

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО
ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ І КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка
імені професора В.В. Овчарова»

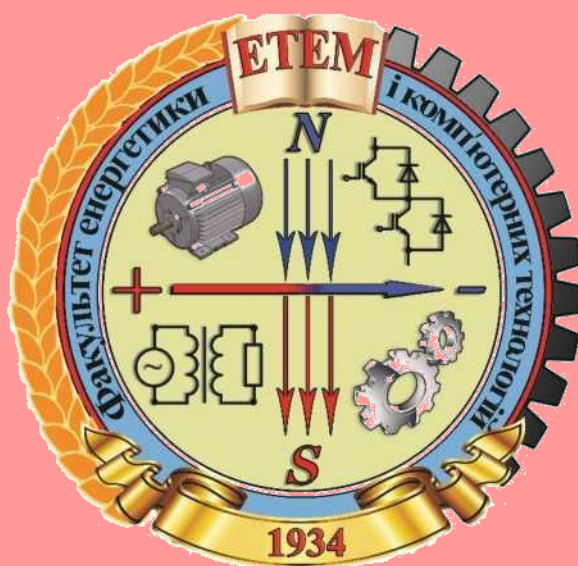
ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр»

зі спеціальності 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»



Мелітополь, 2020

УДК 621.3(075)

Основи електропривода: Методичні вказівки до лабораторної роботи «Дослідження механічних та електромеханічних характеристик трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка» / С.О. Квітка, М.В. Постнікова, О.М. Речина. – Мелітополь: ТДАТУ, 2020. – 36 с.

Розробники: к.т.н., доцент Квітка С.О.,
к.т.н., доцент Постнікова М.В.,
асистент Речина О.М.

Рецензент: д.т.н., професор Діордієв Володимир Трифонович Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова
Протокол №6 від 9 січня 2020 р.

Затверджено методичною комісією факультету енергетики і комп'ютерних технологій ТДАТУ
Протокол №5 від 29 січня 2020 р.

© Квітка С.О.
Постнікова М.В.
Речина О.М.

ЗМІСТ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ СТУДЕНТА В ЛАБОРАТОРІЇ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА | 4 |
| КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ | 7 |
| ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ | 8 |
| 1 Мета роботи | 8 |
| 2 Основні теоретичні відомості | 8 |
| 3 Завдання самостійної роботи студента | 18 |
| 4 Програма роботи | 18 |
| 5 Технічна характеристика лабораторного устаткування | 20 |
| 6 Вказівки щодо виконання роботи | 21 |
| 7 Вказівки щодо оформлення звіту | 35 |
| 8 Контрольні питання | 35 |
| 9 Список літератури | 35 |
| ДОДАТОК А Зразок оформлення титульного листа звіту з лабораторної роботи | 37 |

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ СТУДЕНТА В ЛАБОРАТОРІЇ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

На лабораторних заняттях студент повинен закріпити одержані теоретичні знання і набути практичних навичок з дослідження і налагодження електроприводів.

Лабораторні роботи з електропривода відрізняються від лабораторних робіт з електротехніки і електричних машин складністю схем, великою кількістю різного електрообладнання (електричні машини, вимірювальні прилади, апаратура керування) і відмінностями в режимах їх роботи.

Якщо раніше студент вивчав окремі види обладнання, то тепер – роботу комплексу обладнання, призначеного для виконання певної виробничої функції. Тому при виконанні лабораторних робіт з електропривода студент повинен самостійно вирішувати практичні інженерні задачі, вміти складати схеми електроприводів, регулювати і налагоджувати як машини і апарати зокрема, так і весь електропривод в цілому.

Лабораторні роботи з електропривода виконують бригадами по 2-4 чоловіки. Кожна бригада повинна виконувати всі лабораторні роботи передбачені календарно-тематичним планом кафедри. Одержавши графік виконання робіт, студент завчасно готується до кожної з них, вивчаючи відповідні розділи підручника, складаючи повні робочі схеми дослідження, таблиці, виконуючи необхідні розрахунки.

До виконання робіт допускаються студенти, які мають оформлений звіт з попередньої роботи, які знають зміст та методику виконання поточної роботи.

Перед виконанням лабораторної роботи студент повинен ознайомитися з обладнанням робочого місця, паспортними даними усіх машин і апаратів, що застосовуються в роботі, одержати інші характеристики цього обладнання. Лише після ознайомлення з обладнанням робочого місця і перевірки викладачем ступеня підготовки студента до заняття, він може виконувати роботу.

Для роботи студент самостійно вибирає вимірювальні прилади, реостати, апарати керування і складає схему. При цьому необхідно керуватися правилом, що силові кола і кола керування збирають окремо; з'єднують спочатку послідовні, а потім паралельні кола. Також необхідно дотримуватися правила: не закріплювати під одним затискачем більше двох кінців проводів. Їх потрібно розподілити рівномірно між іншими затискачами. Приєднання електровимірювальних приладів до електричних машин здійснюється через клемну колодку, яка закріплена в нижній частині збірної сторони лабораторних стендів.

Перед подачею напруги на схему необхідно переконатись, що движки реостатів знаходяться у вихідному положенні: опір пускових реостатів повинен бути повністю введений в коло якоря або ротора (для АД з фазним ротором), а опір шунтового реостату в колі збудження двигунів постійного струму – повністю виведено.

Напругу на затискачі електродвигуна потрібно подавати послідовним вмиканням апаратури керування зі сторони живлення, а знімати – у зворотному порядку.

Після перевірки схеми викладачем або лаборантом її вмикають, звертають увагу на напрямок обертання машин і правильність вмикання приладів. Після перевірки схеми при різних режимах роботи починають виконувати досліди.

Під час проведення дослідів стежать за показами приладів і режимами роботи всього обладнання. Показання приладів знімають в одному заздалегідь установленому порядку, записуючи в першу чергу ті параметри, які при роботі змінюються найшвидше. При проведенні дослідів всі дані випробувань, технічні дані обладнання акуратно записують в таблиці фіксації експериментальних даних, рекомендовані до кожної лабораторної роботи.

Після проведення дослідів і виконання необхідних розрахунків складають звіт по роботі, який вміщує всі фактичні дані (схеми, таблиці, графіки) та аналіз результатів.

При виконанні лабораторних робіт необхідно суворо дотримуватись правил з техніки безпеки. В лабораторії теорії електропривода доводиться мати справу з відкритими схемами і при невиконанні елементарних правил електробезпеки можна потрапити під електричну напругу.

Перед початком роботи в лабораторії теорії електропривода студент повинен ознайомитись із схемою живлення лабораторії і робочих місць, з'ясувати, де розташовані апарати для вмикання і вимикання живлення всієї лабораторії з усіх систем живлення (змінний і постійний струм різних напруг). Крім того, потрібно ознайомитися з правилами техніки безпеки та надання першої допомоги потерпілому від електричного струму; прийняти їх до обов'язкового виконання та розписатися про це в журналі з техніки безпеки. Студенти, які не пройшли інструктаж з техніки безпеки, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

При складанні схеми необхідно слідкувати за тим, щоб контактні з'єднання були щільними, провідники не перетинали проходів і не потрапляли на рухомі частини машин і апаратів. Після складання схеми потрібно прибрати всі зайві провідники, апарати, прилади тощо.

Перед подачею напруги на схему необхідно попередити товаришів по роботі і перевірити, чи не доторкається хтось до струмопровідних частин та до частин, що обертаються. Під час проведення дослідів потрібно бути уважним та обережним, не відволікатися сторонніми справами і розмовами. Ніяких перемикань під напругою робити не можна. На цей період треба вимкнути схему.

При появі будь-яких ознак ненормальної роботи обладнання (сторонні шуми в машинах, дим, запах горілого тощо) та обриві проводів потрібно негайно вимкнути схему і доповісти про те, що сталося, викладачу або лаборанту. Без їх дозволу знову схему не вмикати. Результати дослідів потрібно показати керівнику і тільки з його дозволу розбирати схему. Після закінчення роботи привести в порядок робоче місце. Студент повинен дбати про збереження обладнання лабораторії.

Основні правила охорони праці при виконанні лабораторних робіт

Для безпечної роботи в лабораторії теорії електропривода кожен студент повинен знати і суворо дотримуватися наступних основних правил безпеки:

1. Збирати схему і тим більш підключати її до мережі дозволяється тільки після ознайомлення з усім обладнанням, апаратурою та вимірювальними приладами, їх принципом дії, призначенням в схемі і номінальними даними.

2. Електричну схему можна збирати тільки при виключеному вимикачі з боку живлення.

3. Зібрану електричну схему перед вмиканням обов'язково повинен перевірити викладач або лаборант.

4. Перед включенням електричної схеми під напругу треба обов'язково перевірити, чи знаходяться рукоятки перемикачів та повзунки реостатів у вихідному положенні.

5. При кожному включенні схеми необхідно попередити про це своїх товаришів.

6. Підключати електричну схему апаратами керування до мережі необхідно послідовно, починаючи з боку живлення: автоматом, перемикачем або кнопкою "Пуск". Відключати схему необхідно в зворотній послідовності: натиснути кнопку "Стоп", а потім вимкнути автоматичний вимикач.

7. Вносити зміни в схему (робити перемикання) дозволяється тільки при вимкненому автоматі.

8. Під час виконання роботи не доторкатися до оголених кінців проводів, металевих затискачів, затискачів вимірювальних приладів, апаратів, електродвигунів або іншого обладнання, яке знаходиться під напругою.

9. Не знімати захисних огорож з апаратів, приладів, обладнання.

10. Слідкувати за щільністю розбірних контактних з'єднань.

11. Замір опору ізоляції електродвигуна мегомметром необхідно виконувати при повному його вимкненні від електричної мережі.

12. Суворо дотримуватись вказівок викладача щодо особливостей виконання кожної роботи.

13. При виявленні несправностей в схемі, необхідно терміново зупинити роботу і повідомити про це викладача.

14. Категорично забороняється доторкатися рукою, ногою до частин обладнання, що обертаються.

15. При нещасному випадку необхідно миттєво вимкнути установку від мережі, негайно надати першу допомогу потерпілому. Аптечка швидкої допомоги знаходиться в аудиторії 1.123. За необхідності визвати карету швидкої допомоги за телефоном 103.

16. У випадку пожежі негайно вимкнути автоматичні вимикачі постійного та змінного струмів на розподільчих щитках кожного робочого місця та натиснути кнопки "Стоп" на головному розподільчому щиті лабораторії електропривода, вжити заходів щодо ліквідації пожежі. Вуглекислотний вогнегасник знаходиться в лабораторії. При необхідності визвати пожежну команду за телефоном 101.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Кількісна оцінка за виконання кожної лабораторної роботи визначається за наступними показниками:

1. вхідний контроль підготовки до лабораторної роботи, за який максимально можна отримати 20 % від загальної кількості балів за лабораторну роботу;

2. підготовка та оформлення звіту з лабораторної роботи, за який максимально можна отримати 30 % від загальної кількості балів;

3. вихідний контроль з лабораторної роботи (захист лабораторної роботи), за який максимально можна отримати 50 % від загальної кількості балів.

