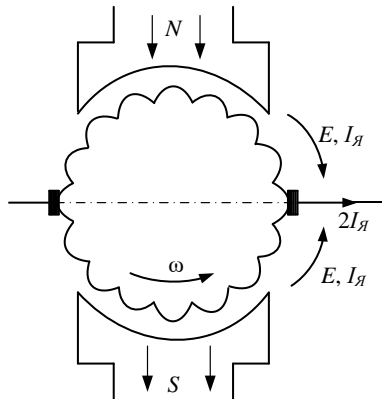


Рисунок 8.4 – До пояснення процесу комутації

З практичної точки зору важливо, щоб комутація здійснювалась без значного іскріння біля контактних поверхонь щіток, так як сильне іскріння руйнує поверхню колектора і щіток, отже скорочує термін роботи машини. Основним способом покращення комутації в сучасних машинах постійного струму є створення комутуючого магнітного поля в зоні щіток за допомогою додаткових полюсів.

Значний вплив на роботу двигуна постійного струму здійснює реакція якоря. Магнітне поле машини постійного струму при неробочому ході ($I = 0$) створюється обмоткою збудження. Картина магнітного поля для цього випадку зображена на рисунку 8.6, а. При навантаженні двигуна механічним моментом опору на валу, виникає струм в якорі ($I > 0$) і обмотка якоря створює власне магнітне поле, картина якого при відсутності збудження ($I_{зб} = 0$) зображена на рисунку 8.6, б. Поля обмотки збудження і якоря, що діють сумісно, утворюють результуюче поле, характер якого показаний на рисунку 8.6, в. Полярність полюсів і напрями струмів якоря на цьому рисункові відповідають випадкові, коли в режимі двигуна якір обертається проти годинникової стрілки.

Видно, що під впливом магнітного поля якоря результуюче поле машини змінюється. Це явище називається реакцією якоря. При встановленні щіток на геометричній нейтралі 1 (рис.8.6, в) поле якоря направлено поперек осі полюсів і в цьому випадку воно називається полем поперечної реакції якоря.

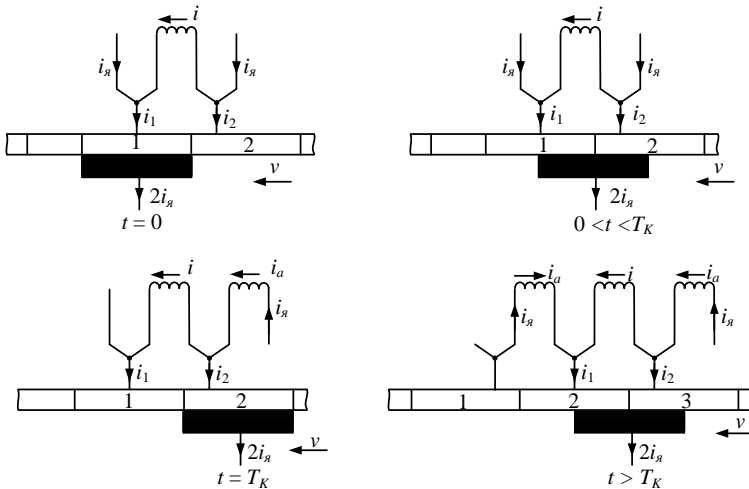


Рисунок 8.5 – Послідовні моменти комутації секції 1

Поперечна реакція якоря викликає послаблення поля під одним краєм полюса і його посилення під другим краєм полюса, в наслідок чого вісь результуючого поля повертається в двигуні проти напрямку обертання якоря.

Внаслідок насичення магнітного кола результуюча індукція на тих ділянках де поля додаються буде зменшена.

Тому під впливом насичення поперечна реакція якоря завжди викликає деяке зменшення потоку полюсів і в цьому ракурсі говорять, що поперечна реакція якоря діє розмагнічуючим чином і в свою чергу впливає на швидкість обертання і обертаючий момент двигуна.

Реакція якоря в певних умовах може викликати небажані за своїми наслідками явища. До числа таких явищ відноситься перш за все збільшення напруги між колекторними пластинами внаслідок спотворення поля під впливом поперечної реакції якоря. Спотворення кривої поля тим значиміше, чим менший повітряний проміжок.

В машинах постійного струму малої і середньої потужності величину зазору дещо збільшують, що зменшує шкідливий вплив поперечної реакції якоря. В машинах постійного струму великої потужності ефективним засобом боротьби з спотворенням кривої поля і збільшенням напруги між колекторними пластинами є застосування компенсаційної обмотки. Вона розміщується в пазах, що виштамповані в полюсних наконечниках головних полюсів і з'єднуються послідовно з якорем. Вплив поперечної реакції якоря в межах полюсного наконечника усувається повністю. При наявності компенсаційної обмотки величину повітряного проміжку між якорем та полюсним наконечником можна брати мінімально допустимою за механічними умовами.

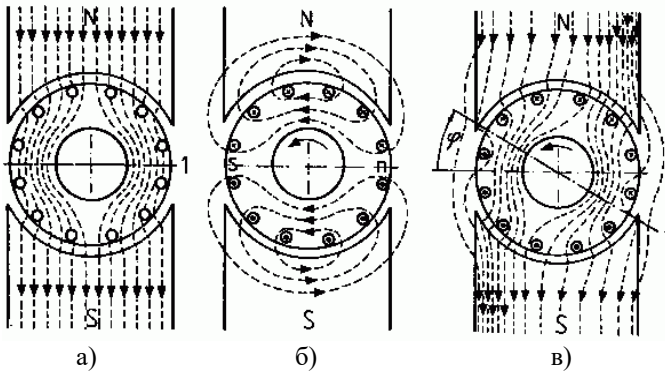


Рисунок 8.6 – Магнітні потоки в машині постійного струму: а – магнітний потік полюсів, б – магнітний потік обмотки якоря, в – результуючий магнітний потік

Зупинимось на механічних характеристиках двигуна постійного струму.

З рівняння (8.3) і (8.4) знаходимо рівняння швидкісної характеристики $n = f(I)$ двигуна

$$n = \frac{U - I_{я} \cdot R_{я}}{C_E \Phi} \quad (8.10)$$

Визначивши з (8.6) значення струму I та підставивши його в (8.10) отримаємо рівняння механічної характеристики $n = f(M)$ двигуна

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{M \cdot R_{\text{я}}}{C_E C_M \Phi^2}, \quad (8.11)$$

яке визначає залежність швидкості обертання двигуна від моменту обертання.