Вхідний контроль підготовки до лабораторної роботи здійснюється шляхом усного опитування студента на початку заняття. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно наданим відповідям.

Підготовка та оформлення звіту з лабораторної роботи здійснюється студентом безпосередньо на лабораторному занятті. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно виконаним пунктам звіту. Приклад оформлення титульного листа звіту наведено у додатку А.

Вихідний контроль з лабораторної роботи здійснюється шляхом тестування наприкінці заняття. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно наданим відповідям.

Лабораторна робота вважається виконаною успішно, якщо студент у підсумку отримав не менше, ніж 60 % балів. У протилежному випадку студент зобов'язаний підвищити бал за лабораторну роботу у відведений термін на консультації викладача, який її проводив. Підвищення рейтингу полягає у виконанні певних завдань щодо лабораторної роботи: вхідний контроль, підготовка та оформлення звіту, вихідний контроль. Підвищити рейтинг з лабораторної роботи можна не більше, ніж до 60 % балів.

У разі пропуску лабораторного заняття студент повинен його відпрацювати у відведений термін на консультації викладача, який його проводив. Якщо лабораторне заняття пропущене з поважної причини, то студент може отримати за результатами відпрацювання максимальну кількість балів. Якщо лабораторне заняття пропущене без поважної причини, то студент може отримати за результатами відпрацювання максимально 60 % балів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ І МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

1 Мета роботи: вивчити електромеханічні і механічні характеристики трифазного АД; засвоїти методику розрахунку і експериментального одержання електромеханічних та механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

2 Основні теоретичні відомості

Серед двигунів змінного струму найбільш поширені прості і надійні в експлуатації трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Область застосування асинхронних електродвигунів досить широка – від приводів пристроїв автоматики до приводу потужного горновидобувного обладнання: екскаваторів, подрібнювачів, млинів тощо.

Для асинхронних електродвигунів існує дві електромеханічні характеристики – залежності кутової швидкості обертання ротору машини від величини струму ротора $\omega = f(I'_2)$ або струму статора $\omega = f(I_1)$. З практичної точки зору більш зручно користуватися залежністю за струмом статора.

Механічною характеристикою АД називається залежність кутової швидкості обертання валу машини від електромагнітного моменту $\omega = f(M)$.

Природні характеристики електродвигуна можна одержати при забезпеченні номінальних значень показників мережі живлення і параметрах машини.

Рівняння електромеханічної (ЕМХ) і механічної (МХ) характеристики асинхронного двигуна можуть бути одержані на основі розгляду спрощеної Г-подібної схеми заміщення фази статора зображеної на рисунку 1.

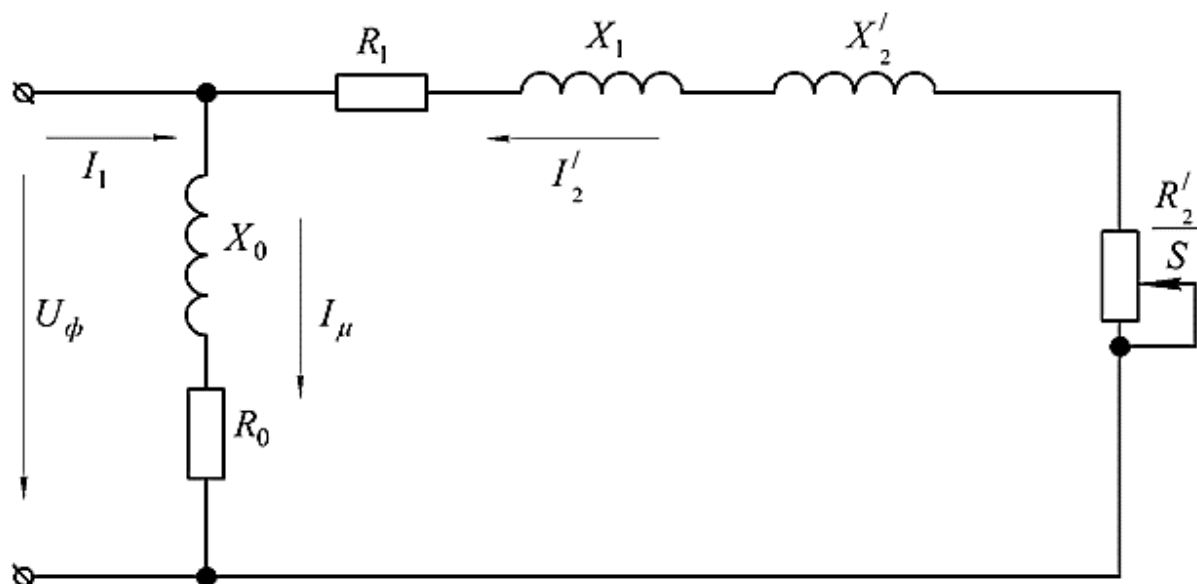


Рисунок 1 – Г-подібна схема заміщення фази статора асинхронного електродвигуна

При виведенні рівняння ЕМХ і МХ прийняті такі припущення:

- активний опір обмотки ротора не залежить від частоти струму в ньому;
- насичення магнітної системи двигуна не впливає на величину індуктивних опорів обмоток статора і ротора;
- провідність контура намагнічування не залежить від навантаження, а лише від напруги;
- додаткові втрати енергії у двигуні не враховуються;
- моменти, що створюються магніторушійними силами вищих гармонічних складових не враховуються.

Згідно із схемою заміщення фазний струм обмотки ротора, зведений до обмотки статора, визначається залежністю

$$I_2' = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R_2' / S)^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (1)$$

де U_ϕ – діюче значення фазної напруги, В;

S – ковзання електродвигуна, в.о.;

R_1, X_1 – активний та індуктивний опір обмотки статора, Ом;

R_2', X_2' – приведений активний і індуктивний опір обмотки ротора, Ом.

Електромеханічну характеристику по струму статора можна отримати через провідності схеми заміщення

$$I_1 = U_\phi \left[\frac{1}{R_0 + jX_0} + \frac{1}{R_1 + R_2' / S + jX_k} \right] \quad (2)$$

або

$$I_1 = \sqrt{I_\mu^2 + (-I_2')^2}, \quad (3)$$

де X_k – індуктивний опір двигуна при короткому замиканні, Ом;

R_0, X_0 – активний та індуктивний опір контура намагнічування, Ом;

I_μ – струм намагнічування – струм холостого ходу, А.

За рівнянням (2) зручно аналізувати роботу АД за різних енергетичних режимів роботи, а рівняння (3) дозволяє практично визначити струм статора та побудувати ЕМХ за струмом статора.

Струм намагнічування визначають

$$I_\mu = \sqrt{I_{1н}^2 + (-I_{2н}')^2}, \quad (4)$$

де I_{1n} , I_{2n}' – відповідно номінальний струм статора і номінальний приведений струм ротора, А.

Номінальний струм статора

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos\varphi_n \eta_n}, \quad (5)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна, Вт;

U_n – номінальна лінійна напруга, Ом;

$\cos\varphi_n$ – номінальний коефіцієнт потужності, в.о.;

η_n – номінальний ККД електродвигуна, в.о.

З рівняння (2) можна зробити наступні висновки:

– при синхронній швидкості ($S = 0$) двигун споживає струм намагнічування $I_1 = I_\mu$;

– при нерухомому роторі ($S = 1$) двигун споживає пусковий струм $I_1 = I_n$; пусковий струм двигуна не залежить від навантаження, а залежить від параметрів двигуна (R_1, X_1, R_2', X_2') і величини напруги U_ϕ на обмотці статора;

– при швидкості, більшій за синхронну ($S < 0$) активна складова струму статора змінює свій знак – машина працює в генераторному режимі.

Часто ЕМХ АД показують у вигляді залежності струму від ковзання S . На рисунку 2 наведені ЕМХ $\omega = f(I_2')$, $\omega = f(I_1)$. На осі ординат відкладені кутова швидкість і ковзання, які пов'язані між собою співвідношенням

$$\omega = \omega_0(1 - S), \quad (6)$$

де ω_0 – синхронна швидкість обертання електродвигуна, рад/с.

Електромеханічна характеристика має наступні характерні точки:

1) $S = 0$, $\omega = \omega_0$, $I_2' = 0$, $I_1 = I_\mu$ – ідеального холостого ходу;

2) $S = 1$, $\omega = 0$, $I_1 = I_n$ – короткого замикання (пуску);

3) $S_1 = -R_2' / R_1$, $\omega_1 = \omega_0(1 - S_1)$, $I_2' = I_{2\max}' = U_\phi / X_k$ – максимального значення струму в області від'ємних ковзань;

4) $S \rightarrow \pm\infty$, $\omega \rightarrow \mp\infty$, $I_2' = I_\infty = U_\phi / \sqrt{R_1^2 + X_k^2}$ – асимптотичне значення струму ротора при безмежному збільшенні ковзання і швидкості.

Рівняння механічної характеристики АД можна отримати із рівняння балансу потужності в колі ротора.

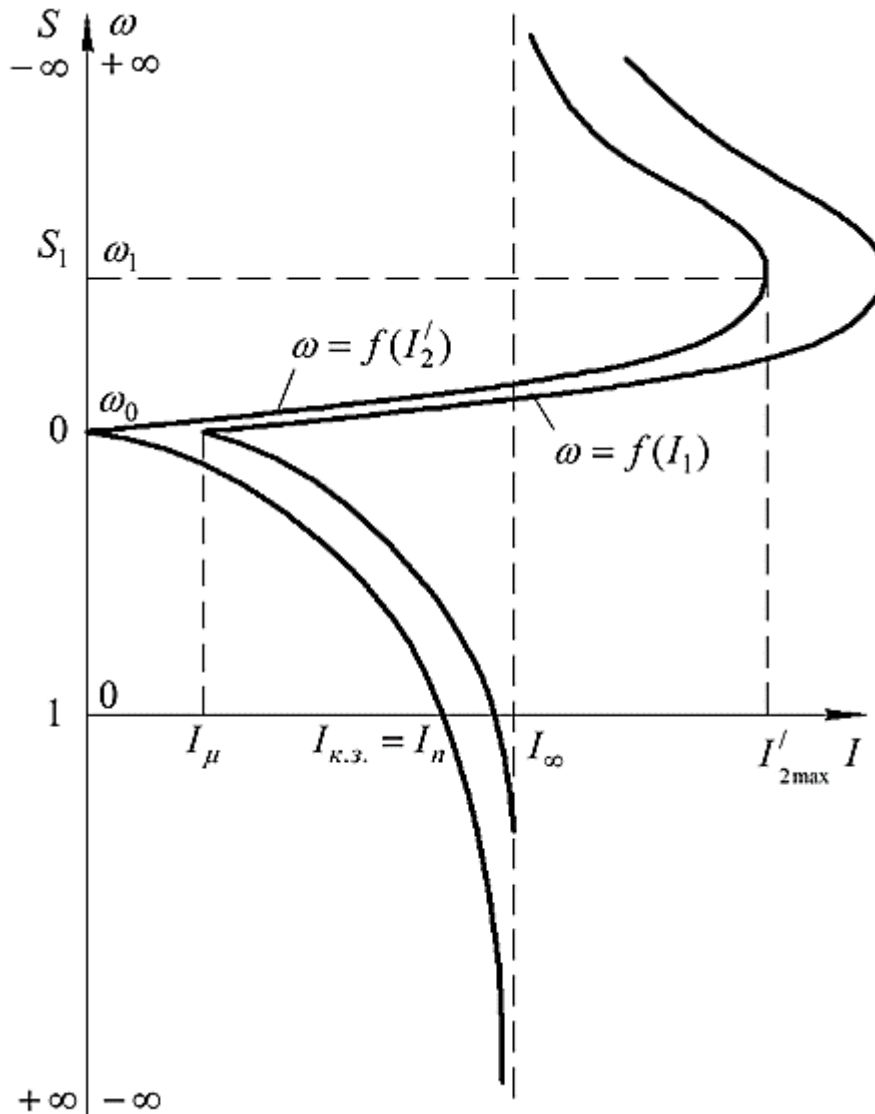


Рисунок 2 – Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна за струмом ротора $\omega = f(I'_2)$ та статора $\omega = f(I_1)$

Згідно з законом Джоуля-Ленца втрати потужності в колі ротора, виражені через електричні величини

$$\Delta P_2 = 3I_2'^2 R_2', \quad (7)$$

Втрати потужності в колі ротора виражені через механічні величини АД – різниця між електромагнітною потужністю $\Delta P_2 = M\omega_0$ і корисною механічною потужністю на валу $\Delta P_2 = M\omega$.

$$\Delta P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 S \quad (8)$$

Прирівнявши (7) і (8) отримаємо рівняння електромагнітного моменту двигуна в параметричній формі

$$M = \frac{3I_2'^2 R_2'}{\omega_0 S} = \frac{3U_\phi^2 R_2'}{\omega_0 S \left[(R_1 + R_2'/S)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (9)$$

Механічна характеристика, побудована за (9) має вигляд, показаний на рисунку 3 крива 1.

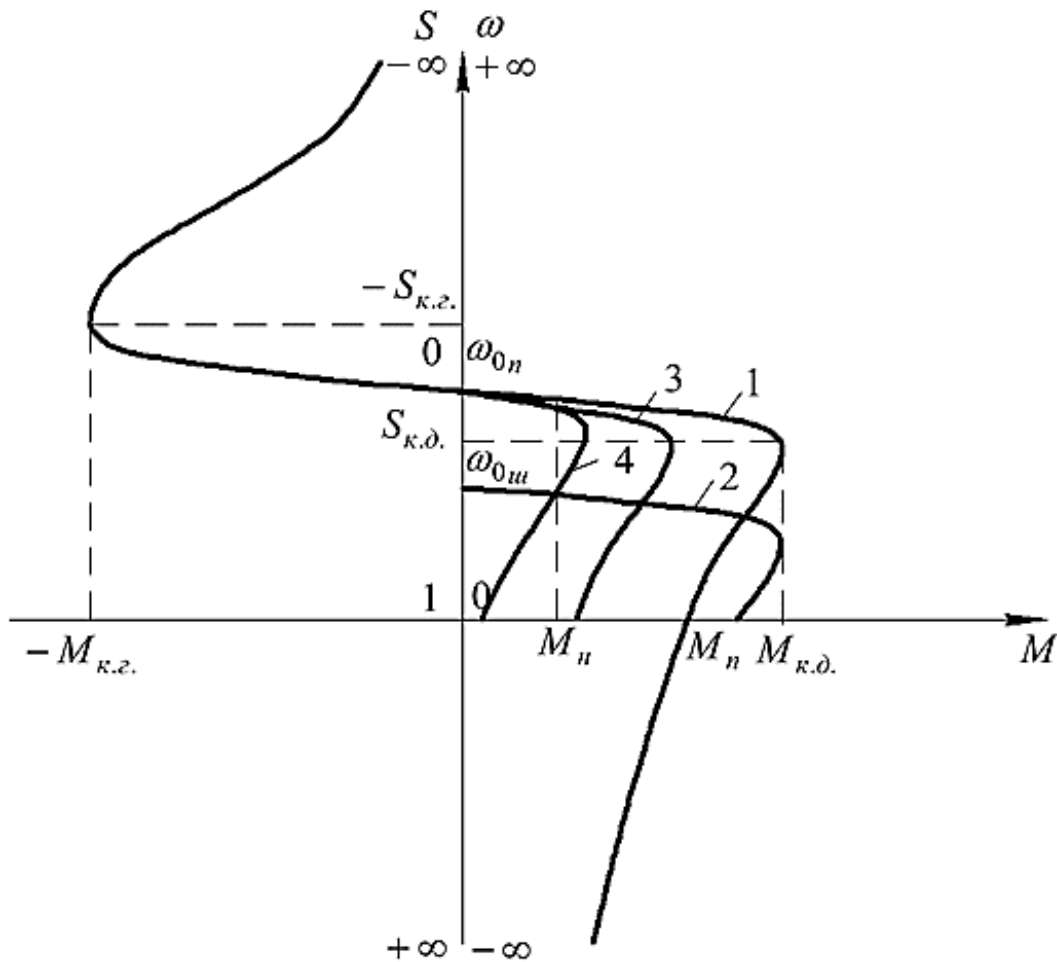


Рисунок 3 – Механічні характеристики асинхронного двигуна:
 1 – природна, 2, 3, 4 – штучні при зміні частоти напруги живлення $f_1 < f_{1н}$,
 при зниженні напруги живлення $U_1 < U_{1н}$ та введенні в коло статора
 додаткового опору $Z_1 > Z_\partial$ відповідно

Графік залежності має два екстремуми: критичні (максимальні) моменти у двигунному (1 чверть) і генераторному (2 чверть) режимах. Взнявши похідну рівняння (9) по S та розв'язавши рівняння отримаємо значення критичного ковзання, при якому двигун розвиває максимальний момент

$$S_{\kappa} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (10)$$

Підставивши S_{κ} в (9) одержимо вираз максимального моменту

$$M_{\kappa} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \quad (11)$$

Критичний момент АД є найбільшим значенням електромагнітного моменту, який може розвивати двигун, що працює при заданих значеннях напруги і опорах. У формулі (11) знак «+» ставлять при розрахунку характеристики в двигунному режимі роботи, знак «-» – у генераторному.

Якщо у (9) замість S підставити значення ковзання при пуску $S = 1$, то дістанемо вираз для пускового моменту

$$M_n = \frac{3U_{\phi}^2 R_2'}{\omega_0 \left[(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (12)$$

Пусковий момент не є найменшим значенням моменту в двигунному режимі. При малих кутових швидкостях ($S_{min} = 0,8 \dots 0,85$) МХ АД має провал внаслідок впливу асинхронних моментів від вищих непарних гармонік в магнітному полі обмоток. Це необхідно враховувати при пуску двигуна під навантаженням.

Аналізуючи рівняння (9, 10, 11) можна зробити наступні висновки:

- крутний момент АД пропорційний квадрату напруги;
- критичне ковзання за абсолютною величиною однакове для двигунного і генераторного режимів;
- критичне ковзання не залежить від напруги, а лише від параметрів двигуна;
- критичне ковзання пропорційне активному опору кола ротора;
- критичний момент за абсолютною величиною в режимі генератора більший, ніж у двигунному режимі, що обумовлено впливом падіння напруги на активному опорі статора.

На рисунку 3 наведена механічна характеристика АД і її характерні точки, визначивши координати яких можна побудувати природну МХ:

- 1) $S = 0$, $\omega = \omega_0$, $M = 0$ – ідеального холостого ходу;
- 2) $S = 1$, $\omega = 0$, $M = M_{\kappa.з.} = M_n$ – точка короткого замикання (пуску);

- 3) $S = S_{к.д.}$, $\omega = \omega_{к.д.}$, $M = M_{к.д.}$; $S = -S_{к.з.}$, $\omega = \omega_{к.з.}$, $M = -M_{к.з.}$ – точки максимальних моментів в режимі двигуна і генератора;
- 4) $S = S_n$, $\omega = \omega_n$, $M = M_n$ – точка номінального режиму;
- 5) $S \rightarrow \pm\infty$, $\omega \rightarrow \mp\infty$, $M \rightarrow 0$ – асимптота МХ, якою є вісь швидкості.

Енергетичний режим роботи АД визначається величиною і знаком ковзання, а саме:

- 1) $S = 0$, $\omega = \omega_0$ – режим ідеального холостого ходу (машина споживає з мережі струм намагнічування, ротор двигуна обертає робоча машина);
- 2) $0 < S < 1$, $\omega_0 > \omega > 0$ – двигунний режим;
- 3) $S = 1$, $\omega = 0$, $M = M_{к.з.} = M_n$ – режим короткого замикання (споживана з мережі електрична енергія витрачається на нагрівання опорів обмоток двигуна);
- 4) $S < 0$, $\omega > \omega_0$ – режим рекуперативного гальмування (генераторний режим паралельно з мережею живлення);
- 5) $S > 1$, $\omega < 0$ – режим гальмування противмиканням (генераторний режим послідовно з мережею живлення);
- 6) Режим динамічного гальмування – генераторний режим незалежно від мережі змінного струму.

В двигунному режимі роботи АД споживає активну та реактивну енергії з мережі. При цьому електрорушійні сили статора і ротора співпадають за напрямком, оскільки обертальне магнітне поле перетинає провідники статора і ротора в одному напрямку. Знаки електромагнітного моменту та швидкості співпадають. Механічні характеристики розташовуються у I та III квадрантах (рисунок 4).

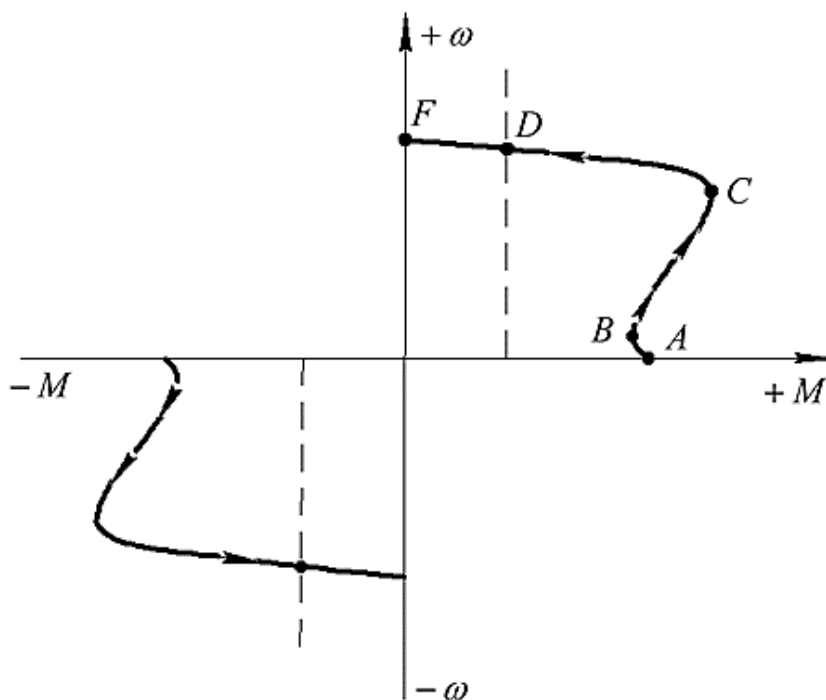


Рисунок 4 – Механічні характеристики АД

Точки A, B, C, D, F відповідають характерним точкам роботи: пускового моменту, мінімального моменту, максимального моменту, номінального навантаження та ідеального холостого ходу відповідно.