Вигляд механічної характеристики $n = f(M)$ чи $M = f(n)$ при $U = \text{const}$ залежить від того, як при навантаженні змінюється потік машини Φ , а також від способу збудження двигуна. Це справедливо і для швидкісних характеристик.

Розглянемо схеми ввімкнення двигунів постійного струму, що наведені на рисунку 8.7. Існують схеми ввімкнення двигунів незалежного (а), паралельного (б), послідовного (в) і змішаного (г) збудження.

Обмотка збудження ОЗ двигуна незалежного збудження (рис.8.7, а) живиться постійним струмом від стороннього джерела живлення (акумулятор, випрямляч). Обмотки збудження ОЗ двигунів паралельного, послідовного і змішаного збудження, відповідно рисунку 8.7, б, в, г, живляться від тієї ж мережі постійного струму, що і обмотки якоря цих двигунів. У всіх двигунах постійного струму, струм збудження складає (1-5) % від струму якоря $I_{\text{ян}}$.

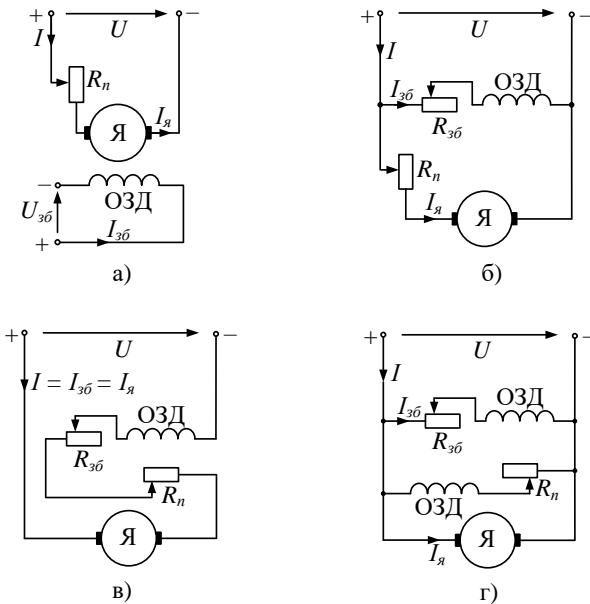


Рисунок 8.7 – Схеми ввімкнення двигунів незалежного (а), паралельного (б), послідовного (в) і змішаного (г) збудження

При пуску двигуна необхідно: забезпечити певну величину пускового моменту і умови для досягнення необхідної швидкості обертання, не допустити виникнення надмірного пускового струму небезпечного для двигуна.

Можливі три способи пуску двигуна: 1) прямий пуск, коли обмотка якоря підключається безпосередньо до мережі на повну напругу; 2) пуск за допомогою пускового реостата або пускових опорів, що включаються послідовно в коло якоря; 3) пуск при понижений напрузі кола якоря. Прямий пуск від мережі двигунів постійного струму при номінальній напрузі $U = U_{ном}$ недопустимий внаслідок великого пускового струму.

Як слідує з (8.3) і (8.4) при пуску $n = 0$, а також $E = 0$ і тоді пусковий струм $I_{яп}$ визначаємо з (8.4)

$$I_{яп} = \frac{U}{R_я}. \quad (8.12)$$

У звичайних машинах $R_я = (0,02 - 0,1)$ Ом, і тому при прямому пуску з напругою $U = U_{ном}$ струм якоря недопустимо великий

$$I_я = (50 \div 10) I_{яном}.$$

Внаслідок цього прямий пуск застосовується тільки для двигунів потужністю до декількох сотень ват, в яких $R_я$ відносно великий і тому при пуску $I_я \leq (4 \div 6) I_{яном}$, а процес пуску триває не більше 1-2 с.

Найбільш поширеним є пуск за допомогою пускового реостата або пускових опорів, що ввімкнені послідовно з обмоткою якоря (рис.8.8). Пусковий струм при цьому дорівнює

$$I_{яп} = \frac{U - E}{R_я + R_n}. \quad (8.13)$$

де R_n – опір пускового реостата.

Для забезпечення достатнього пускового моменту перед пуском необхідно утворити потік збудження Φ , а отже підключити обмотку збудження до мережі, замкнувши накоротко реостат збудження $R_{зб}$. З іншої сторони при пуску при $n = 0$ маємо $F = 0$, а отже струм якоря $I_я$ обмежується тільки величиною пускового опору R_n , оскільки опір якоря $R_я$ малий. Величина R_n вибирається так, щоб в початковий момент пуску було $I_{яп} = (1,4 \div 1,7) I_{яном}$.

Розглянемо детальніше пуск двигуна паралельного збудження за допомогою пускового реостата R_n (рис.8.8, а).

Перед пуском ($t = 0$) рухомий контакт пускового реостата стоїть на неробочому контакті «стоп» і коло якоря розімкнуте. Регульований реостат $R_{зб}$ колі обмотки збудження ОЗ замкнутий накоротко ($R_{зб} = 0$). В початковий момент пуску $t = 0$ двигун підключаємо на напругу. В обмотці збудження ОЗ

буде протікати струм $I_{зб}$ утворюючи потік збудження Φ . Перша умова для утворення моменту M виконана.

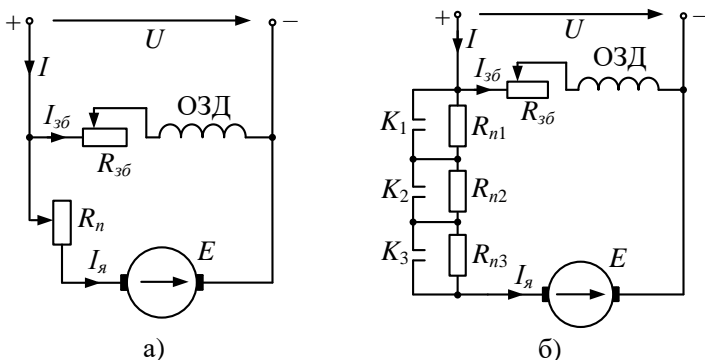


Рисунок 8.8 – Схема двигуна паралельного збудження за допомогою пускового реостата (а) і пускових опорів (б)

При переміщенні рухомого контакту пускового реостата з положення, здійснюється поступове зменшення величини пускового опору, струм $I_{я}$ в якорному колі двигуна зростає. Виконана друга умова для утворення пускового моменту. Обертовий момент двигуна стає більшим нуля ($M > 0$). Двигун починає обертатись, зростає його швидкість ($n > 0$). В якорі двигуна індукуються ЕРС E , напрямлена проти напруги мережі.

По мірі розгону двигуна індукуються в обмотці якоря проти ЕРС E зростає, що призводить до зменшення струму якоря і зменшення обертового моменту M , що розвивається двигуном. Для підтримки обертового моменту на певному рівні пусковий реостат поступово виводиться з кола якоря. При досягненні двигуном номінальної швидкості пусковий реостат повністю вимикається.

В автоматизованих установках замість пускового реостата використовують пускові опори R_{n1}, R_{n2}, R_{n3} (рис.8.8, б), які по чергову шунтуються контактами K_1, K_2, K_3 автоматично працюючих контакторів.

Зупинка двигуна проводиться його відключенням від мережі.

Ні в якому разі не можна допускати розриву кола паралельного збудження. З рівняння (10) видно, що при різкому зменшенні потоку збудження ($\Phi \rightarrow 0$) швидкість обертання різко зростає. Виникає так званий «рознос». Одночасно зменшується ЕРС ($E \rightarrow 0$), а струм якоря зростає і виникає круговий вогонь, тому в колах збудження не встановлюють запобіжники і вимикачі.

Пуск двигунів послідовного і змішаного збудження здійснюється аналогічно.

Для зміни напрямку обертання (реверсування) двигуна необхідно змінити напрям струму в якорі (разом з додатковими полюсами і компенсаційною обмоткою) або в обмотці (обмотках) збудження.

Регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму можливо трьома способами.

1. Найбільш зручним і розповсюдженим є спосіб регулювання швидкості шляхом зміни потоку Φ , тобто струму збудження $I_{зб}$.

Зі зменшенням потоку Φ згідно рівнянь (8.10) і (8.11) швидкість n зростає. Оскільки двигуни розраховуються для роботи при номінальному режимі з найбільшим значенням потоку збудження Φ , тобто з найменшою величиною швидкості обертання n , то практично можна тільки зменшувати потік збудження Φ .

Даний спосіб дозволяє регулювати швидкість n вище від номінального значення. При такому регулюванні коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна залишається високим, так як потужність, що затрачується на збудження мала – при зменшенні струму потужність збудження $UI_{зб}$ зменшується.

Верхня межа регулюванні швидкості обертання лімітується механічною міцністю машини і умовами її комутації.

2. Другий спосіб регулювання швидкості заключається в ввімкненні послідовного в коло якоря реостата чи регульованого опору $R_{р\dot{я}}$. Замість виразу (10) в цьому випадку маємо

$$n = \frac{U - I_{я} \cdot (R_{я} + R_{р\dot{я}})}{C_E \Phi} \quad (14)$$

Цей спосіб дає можливість регулювати швидкість вниз від номінального значення і пов'язаний зі значними втратами потужності в опорі і зниженні ККД. Через це даний спосіб застосовується в основному для двигунів невеликої потужності, а для більш потужних двигунів використовується рідко і тільки короткочасно.

3. Регулювання швидкості здійснюється також шляхом регулювання напруги кола якоря. Так як робота двигуна при напрузі в мережі $U > U_{ном}$ недопустима, то даний спосіб, згідно виразів (8.10) і (8.11) дає можливість регулювати швидкість також вниз від номінального, значення ККД двигуна при цьому залишається високим, так як ніяких додаткових джерел втрат в схему двигуна не вноситься. Але в цьому випадку необхідне окреме джерело струму з регульованою напругою, що збільшує вартість установки. Для визначення всіх основних величин, що відповідають режиму роботи двигуна при різних навантаженнях використовуються його робочі характеристики. Робочі характеристики є залежностями споживаної потужності P , споживаного струму I , швидкості n , моменту M , ККД η від корисної потужності P_2 при постійній напрузі мережі $U = const$ і незмінних опорах регулюючих реостатів. Робочі характеристики двигуна паралельного збудження малої потужності при відсутності додаткового опору в колі якоря наведені на рисунку 8.9.

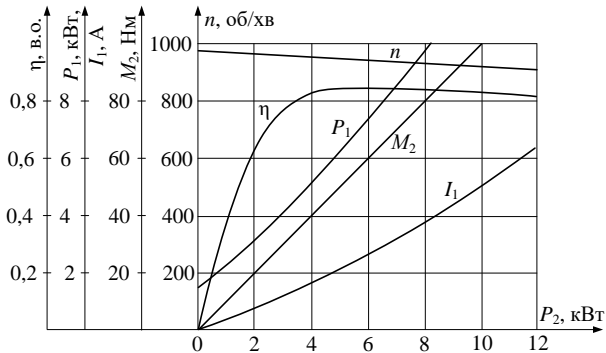


Рисунок 8.9 – Робочі характеристики двигуна паралельного збудження

Як видно з рисунка 8.9, одночасно зі збільшенням потужності на валу P_2 зростає і момент на валу M . Оскільки зі збільшенням P_2 і M швидкість n дещо зменшується, то $M = P_2 / n$ росте дещо швидше P_2 . Збільшення P_2 і M , звичайно, супроводжується збільшенням струму двигуна I . Пропорційно до струму I зростає також споживана з мережі потужність P_1 . При неробочому ході ($P_2 = 0$), ККД $\eta = 0$, потім з збільшенням P_2 спочатку η швидко зростає, але при більших навантаженнях у зв'язку з великим зростанням втрат в колі якоря ККД η знову починає зменшуватися.

Швидкісна характеристика двигуна в режимі неробочого ходу є залежністю $n = f(I_{зб})$ при $U = U_{ном} = const, M = 0$.

Зовнішня чи механічна характеристика двигуна є залежністю $n = f(I_я)$ при $U = U_{ном} = const, I_{зб} = const$. Згідно (8.6) магнітний потік Φ прямо пропорційний струмові якоря $I_я$ при $I_{зб} = const$, а тому $n = f(M)$ при $U = U_{ном} = const, I_{зб} = const$. Характер цієї залежності визначається впливом реакції якоря на магнітне поле двигуна. Відомо, що реакція якоря викликає зменшення і перерозподіл магнітного потоку Φ при збільшенні струму якоря $I_я$.