Рекуперативне гальмування (генераторне гальмування) виникає, коли кутова швидкість ротора перевищує синхронну ($\omega > \omega_0$) за рахунок енергії, яка поступає на вал АД від зовнішнього джерела. При цьому ЕРС ротора змінює свій знак, так як обертальне магнітне поле перетинає його провідники в зворотному напрямку, а ЕРС статора зберігає свій знак. При цьому активна потужність віддається в мережу. Реактивна потужність споживається з мережі як і в режимі двигуна. Знаки електромагнітного моменту та швидкості протилежні. При цьому знак швидкості залишається таким же, як у двигунному режимі, а момент – змінює знак. Механічні характеристики розташовуються у II і IV квадрантах (рисунок 5).

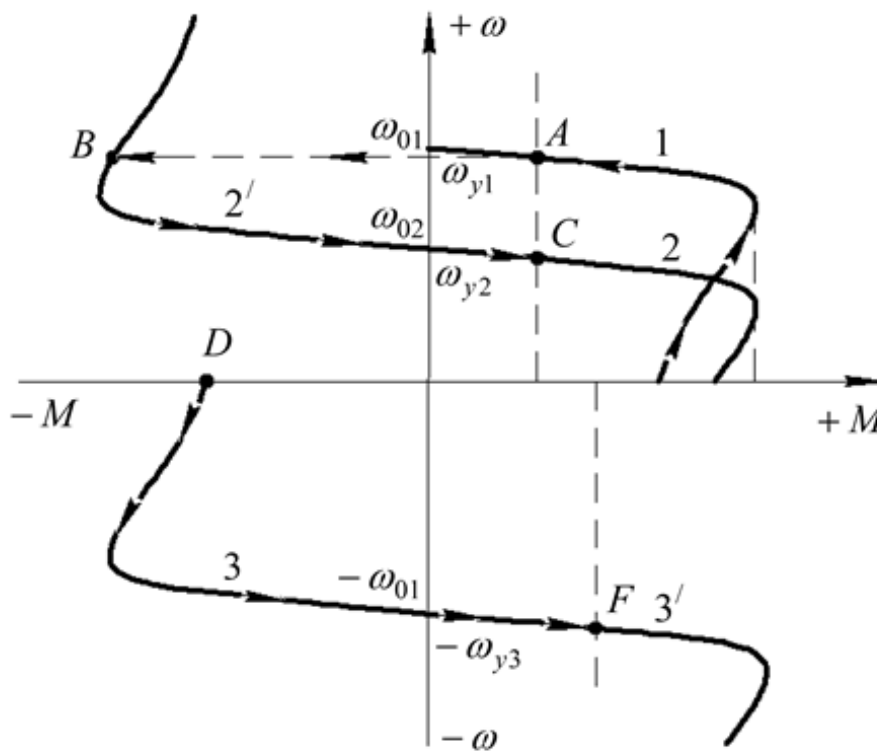


Рисунок 5 – Механічні характеристики АД при рекуперативному гальмуванні

Режим може виникнути при: частотному керуванні і зниженні частоти перетворювача; перемиканні багатшвидкісного двигуна з меншого числа пар полюсів на більше (з вищої швидкості на нижчу); спуску вантажу. В усіх цих випадках АД працює як асинхронний генератор паралельно з мережею живлення.

Механічні характеристики АД, що відповідають рекуперативним гальмівним режимам, наведено на рис. 5 – криві 2' та 3'. Процес зниження швидкості АД супроводжується переходом двигуна у режим РГ. Припустимо, що АД працював на МХ 1 в точці A з кутовою швидкістю ω . При перемиканні

на нижчу швидкість робоча точка АД переходить в точку B на МХ 2', ділянка якої $B - \omega_{02}$ відповідає рекуперативному гальмуванню. В точці C МХ 2 АД працює з усталеною швидкістю ω_{y2} . Рекуперативне гальмування може бути реалізовано в ЕП вантажопідйомних механізмів при спуску вантажу. Для цього (після реверсування) АД вмикається в точці D в напрямку спуску вантажу МХ 3. Після розгону він працює в точці F МХ 3' з усталеною кутовою швидкістю $-\omega_{y3}$. При цьому здійснюється процес спуску вантажу з віддачею активної енергії в мережу.

Гальмування противмиканням для АД з КЗ ротором може бути здійснено для приводів як з реактивними так і активними моментами опору зміною чергування двох фаз напруги живлення АД на ходу. При цьому знак електромагнітного моменту змінюється на протилежний, а знак швидкості – зберігається. Характеристики знаходяться у II і IV квадрантах (рисунок 6).

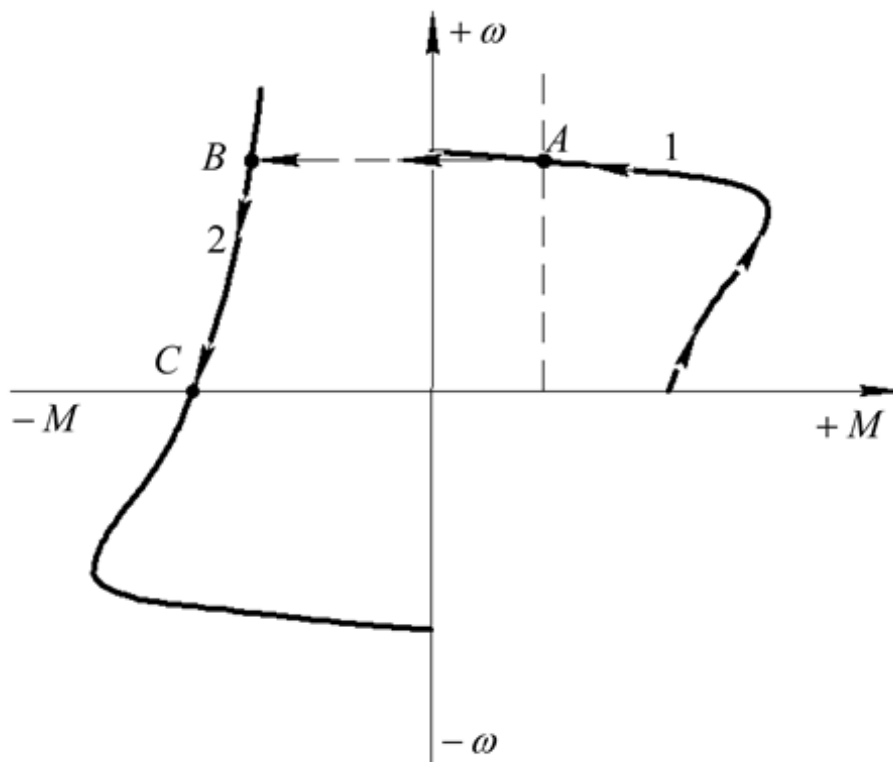


Рисунок 6 – Механічні характеристики АД при гальмуванні противмиканням

Припустимо, що АД працює в точці A двигунного режиму на МХ 1. При зміні чергування двох фаз робоча точка переходить в точку B на МХ 2, ділянка якої $B - C$ відповідає гальмуванню противмиканням. В момент зупинки в точці C двигун вимикають.

При гальмуванні противмиканням, як правило, необхідно обмежувати струм і момент АД, що досягається ввімкненням додаткових резисторів в коло статора або ротора.

Недоліками гальмування противмиканням АД є великі втрати енергії і мала жорсткість МХ. Аналітично МХ АД у режимі гальмування

протівмиканням описуються тими ж рівняннями, що й МХ двигунного режиму. При цьому слід відзначити, що режим протівмикання має місце при ковзаннях, більших за одиницю.

Електродинамічне гальмування АД здійснюється при відключенні працюючого електродвигуна від мережі живлення та подачі в обмотку статора постійного струму або підключенням паралельно до обмоток статора конденсаторів. В першому випадку маємо режим динамічного гальмування з незалежним збудженням, у другому – із самозбудженням.

Щоб створити режим електродинамічного гальмування АД із збудженням постійним струмом, треба вимкнути двигун з мережі змінного струму і ввімкнути його в мережу постійного струму за однією із схем, зображених на рисунку 7, обмеживши постійний струм до значення 3...4 кратностей струму холостого ходу двигуна. Постійний струм, що проходить в обмотці статора, створює нерухоме в просторі магнітне поле, в якому обертається ротор ЕД. В обмотці ротора наводиться ЕРС, під дією якої в замкненому колі цієї обмотки виникає змінний струм. Взаємодією струму ротора з нерухомим магнітним полем статора створюється гальмівний момент. При зниженні кутової швидкості ротора до нуля ЕРС, струм в обмотці ротора і гальмівний момент також зменшуються до нуля. Після зупинки ротора двигун вимикають. Характеристики розташовуються у II і IV квадрантах.

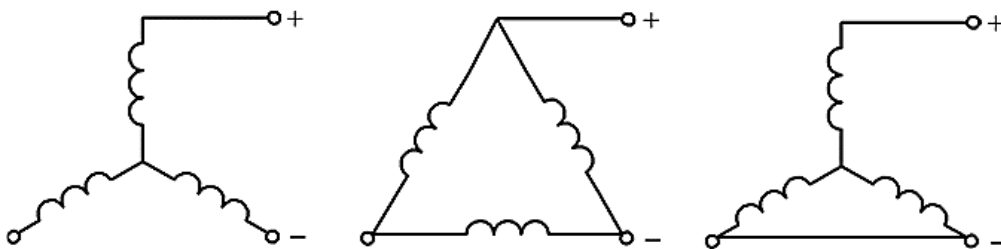


Рисунок 7 – Схеми з'єднання обмоток статора при динамічному гальмуванні з незалежним збудженням

Механічні характеристики АД з КЗ ротором, що працює в режимі електродинамічного гальмування представлена на рисунку 8.

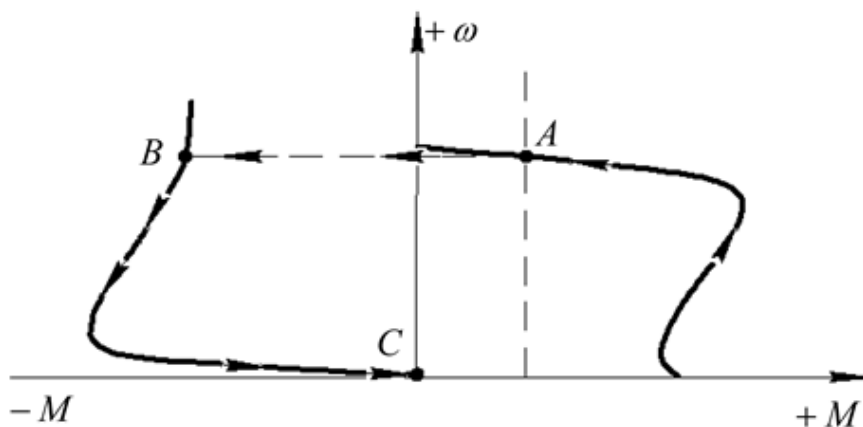


Рисунок 8 – Механічні характеристики АД при динамічному гальмуванні

Практично механічну характеристику асинхронного двигуна отримують при розрахунку за каталожними даними за п'ятьма характерними точками та за рівнянням Клосса

$$M_i = \frac{2M_{\kappa}(1 + \alpha S_{\kappa})}{\frac{S_i}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S_i} + 2\alpha S_{\kappa}}, \quad (13)$$

де $\alpha = \frac{R_1}{R_2'}$ – відношення активного опору обмотки статора до приведеного

значення опору обмотки ротора, в.о. Приймаємо $\alpha = 1$;

S_i – ковзання електродвигуна, в.о.