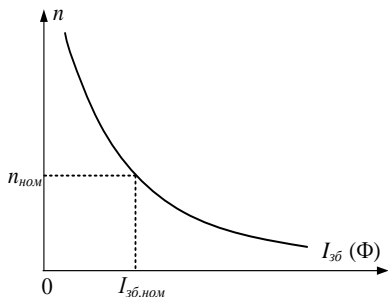


Рисунок 8.10 – Швидкісна характеристика

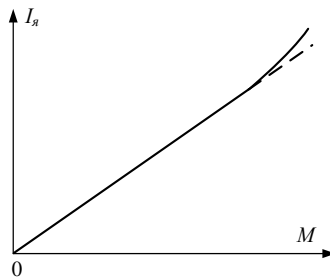


Рисунок 8.11 – Моментна характеристика.

При відсутності в двигуні розмагнічуючої реакції якоря (компенсація реакції якоря), збільшення струму якоря $I_{я}$ призводить до зменшення швидкості обертання двигуна n (крива 1 на рисунку 8.12) чи при значній реакції якоря може навіть зрости (крива 3 на рисунку 8.12).

Регулювальна характеристика двигуна постійного струму паралельного збудження є залежністю $I_{зб} = f(I_{я})$ при $U = U_{ном} = const, n = n_{ном} = const$.

Вигляд регулювальної характеристики залежить від характеру зовнішньої характеристики, тобто залежить від інтенсивності реакції якоря в двигуні. Типові регулювальні характеристики наведені на рисунку 8.13 і відповідають кривим зовнішньої характеристики з тими ж номерами. Постійність швидкості обертання двигуна при знятті регулювальної характеристики підтримується зміною величини опору в колі збудження двигуна $R_{зб}$.

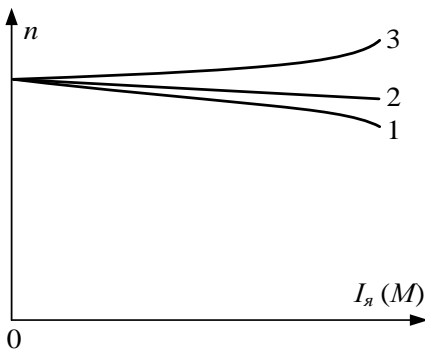


Рисунок 8.12 – Зовнішня (механічна) характеристика двигуна

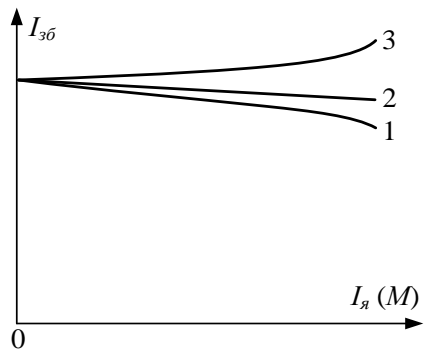


Рисунок 8.13 – Регулювальна характеристика двигуна

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка (рис.8.14) для експериментальних досліджень двигуна постійного струму паралельного збудження складається з двох машин постійного струму з'єднаних муфтою. Одна машина використовується в якості досліджуваного двигуна, в якірному колі якого є пусковий реостат $R_{п}$, а в колі обмотки збудження – регулювальний реостат $R_{зб}$. Встановлені також відповідні вимірювальні прилади. Швидкість обертання вала двигуна вимірюється тахометром.

Друга машина служить навантажувальним генератором, який виконує роль механічного навантаження для двигуна.

В якості навантаження генератора служить опір $R_{н}$. Потужність генератора визначається за показами приладів, що ввімкнені в коло навантаження.

Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити будову двигуна постійного струму паралельного збудження за плакатами і за розбірним зразком. Звернути увагу на будову станини, головних магнітних полюсів, додаткових полюсів, щіткотримачів з щітками, яко-ря з колектором, клемної панелі. З'ясувати призначення кожної деталі.
2. Ознайомитися з вимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної установки, записати їх технічні дані в звіт про роботу.
3. Вивчити способи пуску, регулювання швидкості обертання і зупинки двигуна постійного струму з паралельним збудженням.
4. Скласти схему експериментальної установки згідно рисунку 8.14.
5. Дотримуючись всіх мір безпеки провести пуск, зупинку і реверс двигуна постійного струму.
6. Зняти швидкісну характеристику двигуна в режимі неробочого ходу $n = f(I_{зб})$ при $U = U_{ном} = const, I_{зб} = const$. Результати вимірювань занести в таблицю 8.1.

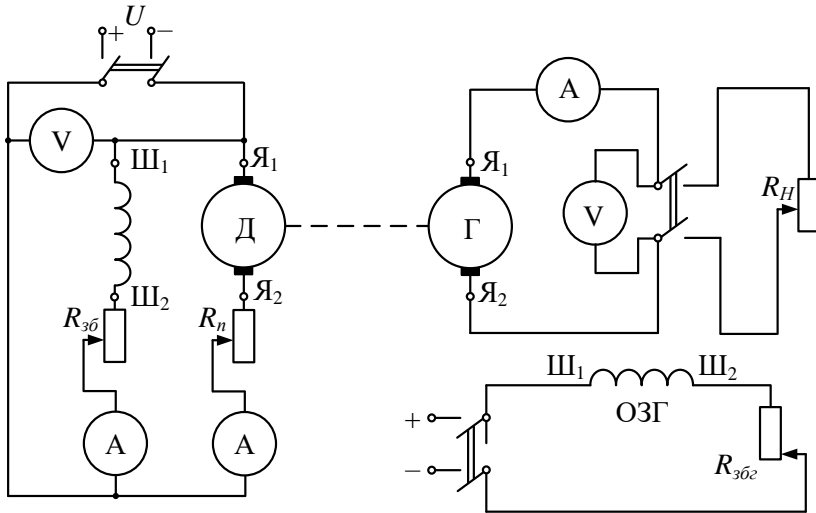


Рисунок 8.14 – Схема експериментальної установки для зняття робочих характеристик двигуна постійного струму паралельного збудження

Таблиця 8.1 – Швидкісна характеристика двигуна

$I_{зб}$	A								
n	$об/хв$								

7. Зняти зовнішню (механічну) характеристику $n = f(I_a)$ при $U = U_{ном} = const, I_{зб} = const$. Результати вимірювань занести в таблицю 8.2.