3 Завдання самостійної роботи студента

1. Опрацювати матеріали по рекомендованій літературі [1 тема 4, лекція «Статичні механічні та електромеханічні характеристики трифазних асинхронних електродвигунів (АД)»; 2 с. 79-98, 3 с. 161-183, 4 с. 428-434]. Пригадати будову, енергетичні режими роботи і основні рівняння асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

2. Виконати навчально – контролюючі завдання до даної лабораторної роботи на НІП ТДАТУ (Кількість правильних відповідей має бути не нижче 60 %).

3. Відповісти на контрольні запитання.

4. Виконати пункт 3 звіту та накреслити таблиці 2-6.

4 Програма роботи

1. Ознайомитись з досліджуваним електродвигуном та обладнанням робочого місця. Записати паспортні дані обладнання.

2. Розрахувати та побудувати природну електромеханічну характеристику досліджуваного асинхронного електродвигуна $\omega = f(I_1)$.

3. За каталожними даними розрахувати та побудувати природну та штучну (при $U_m = 220V$) механічні характеристики трифазного АД $\omega = f(M)$ за п'ятьма характерними точками.

4. Експериментально визначити омичний опір фази статора АД та привести його до розрахункової робочої температури.

5. Провести дослід по встановленню залежності моменту втрат в системі машин $M4 - M3$ від швидкості $\omega = f(M_{втрат})$.

6. Зібрати схему для дослідження механічних та електромеханічних характеристик трифазного асинхронного двигуна.

7. Дослідити електромеханічну $\omega = f(I_1)$ та механічну $\omega = f(M)$ характеристики АД в генераторному, двигунному режимах та у режимі гальмування противмиканням при з'єднанні обмотки статора за схемою «зірка» при напрузі мережі $U_m = 220 B$.

8. Дослідити механічну характеристику $\omega = f(M)$ асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування із збудженням постійним струмом при різній величині струму збудження.

9. Дослідити механічні характеристики $\omega = f(M)$ АД при однофазному живленні і з'єднанні обмотки статора за схемою «трикутник» при напрузі мережі $U_m = 220 B$.

10. Дослідити механічні характеристики асинхронного двигуна $\omega = f(M)$ при вмиканні опору R_0 в одну фазу статора при з'єднанні обмотки статора за схемою «зірка» при напрузі мережі $U_m = 220 B$. Величину опору R_0 розрахувати так, аби пусковий момент знизився у два рази порівняно з природним.

11. За експериментальними даними побудувати електромеханічні і механічні характеристики досліджуваного двигуна для різних режимів роботи з урахуванням моменту втрат навантажувальних машин.

12. Провести аналіз механічних характеристик, отриманих експериментальним та розрахунковим шляхом (при цьому врахувати, що експеримент проводиться при зниженій напрузі $\sim 220 B$).

13. Оформити звіт з лабораторної роботи.

5 Технічна характеристика лабораторного устаткування

Таблиця 1 – Технічна характеристика лабораторного устаткування

| Робоче місце №1 | | | | | | | |
|-----------------|--------|---------------|--------|---------------|---------|---------------|------------|
| М1 | | М2 | | М3 | | М4 | |
| Тип | П-22 | Тип | П-31 | Тип | ПН-17,5 | Тип | 4А80В4БСУ1 |
| P_n , кВт | 1,0 | P_n , кВт | 1,0 | P_n , кВт | 1,24 | P_n , кВт | 1,5 |
| U_n , В | 220 | U_n , В | 230 | U_n , В | 230 | U_n , В | 380/220 |
| I_n , А | 5,9 | I_n , А | 4,35 | I_n , А | 5,4 | I_n , А | 3,6/6,2 |
| n_n , об/хв | 1500 | n_n , об/хв | 1450 | n_n , об/хв | 1430 | n_n , об/хв | 1400 |
| η_n , % | 77 | η_n , % | 70 | η_n , % | 72 | η_n , % | 77 |
| Клас ізоляції | Е | Клас ізоляції | Е | Клас ізоляції | Е | Клас ізоляції | Е |
| m , кг | 43,8 | m , кг | 53 | m , кг | 78 | μ_k | 2,2 |
| ГОСТ | 183-55 | ГОСТ | 183-55 | ГОСТ | ПЭК-49 | μ_n | 2 |
| - | - | - | - | - | - | μ_{min} | 1,6 |
| - | - | - | - | - | - | $\cos\phi_k$ | 0,55 |
| - | - | - | - | - | - | k_i | 5 |
| - | - | - | - | - | - | m , кг | 20,8 |
| - | - | - | - | - | - | ГОСТ | ПЭК-49 |

Продовження таблиці 1

| Робоче місце №2 | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|-----------------|---------------|
| М1 | | М2 | | М3 | | М4 | |
| Тип | П-31 | Тип | П-32 | Тип | П-32 | Тип | 4А80В4У3 |
| P_n , кВт | 1,5 | P_n , кВт | 1,5 | P_n , кВт | 1,5 | P_n , кВт | 1,5 |
| U_n , В | 220 | U_n , В | 230 | U_n , В | 230 | U_n , В | 380/220 |
| I_n , А | 8,6 | I_n , А | 6,5 | I_n , А | 6,5 | I_n , А | 3,52/6,1 |
| n_n , об/хв | 1500 | n_n , об/хв | 1450 | n_n , об/хв | 1450 | n_n , об/хв | 1395 |
| η_n , % | 79 | η_n , % | 71 | η_n , % | 71 | η_n , % | 75 |
| Клас ізоляції | Е | Клас ізоляції | Е | Клас ізоляції | Е | Клас ізоляції | Е |
| m , кг | 53 | m , кг | 62 | m , кг | 62 | μ_k | 2,2 |
| ГОСТ | 183-55 | ГОСТ | 183-55 | ГОСТ | 183-55 | μ_n | 2 |
| - | - | - | - | - | - | μ_{min} | 1,6 |
| - | - | - | - | - | - | $\cos\varphi_k$ | 0,55 |
| - | - | - | - | - | - | k_i | 5 |
| - | - | - | - | - | - | m , кг | 13,8 |
| - | - | - | - | - | - | ТУ | 16-525.564-84 |
| Комплект вимірювальний К 505 | | | | | | | |
| Клас точності вбудованих у комплект приборів – 0,5 | | | | | | | |
| Час встановлення показів приборів комплекту – не більше 4 с | | | | | | | |
| Амперметр | | | | | | | |
| Вольтметр | | | | | | | |

6 Вказівки щодо виконання роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою, записати каталожні дані обладнання.

2. Розрахувати та побудувати природну електромеханічну характеристику досліджуваного асинхронного електродвигуна $\omega = f(I_1)$.

Розрахунок електромеханічних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором за каталожними даними можливий, хоча обчислення виходять громіздкі. Для інженерних розрахунків з достатнім ступенем точності може бути використана універсальна електромеханічна характеристика трифазного АД з короткозамкненим ротором загальнопромислового призначення, приведена у відносних одиницях (рисунок 9).

Дійсне значення струму статора при будь-якому ковзанні визначається

$$I_{1i} = i I_{1n}, \quad (14)$$

де i – кратність струму, в.о.;

I_n – номінальний струм двигуна, А. Визначається за (5).

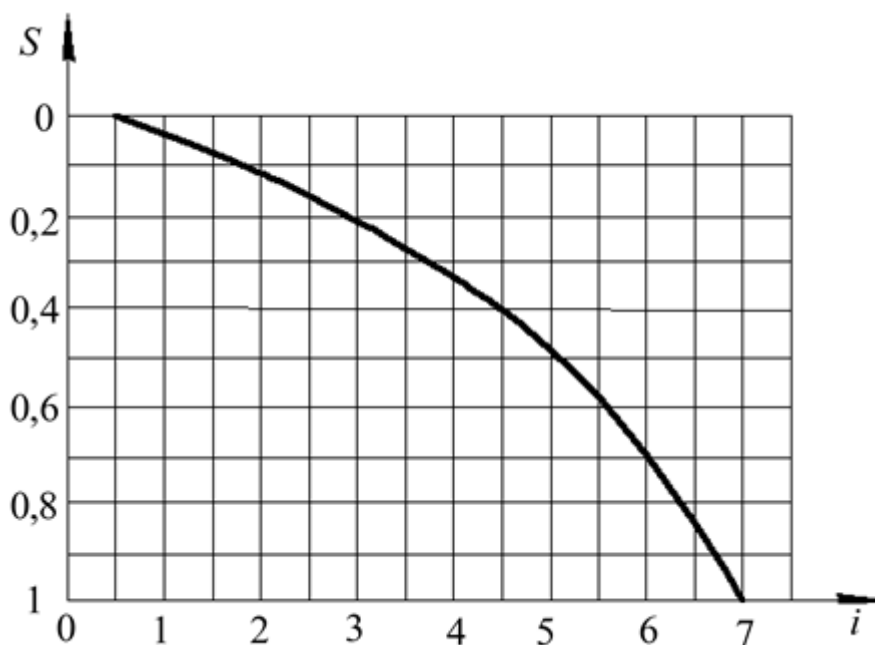


Рисунок 9 – Універсальна електромеханічна характеристика АД з к.з. ротором загальнопромислового призначення

Кутову швидкість при будь-якому ковзанні можна визначити

$$\omega_i = \omega_0 (1 - S_i). \quad (15)$$

Розрахунки зручно вести за таблицею 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку електромеханічної характеристики АД з короткозамкненим ротором

| | | | | | | | |
|--------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| i , в.о. | | | | | | | |
| I_{li} , А | | | | | | | |
| S_i , в.о. | | | | | | | |
| ω_i , рад/с | | | | | | | |

Електромеханічну характеристику побудувати у координатах $\omega = f(I_1)$.

3. Розрахувати та побудувати природну та штучну (при $U_m = 220\text{ В}$) механічні характеристики трифазного АД $\omega = f(M)$.

Механічну характеристику будують за п'ятьма характерними точками:

1. Точка ідеального холостого ходу із координатами $\omega = \omega_0$, $M = 0$.

Синхронна кутова швидкість визначається за рівнянням

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}. \quad (16)$$

2. Точка номінального навантаження $\omega = \omega_n$, $M = M_n$.

Номінальна кутова швидкість визначається як

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}, \quad (17)$$

де n_n – номінальна швидкість обертання електродвигуна, об/хв.

Номінальний момент, що розвиває двигун

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (18)$$

де P_n – номінальна потужність електродвигуна, Вт.

3. Точка максимальної перевантажувальної здатності $\omega = \omega_k, M = M_k$.

Швидкість, за якої двигун розвиває максимальний момент

$$\omega_k = \omega_0(1 - S_k). \quad (19)$$

Критичне ковзання

$$S_k = S_n \frac{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2S_n(\mu_k - 1)}}{1 - 2S_n(\mu_k - 1)}. \quad (20)$$

Номінальне ковзання

$$S_n = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0}. \quad (21)$$

Максимальний момент, який розвиває двигун

$$M_k = \mu_k M_n, \quad (22)$$

де μ_k – кратність максимального моменту, в.о.

4. Точка мінімального моменту $\omega = \omega_{\min}, M = M_{\min}$.

Швидкість, за якої двигун досягає мінімального моменту

$$\omega_{\min} = \omega_0(1 - S_{\min}), \quad (23)$$

де S_{\min} - ковзання, при якому спостерігається провал моменту, в.о.,

$$S_{\min} = 0,8 \dots 0,85.$$

Мінімальний момент двигуна

$$M_{\min} = \mu_{\min} M_n, \quad (24)$$

де μ_{\min} – кратність мінімального моменту, в.о.

5. Точка пускового моменту $\omega = 0, M = M_n$.

Пусковий момент двигуна

$$M_n = \mu_n M_n, \quad (25)$$

де μ_n – кратність пускового моменту, в.о.

Момент, що розвиває двигун при зниженні напруги на його обмотках визначається

$$M'_{i(U_m)} = k_U^2 M_{i(U_n)}, \quad (26)$$

де $k_U = \frac{U_m}{U_n}$ – коефіцієнт зниження напруги, в.о.;

U_m – дійсне значення напруги мережі, В;

U_n – номінальна напруга електродвигуна, В.

За розрахунковими даними в одній системі координат побудувати механічні характеристики асинхронного двигуна.

4. Експериментально визначити омичний опір фази статора АД та привести його до розрахункової робочої температури.

Вимірювання опорів можна проводити будь-яким з відомих способів, що забезпечать достатню точність вимірювання. Похибку не більше 2 % можливо забезпечити при вимірюванні опорів обмоток мостами, методом амперметра і вольтметра. Вимірювати опір обмоток електричних машин, особливо великої потужності, омметрами не рекомендується, оскільки вони дають значну похибку у 4-10 %. При вимірюванні опорів обмоток головних кіл двигунів потрібно користуватися подвійними мостами, які дають найбільшу точність у випадку малих опорів. Для вимірювання опорів незалежних і паралельних обмоток застосовують одинарні вимірювальні мости.

Для отримання високої точності і достовірності дослідних даних при визначенні опору необхідно провести щонайменше три виміри (методом амперметра-вольтметра при різних значеннях струму) і взяти середнє арифметичне значення опору

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (27)$$

де n – кількість дослідів.

Необхідно мати на увазі, що опори обмоток залежать від температури, тому потрібно фіксувати, при якій температурі виконані вимірювання або до якої температури приведено опір. Найточніші результати одержують при вимірюванні опорів обмоток машини в холодному стані. При цьому машина повинна знаходитися в приміщенні з постійною температурою протягом не

менше 10 - 12 год. За температуру машин приймають температуру повітря в даному приміщенні.

У випадку приведення опору обмоток до іншої температури для обмоток із міді користуються формулою

$$R_{t_2} = R \frac{235 + t_2}{235 + t_1}, \quad (28)$$

де R – середнє арифметичне значення опору обмотки при вимірюванні, Ом;

t_1 – температура при вимірюванні, °С;

t_2 – температура, до якої приведено опір, °С;

R_{t_2} – опір при температурі t_2 , Ом.

Для обмоток із алюмінію замість числа 235 у формулу підставляють 245.

За розрахункову робочу температуру електричних машин згідно ДСТУ ІЕС 60034-2:2015 «Машини електричні обертові. Частина 2. Методи визначання втрат і ККД обертових електричних машин за допомогою випробовувань» приймають 95 °С для обмоток класу нагрівостійкості В, 115 °С – для класу F, 135 °С – для класу Н. Для машин класів нагрівостійкості А та Е за розрахункову робочу температуру приймають 60 °С і 75 °С відповідно (згідно ГОСТ25941-83). Якщо ustalена робоча температура обмоток значно відрізняється від розрахункової, то потрібно брати опір при фактичній температурі обмоток.

Експериментальні дані занести до таблиці 3.

Таблиця 3 – Експериментальні дані по визначенню омичного опору фази статора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу _____

| $t_1 = \text{_____} \text{ } ^\circ\text{C}$ | $R_1, \text{ Ом}$ | $R_2, \text{ Ом}$ | $R_3, \text{ Ом}$ | $R, \text{ Ом}$ | $R_{t_2}, \text{ Ом}$ |
|----------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| C_1-C_4 | | | | | |
| C_2-C_5 | | | | | |
| C_3-C_6 | | | | | |

5. Схема електрична принципова експериментальної установки для зняття залежності моменту втрат від кутової швидкості в системі машин $M4 - M3$ $\omega = f(M_{\text{втрат}})$ представлена на рисунку 10.

Автоматичним вимикачем $QF2$ подати живлення на обмотку збудження машини $M3$. Автоматом $QF1$ подати живлення на регульований випрямляч напруги VD . Замкнути рубильник SI . Змінюючи напругу на якорі машини $M3$ від 0 до 240 В вимірюють струм якірного кола та швидкість обертання машин. Дані занести до таблиці 4.

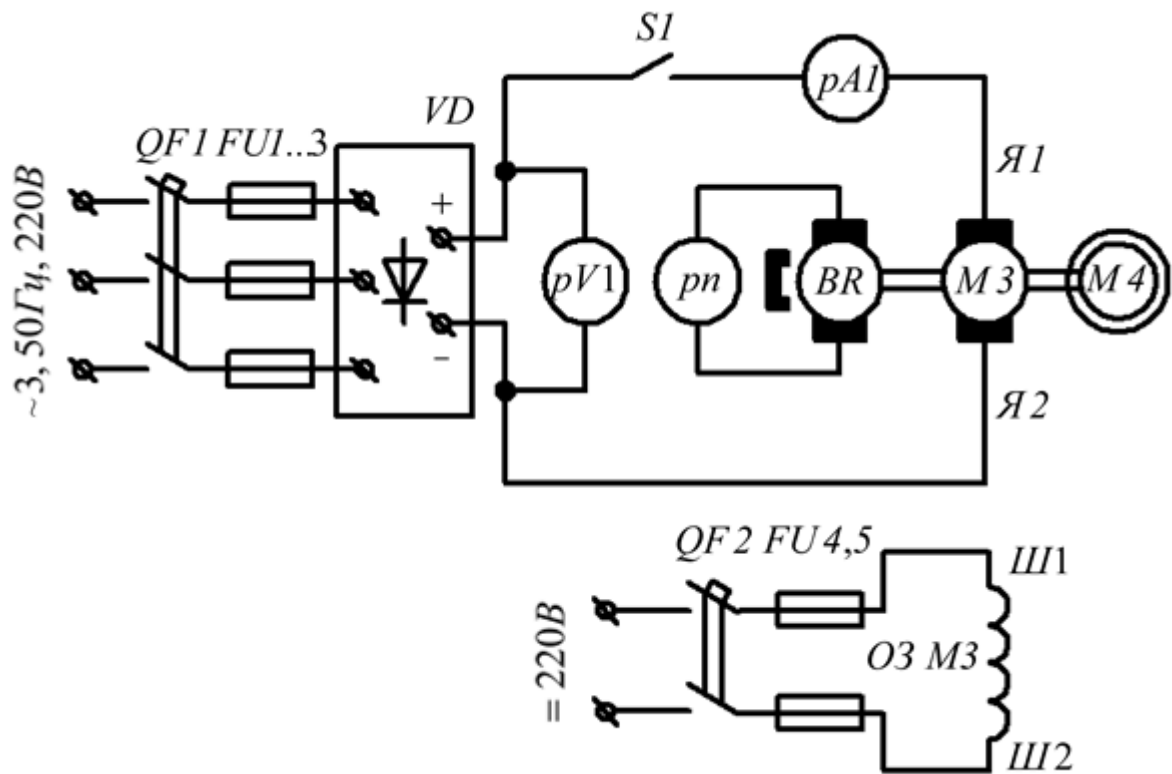


Рисунок 10 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження залежності моменту втрат в системі машин $M4 - M3$ від швидкості

Таблиця 4 – Дані досліду залежності моменту втрат від кутової швидкості в системі машин $M4 - M3$ $\omega = f(M_{втрат})$

| | | | | | | |
|-----------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|
| $U_{я}, В$ | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 |
| $I_{я}, А$ | | | | | | |
| $n, об/хв$ | | | | | | |
| $\omega, рад/с$ | | | | | | |
| $M_{втрат}, Н\cdot м$ | | | | | | |

Величину електромагнітного моменту, необхідного для обертання системи $M4 - M3$ на холостому ході визначаємо за рівнянням

$$M_{втрати} = k\Phi_n I_{яM3i}, \quad (29)$$

де $k\Phi_n$ – параметр, що визначається за паспортними даними навантажувальної машини постійного струму;

$I_{яM3i}$ – струм якоря машини $M3$.

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{я}}{\omega_n}, \quad (30)$$

де $R_{я}$ – опір кола якоря, що визначається за паспортними даними або безпосереднім вимірюванням, Ом.

$$R_{я} = 0,5(1 - \eta_n) \frac{U_n}{I_n}. \quad (31)$$

Зміна напрямку обертання системи машин $M4 - M3$ не впливає на величину втрат – графік залежності $\omega = f(M_{емрат})$ у III квадранті симетричний графіку у I квадранті відносно початку координат. Графік $\omega = f(M_{емрат})$ має розрив при зміні знаку кутової швидкості. Величина розриву чисельно дорівнює подвоєним втратам в агрегаті $M4 - M3$ при швидкості обертання рівній нулю.

6. Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик АД з КЗ ротором представлена на рисунку 11.

Підготувати експериментальну установку до проведення дослідів наступним чином:

- 1) Зібрати і перевірити електричну схему (рисунок 11).
- 2) Встановити всі апарати у виключений стан.
- 3) Подати напругу на обмотки збудження машин постійного струму автоматичним вимикачем $QF2$.

4) Встановити номінальний струм збудження машини $M1$ і близько 50-60% від номінального струму збудження машин $M2$ та $M3$ за допомогою реостатів у колах збудження машин постійного струму.

5) Запустити двигун $M1$. Для цього при повністю введеному пусковому реостаті R_0 перевести перемикач $S2$ у положення «1». Після запуску двигуна повністю вивести пусковий реостат.

6) Автоматичним вимикачем $QF1$ подати живлення на двигун $M4$.