Таблиця 8.2 –Зовнішня характеристика двигуна

$I_{я}$	A									
n	$об/хв$									

9. Зняти регульовальну характеристику $I_{зб} = f(I_{я})$ при $U = U_{ном} = const, n = n_{ном} = const$. Результати вимірювань занести в таблицю 3.

Таблиця 8.3 – Регульовальна характеристика двигуна

$I_{я}$	A									
$I_{зб}$	A									

Аналіз і обробка результатів експерименту

1. За даними таблиць 8.1, 8.2, 8.3 побудувати швидкісну, зовнішню (механічну) і регульовальну характеристику двигуна постійного струму з паралельним збудженням.

2. На основі знятих характеристик зробити висновки про інтенсивність реакцій якоря двигуна.

3. Вказати: які існують способи пуску двигуна постійного струму паралельного збудження, їх переваги і недоліки; які існують способи регулювання швидкості обертання якоря двигуна і які з них є найбільш економічними: які переваги і недоліки двигуна постійного струму порівнюючи з іншими типами двигунів.

Контрольні запитання

1. Пояснити принцип дії і будову двигуна постійного струму.
2. Способи збудження двигунів постійного струму.
3. Як здійснюється пуск, реверс і зупинка двигуна постійного струму паралельного збудження?
4. Що таке рознос двигуна постійного струму і чи це небезпечно?
5. Як знімати основні характеристики двигуна?
6. Поясніть характер основних характеристик двигуна.
7. Який вплив чинить реакція якоря на характеристики двигуна?
8. Як найбільш економічно регулювати швидкість обертання якоря двигуна?
9. Що називається номінальною потужністю двигуна?
10. Для чого потрібні двигуну пусковий реостат і з яких міркувань вибирають його величину?
11. Яке призначення головних і додаткових полюсів в двигуні?
12. В якому положенні повинна бути ручка реостата, що регулює струм збудження при пуску двигуна паралельного збудження?
13. Як можна змінити напрям обертання якоря двигуна постійного струму?

Лабораторна робота №9

Дослідження системи «Перетворювач частоти-асинхронний двигун-генератор постійного струму»

Мета роботи: ознайомлення з будовою перетворювача частоти, генератора постійного струму, вивчення правил пуску, зупинки, реверсу і регулювання швидкості обертання; зняття основних характеристик генератора постійного струму.

Основні теоретичні положення

Основними складовими лабораторної установки є перетворювач частоти, побудований на транзисторах, що регулює оберти асинхронного двигуна, генератор з електронним збудженням та акумуляторна батарея. Генератор, що приводиться в рух ремінною передачею від АД є джерелом для навантаження у вигляді автомобільних ламп різної потужності. Кожна з чотирьох паралельних віток, що ввімкнені паралельно через вимикачі має потужність 55 Вт. Регулятор ПЧ є свого роду автомобільним акселератором, що змінює оберти і АД і генератора.

Для виконання лабораторної роботи було використано наступне електротехнічне та силове електронне обладнання.

Перетворювач частоти:

- напруга живлення: $\approx 220\text{-}240\text{ В}$, 50/60 Гц;
- діапазон можливої зміни частоти: $f = 1,0 \dots 50,0\text{ Гц}$;
- несуча частота ШІМ при перемиканні транзисторів: $f_{\text{ШІМ}} = 8\text{ кГц}$;
- споживана потужність електронною схемою керування: $P_{\text{кер}} \leq 20\text{ Вт}$.

Асинхронний двигун:

- потужність на валу: $P_{\text{ном}} = 750\text{ Вт}$;
- номінальний споживаний струм: $I_{\text{ном}} = 3,86\text{ А}$;
- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,87$;
- номінальні оберти валу: $n_{\text{ном}} = 2920\text{ об/хв.}$;
- лінійна напруга (обмотки з'єднані трикутником) $U_{\text{ном}} = 220\text{ В}$.

Автомобільний генератор:

- номінальна електрична потужність: $P_{\text{ЕЛ}} = 500\text{ Вт}$;
- номінальна постійна напруга: $U_{\text{ном}} = 12,8\text{ В}$;
- номінальний струм: $I_{\text{ном}} = 40\text{ А}$;
- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,82$;
- струм збудження електронного регулятора: $I_{\text{зб}} = 1,2\text{ А}$.

На рисунку 9.1 показано експериментальну установку, а на рисунку 9.2 налаштування перетворювача частоти.

Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити будову і принцип дії генератора за плакатами, на розбірному зразку. Звернути увагу на будову статора з головними і додатковими по-

люсами, на будову якоря з колектором, на щіткотримачі з щітками. Зрозуміти призначення кожної деталі.

2. Ознайомитись з вимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної установки, записати технічні дані в звіт про роботу.

3. Вивчивши правила пуску, провести пуск і привести генератор в обертання. Впевнитися в відповідності напрямку обертання якоря генератора.

4. Перевірити за допомогою вольтметра чи збудиться генератор постійного струму. Якщо генератор не збудився, прийняти відповідні міри для самозбудження генератора.

5. З допомогою перетворювача частоти зняти зовнішню характеристику генератора $U_G = f(I_G)$ при різних частотах обертання приводного двигуна $n = 1500$ об/хв., $n = 3000$ об/хв. Результати експерименту занести в таблиці 9.1, 9.2.



Рисунок 9.1 – Загальний вигляд розробленої лабораторної установки



Рисунок 9.2 – Налаштування перетворювача частоти

Алгоритм дослідження лабораторної установки

1. Вивчаємо будову і принцип дії генератора за плакатами та на розбірному зразку. Звертаємо увагу на будову статора з головними і додатковими полюсами, електронну систему збудження, будову якоря з колектором, щіткотримачі з щітками.

2. Ознайомлюємось з елементною базою силової електронної частини перетворювача частоти, з аналоговими та цифровими вимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної установки. Виставляємо за допомогою потенціометра струм збудження електронної системи керування на рівні 1 А.