7) Регулюючи струм в обмотці збудження машини $M3$, домогтися такого положення, коли вольтметр $PV1$ показуватиме напругу рівну нулю. Якщо при збільшенні струму збудження машини $M3$ показання вольтметра $PV1$ збільшуються (дія ЕРС якорів машин $M2$ та $M3$ збігається за напрямком), необхідно виконати один із наступних заходів:

– змінити полярність напруги, що подається на обмотки збудження машини $M1$, або $M2$, або $M3$;

– змінити напрям обертання двигуна $M4$, для чого необхідно поміняти місцями будь-які дві фази напруги, що подається.

– Після вирівнювання ЕРС (вольтметр $PV1$ показуватиме напругу рівну нулю) замкнути рубильник $S1$ і дослідити двигун у необхідному режимі.

Під час проведення усіх дослідів струм в обмотці збудження машини $M3$ підтримувати незмінним.

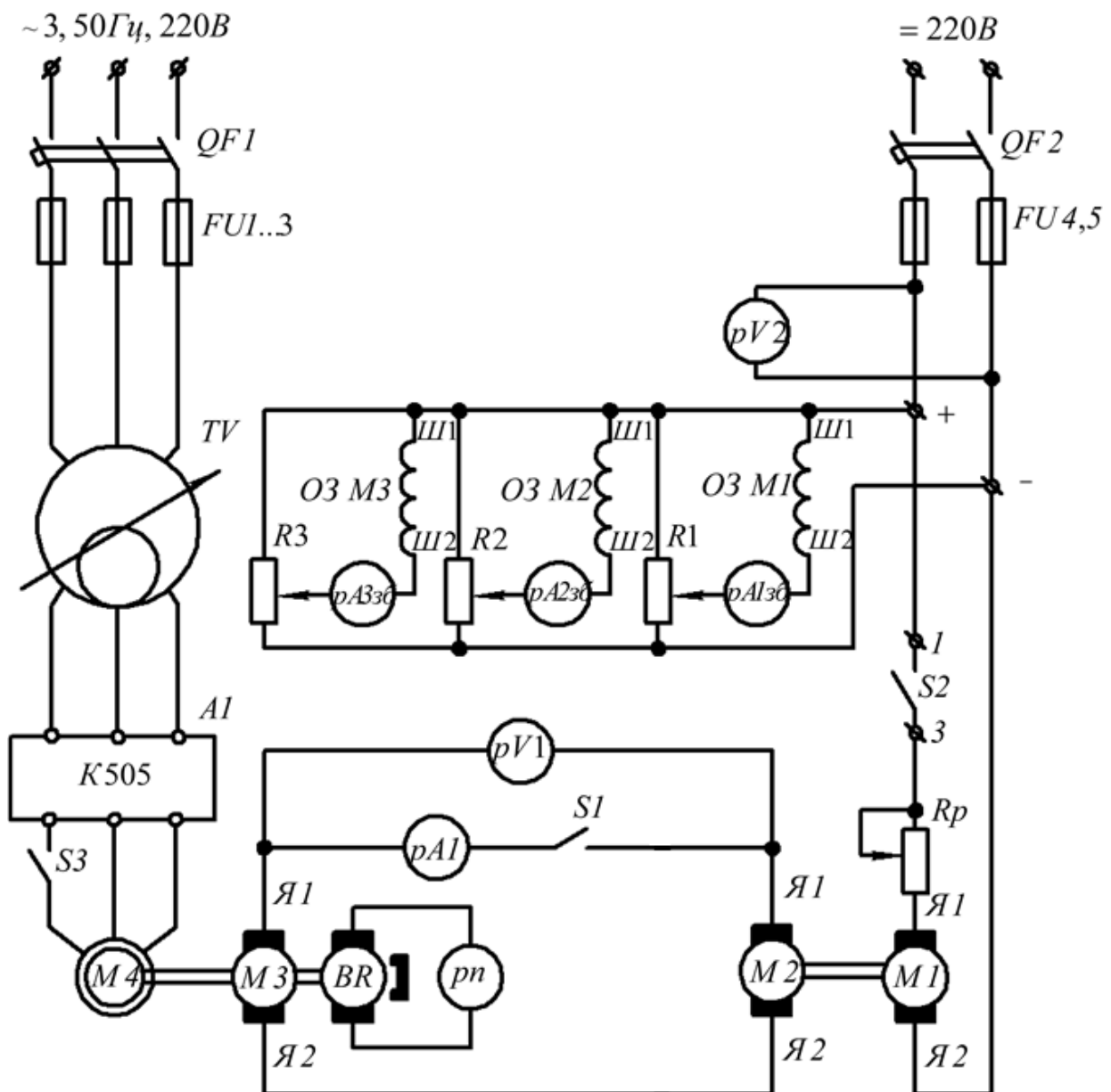


Рисунок 11 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик АД з короткозамкненим ротором

7. Електромеханічну $\omega = f(I_1)$ та механічну $\omega = f(M)$ характеристики асинхронного двигуна починають знімати з режиму генераторного гальмування, а потім переходять до двигунного режиму та гальмування противмиканням. Перед замиканням рубильника $S1$ зафіксувати напрям відхилення стрілки амперметра та ватметра вимірювального комплексу К505 – двигунний режим. Замкнути рубильник $S1$. Збільшуючи струм в обмотці збудження машини $M2$ перевести двигун в генераторний режим. Перша точка характеристики знімається за максимальної швидкості обертання двигуна $M4$, що не має перевищувати більш ніж у 1,5 рази синхронну швидкість обертання АД. Поступово зменшуючи струм в обмотці збудження машини $M2$, знімають

декілька точок характеристики в режимі генераторного гальмування до точки синхронної кутової швидкості n_0 . Струм якоря в генераторному режимі записують зі знаком мінус. При переході з режиму генераторного гальмування обов'язково записується точка характеристики, що відповідає режиму ідеального холостого ходу і далі, плавно зменшуючи струм в обмотці збудження машини $M2$, двигун $M4$ перевести в двигунний режим, збільшуючи навантаження на валу. Експериментальні дані занести до таблиці 5. Після закінчення досліду установку повернути у вихідне положення.

Таблиця 5 - Результати експериментального дослідження МХ і ЕМХ АД у режимах роботи: генераторного гальмування, двигунному і гальмуванні противмиканням

| Струм статора АД I_l, A | Швидкість обертання $n, \text{об/хв}$ | Швидкість обертання $\omega, \text{рад/с}$ | Електромагнітний момент машини $M3$ | | Момент втрат $M_{\text{втрат}}, \text{Нм}$ | Момент АД при U_m , $M_{U_m}, \text{Нм}$ | Момент АД при U_n , $M_{U_n}, \text{Нм}$ |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| | | | $I_{\text{я}M3}, A$ | $M_{EMM3}, \text{Нм}$ | | | |
| Генераторне гальмування | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Двигунний режим | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Гальмування противмиканням | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Додаткові експериментальні дані | | | | | | | |
| Струм збудження машини $M3$ $I_{зб} = \underline{\hspace{2cm}}$ А; | | | | | | | |
| Напряга живлення статора АД $U_m = \underline{\hspace{2cm}}$ В. | | | | | | | |

Для виконання досліду гальмування противмиканням необхідно виключити установку з мережі постійної та змінної напруги. Розімкнути рубильник $S1$. Змінити напрям обертання двигуна $M4$ зміною порядку чергування будь-яких двох фаз напруги живлення. Запустити двигуни $M4$ та

M1. Встановити номінальний струм в обмотці збудження машини *M3* та мінімальний в обмотці збудження *M2*. Замкнути рубильник *S1*, при цьому швидкість двигуна сповільниться. Досліджуваний двигун буде працювати в двигунному режимі. Поступово збільшуючи струм в обмотці збудження машини *M2*, зменшити швидкість двигуна *M4* до нуля, а потім змінити напрям його обертання. Результати експерименту занести до таблиці 5. Після закінчення дослідів установку вимкнути з мережі.

Електромагнітний момент навантажувальної машини *M3*

$$M_{EM M3i} = k\Phi_{\delta} I_{я M3i}, \quad (32)$$

де $k\Phi_{\delta}$ – коефіцієнт, що залежить від величини магнітного потоку генератора під час проведення дослідів.

Якщо вважати, що магнітна система машин постійного струму насичена, то з достатньою для дослідів точністю $k\Phi_{\delta}$ можна розрахувати як

$$k\Phi_{\delta} = \frac{I_{зб}}{I_{збн}} k\Phi_n. \quad (33)$$

Величина моменту втрат $M_{втрат}$ визначається з графіку залежності $\omega = f(M_{втрат})$ за необхідної швидкості обертання двигуна.

Електромагнітний момент АД при нарузі мережі U_m визначається

– у двигунному режимі та при гальмуванні противмиканням

$$M_{U_m} = |M_{EM M3}| + |M_{втрат}| \quad (34)$$

– у генераторному режимі

$$M_{U_m} = -|M_{EM M3}| + |M_{втрат}| \quad (35)$$

Природну механічну характеристику досліджуваного АД отримують при перерахунку моменту машини на номінальну напругу 380 В згідно з рівнянням (26).

8. Для дослідження механічної характеристики $\omega = f(M)$ асинхронного двигуна в режимі динамічного гальмування із збудженням постійним струмом зібрати схему рисунку 12. Схема з'єднання статорних обмоток АД – «трикутник».

Величину тормозного опору R_p вибрати за умовою

$$R_p = \frac{U_{зб}}{I_{зб}}, \quad (36)$$

де $U_{3\phi}$ – напруга постійного струму, що подається на статорну обмотку АД, В,
 $U_{3\phi} = 12...24 В$;
 $I_{3\phi}$ – струм збудження АД, А, $I_{3\phi} = (1,5...2)I_0$;
 I_0 – струм холостого ходу фази статора при номінальній напрузі, А.