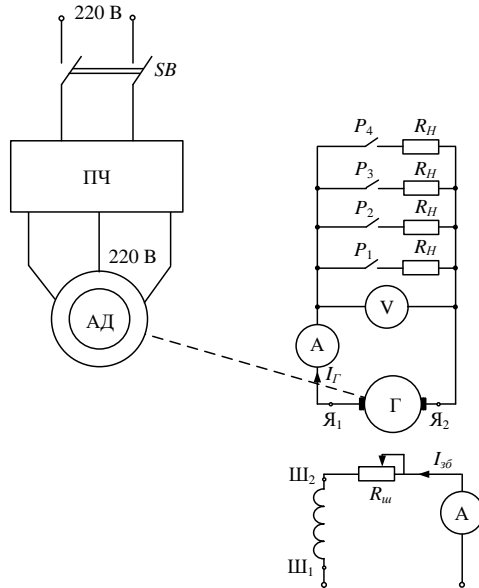
3. Вивчаємо і засвоюємо правила пуску, проводимо пуск перетворювача і генератора в обертання. Впевнюємось у відповідності напрямку обертання якоря генератора. Перевіряємо вольтметром чи збудився генератор.

4. За допомогою перетворювача частоти змінюємо оберти приводного АД і знімаємо зовнішню характеристику генератора $U_G = f(I_G)$ при різних частотах обертання приводного двигуна $n = 800$ об/хв. (умовний холостий хід), $n = 1500$ об/хв., $n = 3000$ об/хв. Результати заносимо в таблицю 9.1.

На рисунку 9.3 показано електричну схему лабораторної установки.

Таблиця 9.1 – Зовнішні характеристики генератора

$n = 3000$ об/хв.	I_G	A					
	U_G	B					
	n	об/хв					
$n = 1500$ об/хв.	I_G	A					
	U_G	B					
	n	об/хв					
$n = 800$ об/хв.	I_G	A					
	U_G	B					
	n	об/хв					



Від електронної системи збудження

Рисунок 9.3 – Електрична схема для дослідження автомобільного генератора

Аналіз і обробка результатів експерименту

1. За даними таблиці 9.1 будуюмо зовнішні характеристики.
2. Описати роботу схеми при досліді і провести аналіз знятих характеристик.

Контрольні запитання

1. Пояснити будову і принцип дії перетворювача частоти.
2. Пояснити будову і принцип дії генератора постійного струму.
3. В чому полягає закон електромагнітної індукції.
4. Умови самозбудження генератора постійного струму.
5. Від чого залежить ЕРС генератора постійного струму?
6. Від чого залежить напруга генератора постійного струму?
7. Які причини викликають зниження напруги генератора постійного струму паралельного збудження при збільшення навантаження?
8. Як можна регулювати напругу генератора постійного струму паралельного збудження при змінному навантаженні?

Лабораторна робота №10

Дистанційне керування асинхронним двигуном

Мета роботи: вивчення за розбірними зразками і плакатами будови і принципу дії апаратури дистанційного керування електроприводами; ознайомлення з найпростішими схемами дистанційного керування асинхронними двигунами з фазним і короткозамкненим ротором; складання схем автоматичного керування електродвигунами.

Основні теоретичні положення

Для електрифікації і автоматизації виробничих процесів використовуються різні види електроприводу. Електроприводом називається електромеханічний пристрій, що складається з перетворюючого, передаточного і керуючого пристрою.

При роботі електроприводу виникає необхідність вмикати і вимикати електродвигуни, змінювати напрям обертання, регулювати швидкість обертання, а також здійснювати інші керувальні операції – тобто управляти електроприводом.

Апарати керування електроприводом поділяють на апарати ручного керування, апарати автоматичного керування, а також пристрої, що виконують функції захисту кола, в якому проводиться переключення.

Апарати ручного керування служать для нечастого в часі ввімкнення і вимкнення електричних кіл невеликої потужності. До них відносяться ключі, рубильники, пакетні вимикачі, універсальні перемикачі, кнопки, кнопкові станції (блоки з двох і більше кнопок), автоматичні повітряні вимикачі, що мають пристрій який захищає коло від ненормальних режимів роботи та ін. Зазвичай в якості пристрою захисту кола служить роз'єднувач – елемент, що контролює режими роботи і впливає на контактну систему. Прикладом найпростішого захисного пристрою є плавкий запобіжник, який розриває коло у випадку, коли у колі струм перевищує допустиме значення. Більш складні роз'єднувачі являють собою механізми, робота яких зумовлена тепловою чи магнітною дією струму.

Дію теплового роз'єднувача можна розглянути на будові теплового реле (рис.10.1).

Теплові реле застосовуються для захисту від перевантажень. Достатньо часто теплові реле для захисту від перевантажень електричних двигунів вбудовуються у магнітні пускачі.

Чутливим елементом теплового реле є біметалева пластина, що являє собою спай двох металів з різними коефіцієнтами лінійного розширення. Вона нагрівається струмом (подібно теплового розчеплювачу автоматичного вимикача). Нагрівання біметалевої пластини може здійснюватися від спеціального нагрівального елемента, що вмикається паралельно біметалевій пластині (аналогічно теплового розчеплювачу непрямої дії), або від струму в

самій біметалевій пластині (розчіплювач із безпосереднім нагрівом), або комбіновано (розчіплювач зі змішаним нагрівом).

При проходженні струму перевантаження по нагрівальному елементу 2 біметалевої пластини 1 теплового реле її незакріплений кінець вигинається униз (у бік металу з меншим коефіцієнтом лінійного поширення) і звільняє засувку 3, яка, у свою чергу, звільняє важіль 4. Важіль 4 під дією пружини 5 повертається проти стрілки годинника і розмикає контакти 8. Кнопка 6 призначена для ручного повертання важеля 4 у вихідне положення. Гвинт 7 є регулювальним.

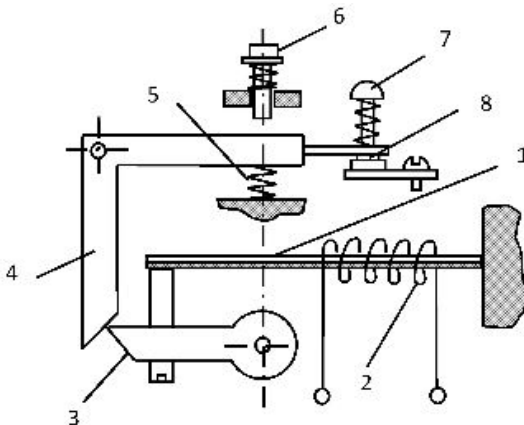


Рисунок 10.1 – Конструкція теплового реле з розчіплювачем із безпосереднім нагрівом: 1 – біметалева пластинка; 2 – нагрівальний елемент; 3 – засувка; 4 – важіль; 5 – пружина; 6 – кнопка; 7 – регулювальний гвинт; 8 – контакти

При номінальному режимі роботи споживача енергії ($I = I_n$) нагрів пластини недостатній для її помітної деформації. Якщо ж струм протягом тривалого часу перевищує номінальне значення, пластинка від нагрівання значно деформується, та згинаючись, розмикає контакти, пристрою. Тепловий роз'єднувач, що виконаний за принципом теплового реле, відключає автомат тільки при довготривалих перенавантаженнях: (при $I = 1,5I_n$ він спрацьовує приблизно через 2 хв). Роз'єднувач не реагує на значні, але короточасні перевищення струму в колі, що захищається.

Застосовуються автомати з комбінованими роз'єднувачами (електромагнітний і тепловий), а також роз'єднувачами мінімальної напруги.

А Автомати називають повітряними, якщо дуга, яка виникає при розмиканні контактів в колі, що захищається, гаситься в навколишньому середовищі. Широко поширені одно-, дво- і триполюсні повітряні вимикачі.

Апарати дистанційного і автоматичного керування в більшості є електромагнітними апаратами, рухомі контакти яких замикаються під дією сили

тяги електромагніту (або за іншим принципом). На рисунку 10.2 наведена принципова схема електромагнітного реле з поступальним рухом осердя. При під'єднанні обмотки 1 електромагніту до напруги, в обмотці виникає струм, рухоме осердя 2 притягується до нерухомого осердя 3 і через шток 4 діє на коромисло 5, переборюючи опір пружини 6. При цьому замикаються електричні контакти 7 і розмикаються контакти 8. Електромагніти, що застосовуються в апаратах автоматичного керування бувають постійного і змінного струму.

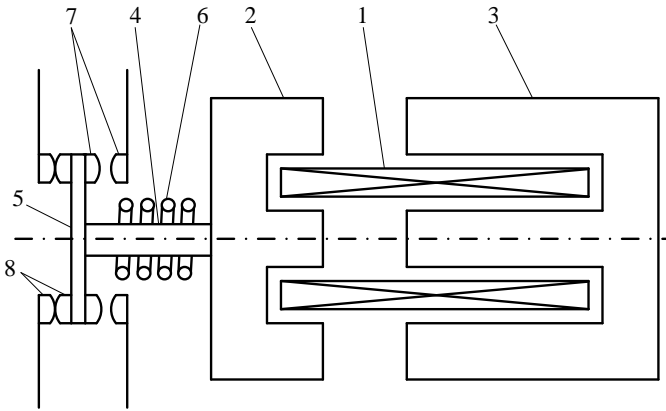


Рисунок 10.2 – Принципова схема електромагнітного реле з поступальним рухом осердя

Виконавчим органом електромагнітних реле є контактні системи, які виконуються залежно від того, в яких колах вони проводять ввімкнення. Якщо контакти вмикають статорні обмотки двигунів, то вони розраховані на великі струми. Такі контакти називаються силовими і мають дугогасні камери. Часто, крім силових контактів, рухома система електромагнітних реле несе на собі блокуючі контакти, що призначені для переключень в колах керування (допоміжних колах). Як силові, так і блокуючі контакти можуть бути замикаючими і розмикаючими. Рухомі контакти з'єднуються чи роз'єднуються з нерухомими, замикають чи розмикають коло струму. Для зменшення перехідного опору контактні поверхні покривають оловом чи виготовляють з срібла. На роботу контактного з'єднання негативно впливає дуга – електричний розряд між контактами, що розмикаються. Для запобігання небажаних явищ, пов'язаних з виникненням дуги, в апаратах автоматичного і ручного керування використовують різноманітні пристрої для гасіння дуги.

При виборі апаратури керування необхідно дотримуватись наступних умов: 1) допустима густина струму і розривна здатність повинні бути не менше заданих; 2) котушка апарата за своєю номінальною напругою повинна

відповідати заданій; 3) магнітна система апарата повина відповідати виду струму.

Для кожної електроустановки складається принципова чи елементарна схема на якій показаний взаємозв'язок всіх елементів, що входять в електроустановку. Така система дозволяє виявити принцип роботи електроустановки. На схемі завжди всі контакти всіх електричних апаратів зображують у відключеному стані. Розглянемо найпростіші схеми керування асинхронним двигуном.

В схемі реверсивного керування трифазним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором, що зображена на рисунку 10.3, зображений реверсивний магнітний пускач з двома однополюсними тепловими реле.

Розглянемо почерговість роботи електричних апаратів в схемі рисунка 10.3. Ввімкненням автомата АВ підготовляють схему до пуску. Якщо буде натиснута кнопка *B* (вперед), коло котушки контактора отримує живлення через наступні елементи цього кола: розмикаючий контакт *C* (стоп), розмикаючий контакт *H* (назад) і два розмикаючі контакти PT_1 і PT_2 теплових реле. Якір контактора *B* втягнеться, замикаючі силові контакти *B* замкнуться і фази статорної обмотки двигуна C_1, C_2, C_3 будуть з'єднані відповідно з лінійними провідниками мережі *A, B, C*. Ротор двигуна почне обертатись в умовному напрямі «вперед».

Для зміни напрямку обертання спочатку відмикають двигун від мережі шляхом натиснення кнопки *C* (стоп), а потім вмикають кнопку *H* (назад). При цьому отримує живлення котушка контактора *H* (назад) і рухома система контактів підключить обмотку двигуна до лінійних провідників в наступному порядку: C_1-C, C_2-B, C_3-A . Ротор двигуна змінить напрям обертання на протилежний. В обох контакторах, крім головних контактів, позначених так само, як і котушки *B* і *H*, використані по два блокуючих контакти – один замикаючий і один розмикаючий. Замикаючий контакт блокує котушки «чужого» контактора, наприклад, контакт *H* в коло котушки *B*. Таке ввімкнення називається електричним блокуванням, що включає одночасне ввімкнення двох контактів для запобігання короткому замиканню.

Багато вимог якими обумовлюється пуск двигуна як змінного, так і постійного струму, можна виконати в тій чи іншій мірі тільки при автоматичному пуску. В багатьох випадках необхідно здійснити пуск двигуна так щоб задовільнити при цьому цілий ряд умов. Наприклад, пуск в функції швидкості, пуск в функції часу, пуск в функції струму та інші випадки.

Як приклад розглянемо схему автоматичного пуску асинхронного двигуна з фазним ротором в функції часу наведена на рисунку 10.4.

Натисненням на кнопку *П* подається напруга контактора *K* і двигун з пускувими реостатами в колі ротора починає розганятись. Одночасно з силовими контактами *K*, замикається блокуючий контакт, що шунтує пускову кнопку. Контактори прискорення $1У, 2У, 3У$ керуються контактами механічних реле часу $1МР, 2МР, 3МР$. Якір контактора *K*, втягуючись приводить в рух механізм першого маятникового реле часу, яке через заданий час t_1

замикає свій контакт 1MP в колі котушки контактора 1У і тим самим ступінь 1СП пускового реостата буде зашунтований силовими контактами 1У.

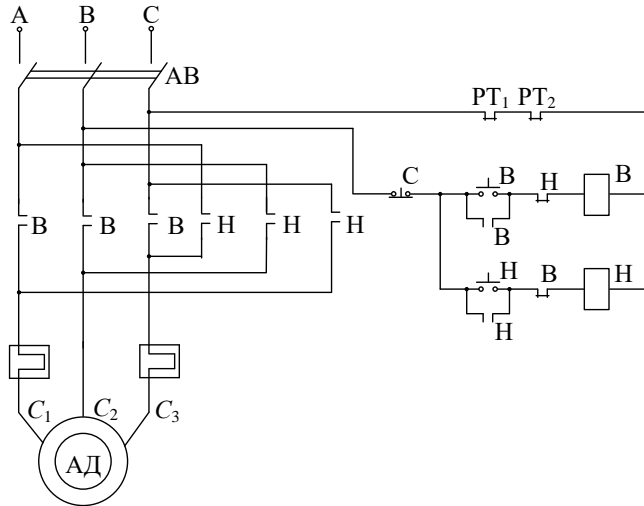


Рисунок 10.3 – Схема реверсивного керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором

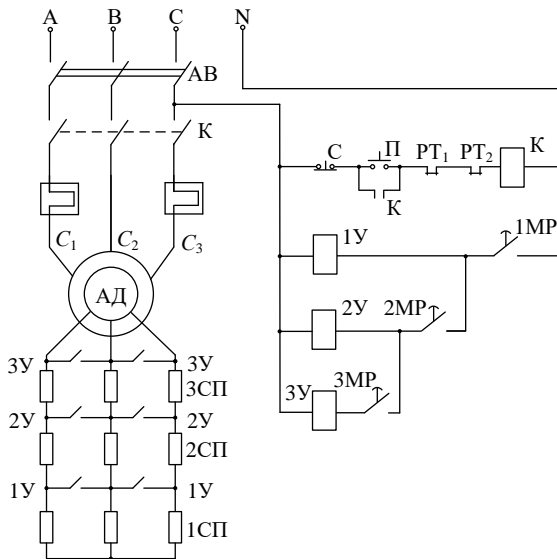


Рисунок 10.4 – Схема пуску асинхронного двигуна з фазним ротором в функції часу

Разом з тим як ір контактора 1У вмикає друге маятникове реле, яке через проміжок часу t_2 замикає свій контакт 2МР в колі котушки контактора 2У. Друга ступінь пускового реостата 2СП буде зашунтована контактами 2У в результаті чого знову збільшиться обертовий момент двигуна, та ротор знову отримує прискорення. Аналогічно спрацьовує третій ступінь прискорення по закінченню часу t_3 .

Всі ступені пускового реостата будуть зашунтовані і двигун закінчить розгін вже на звичайній кінцевій характеристиці. Захист двигуна від тривалої роботи з перевантаженням здійснюється тепловими реле РТ1 і РТ2.

Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити на розбірних зразках будову і принцип дії апаратури керування.
2. Ознайомитись з приладами і апаратурою досліджуваної установки, записати в звіт про роботу їхні технічні дані.
3. Скласти схему дистанційного керування реверсним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором (рис. 10.3).
4. Провести пуск, зупинку, реверс асинхронного двигуна при відсутності навантаження на валу.

Аналіз і обробка результатів експерименту

1. В звіті описати роботу схем дистанційного керування асинхронним двигуном з короткозамкнутим ротором, наведених на рисунках 10.3, 10.4.
2. Вказати характерні неполадки для схем керування асинхронним двигуном і провести аналіз їх впливу на роботу схеми.

Контрольні запитання

1. Що таке електропривод і яка роль в ньому електродвигуна зі схемою керування?
2. Конструкція і принцип дії електромагнітних реле.
3. Чим відрізняються силові контакти від блок-контактів?
4. Як побудоване теплове реле і в чому особливості його експлуатації?
5. Чим відрізняється прямий пуск короткозамкненого асинхронного двигуна від пуску асинхронного двигуна з фазним ротором (з контактними кільцями)?
6. Як провести реверс асинхронного двигуна?
7. Як буде впливати на роботу схеми рисунку 10.3 від з'єднання замикаючих двох контактів B , що шунтують кнопку B , або замикаючих блок-контактів H , що шунтують кнопку H .
8. Що може статись, якщо помилково в коло котушки контактора B не під'єднати розмикаючі блок-контакти H , а в коло котушки H не під'єднати розмикаючі блок-контакти B ?

Список використаних джерел

1. Безвесільна О.М. Толочко Т.О. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ. 2023, 328 с.
2. Видмиш А.А., Ярошенко Л.В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ. 2020, 387 с.
3. Донець О.В. Теорія електропривода. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2021, 148 с.
4. Лавріненко Ю.М. Основи електропривода. К.: Ліра-К. 2021, 532 с.
5. Синявський О.Ю., Лавріненко Ю.М., Войтюк Д.Г., Бунько В.Я., Рамш В.Ю. Електропривод виробничих машин і механізмів. К.: ФОП Ямчинський О.В. 2020, 444 с.
6. Щерба А.А., Поворознюк Н.І. Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ. 2022, 497 с.

E50

Електромеханічні пристрої. Методичні вказівки до виконання лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форм навчання / укладач В. В. Лишук. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 116 с.

Комп'ютерний набір
Редактор

Віктор ЛИШУК
Віктор ЛИШУК

Підп. до друку «__»_____2025 р.
Формат 60x84/16. Папір офс.
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 7,25.
Тираж 50 прим.

Відділ іміджу та промоції
Луцького національного технічного університету
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ВІП Луцького НТУ