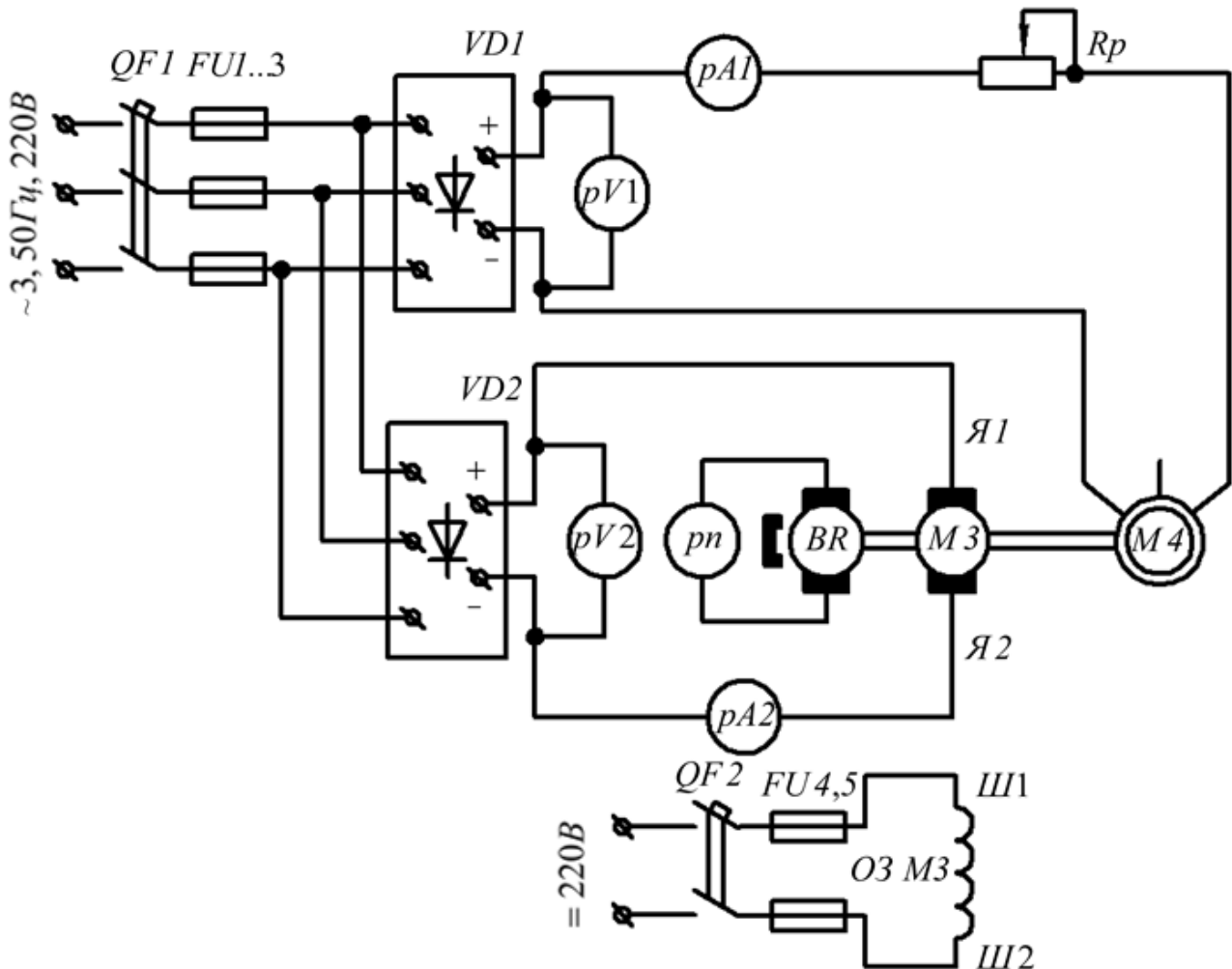


Рисунок 12 – Схема електрична принципова експериментальної установки для дослідження характеристик АД з к.з. ротором в режимі динамічного гальмування при збудженні статора постійним струмом

Автоматичним вимикачем $QF2$ подати живлення на обмотку збудження машини $M3$. Ввімкнути автоматичний вимикач $QF1$. Регулятором $VD2$ подати номінальну напругу на якір машини $M3$. Ротор АД $M4$ обертається ДПС $M3$. Регулятором $VD1$ подати напругу 12-24 В на будь-які два виводи статора АД. При цьому величина постійного струму збудження АД не має перевищувати $(3...4)I_0$. Обертаючи ротор досліджуваного двигуна $M4$ машиною $M3$ досліджують залежність $\omega = f(M)$ при зміні кутової швидкості від ω_0 до 0. Швидкість обертання регулювати зміною якірної напруги машини $M3$. Дані

досліді занести до таблиці 6. Зміною величини тормозного опору R_p зменшити величину постійного струму збудження до значення $2I_0$ і повторити дослід динамічного гальмування. Дані досліду занести до таблиці 6.

Таблиця 6 – Результати експериментального дослідження механічних характеристик АД у режимі динамічного гальмування

| Швидкість обертання n , об/хв | Швидкість обертання ω , рад/с | Електромагнітний момент машини $M3$ | | Момент втрат $M_{втрат}$, Н·м | Момент АД M_{M4} , Н·м |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------|
| | | $I_{яM3}$, А | $M_{EM M3}$, Нм | | |
| Струм збудження АД $I_{зб} = \text{---} A$ | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Струм збудження АД $I_{зб} = \text{---} A$ | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Електромагнітний момент двигуна $M3$ визначають як

$$M_{EM M3i} = k\Phi_n I_{яM3i}. \quad (37)$$

Величина моменту втрат $M_{втрат}$ визначається з графіку залежності $\omega = f(M_{втрат})$ за необхідної швидкості обертання двигуна.

Електромагнітний момент АД при динамічному гальмуванні

$$M_{M4} = -|M_{EM M3}| + |M_{втрат}|. \quad (38)$$

9. Дослідити механічні характеристики $\omega = f(M)$ АД при однофазному живленні і з'єднанні обмотки статора за схемою «трикутник» при напрузі мережі $U_m = 220V$. Для цього запустити експериментальну установку (рис. 11).

Після досягнення сталої частоти обертання досліджуваного двигуна $M4$ виключити вимикач $S3$ у фазі статора і перевести його таким чином у неповнофазний режим. Після врівноваження ЕРС машин $M3$ та $M2$ замкнути рубильник $S1$. Збільшуючи навантаження на валу двигуна $M4$ шляхом

зменшення струму в обмотці збудження машини $M2$ дослідити механічну характеристику АД при зміні швидкості від синхронної до повної зупинки. Дані вимірів занести до таблиці 7. Після закінчення досліду установку відключити, привести схему у початкове положення.

Таблиця 7 – Результати експериментального дослідження МХ АД при однофазному живленні

| Струм статора АД I_1, A | Швидкість обертання $n, об/хв$ | Швидкість обертання $\omega, рад/с$ | Електромагнітний момент машини $M3$ | | Момент втрат $M_{втрат}, Нм$ | Момент АД при U_m , $M_{U_m}, Нм$ | Момент АД при U_n , $M_{U_n}, Нм$ |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| | | | $I_{яM3}, A$ | $M_{EM M3}, Нм$ | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Додаткові експериментальні дані | | | | | | | |
| Струм збудження машини $M3$ $I_{зб} = \underline{\hspace{2cm}}$ А; | | | | | | | |
| Напряга живлення статора АД $U_m = \underline{\hspace{2cm}}$ В. | | | | | | | |

10. Для дослідження механічної характеристики асинхронного двигуна $\omega = f(M)$ при обмеженні пускового моменту в одну фазу статора ввести активний опір R_δ (рисунок 13). При цьому обмотку статора з'єднати за схемою «зірка», а на виводи подати напругу $U_m = 220 В$. Величину опору R_δ розрахувати так, аби пусковий момент знизився у два рази порівняно з природним.

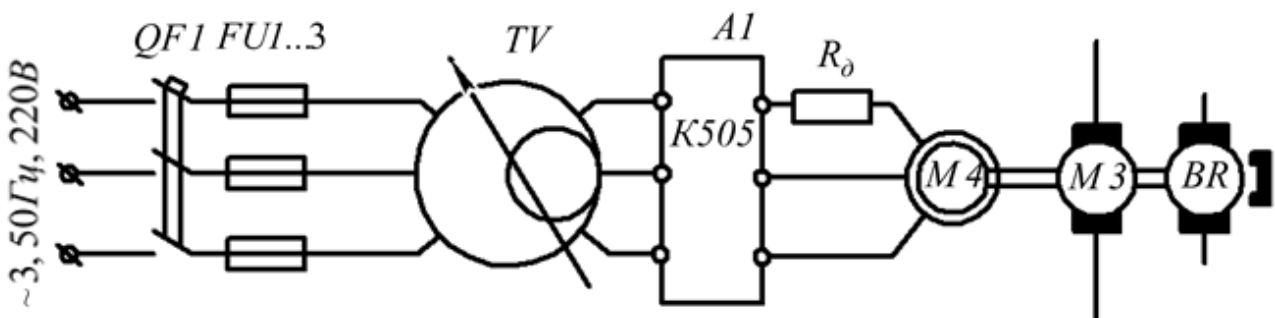


Рисунок 13 – Схема електрична принципова вмикання АД при дослідженні механічних характеристик АД з обмеженням обертального моменту

Значення опору R_δ визначають за формулою

$$R_{\partial} = \frac{3U_m}{2\sqrt{3}K_i I_n} \left[\frac{1-2\mu_{ni}}{2\mu_{ni}} \cos\varphi_{\kappa} + \sqrt{\left(\frac{1-2\mu_{ni}}{2\mu_{ni}} \cos\varphi_{\kappa} \right)^2 + \frac{1-\mu_{ni}}{\mu_{ni}}} \right], \quad (39)$$

де μ_{ni} – заданий відносний пусковий момент, в.о.;

$\cos\varphi_{\kappa}$ – коефіцієнт потужності короткого замикання, в.о.

$$\mu_{ni} = \frac{M_{in}}{M_n}, \quad (40)$$

де M_{in} – потрібний пусковий момент двигуна, Нм;

M_n – природний пусковий момент електродвигуна, Нм;

Результати експериментального дослідження МХ АД при обмеженні пускового моменту занести до таблиці 8.

Таблиця 8 – Результати експериментального дослідження механічних характеристик АД при обмеженні пускового моменту

| Струм статора АД I_1, A | Швидкість обертання $n, \text{об/хв}$ | Швидкість обертання $\omega, \text{рад/с}$ | Електромагнітний момент машини $M3$ | | Момент втрат $M_{втрат}, \text{Нм}$ | Момент АД при U_m , $M_{U_m}, \text{Нм}$ | Момент АД при U_n , $M_{U_n}, \text{Нм}$ |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| | | | $I_{яM3}, A$ | $M_{EMM3}, \text{Нм}$ | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Додаткові експериментальні дані | | | | | | | |
| Струм збудження машини $M3$ $I_{зб} = \text{_____} A$; | | | | | | | |
| Напруга живлення статора АД $U_m = \text{_____} V$. | | | | | | | |

11. За експериментальними даними таблиць 5-8 побудувати електромеханічні і механічні характеристики досліджуваного двигуна для різних режимів роботи з урахуванням моменту втрат навантажувальних машин.

12. Порівняти результати розрахунку механічної характеристики за каталожними та експериментальними даними. Врахувати факт проведення досліду при зниженій напрузі мережі $U_m = 220 V$.

7 Вказівки щодо оформлення звіту

Звіт з лабораторної роботи має містити:

1. Паспортні дані обладнання та приладів.
2. Результати розрахунку та графіки механічних і електромеханічної характеристик досліджуваного двигуна, розраховані за каталожними даними.
3. Схеми електричні принципові експериментальних установок рисунки 10-13.
4. Результати розрахунку моменту втрат та механічних характеристик АД.
5. Графіки залежностей електромеханічних $\omega = \varphi(I_1)$ та механічних $\omega = f(M)$ характеристик досліджуваного АД за різних режимів роботи, отримані експериментальним шляхом.
6. Аналіз отриманих результатів.

8 Контрольні питання

1. Дайте визначення електромеханічній характеристиці АД.
2. На основі схеми заміщення фази АД виведіть рівняння його електромеханічної характеристики.
3. За якими характерними точками можна побудувати природну електромеханічну характеристику АД з короткозамкненим ротором?
4. Що називають механічною характеристикою АД? Поняття природної і штучної характеристик?
5. Як залежить момент АД від підведеної до нього напруги?
6. Що таке критичне ковзання АД і від чого воно залежить?
7. Які висновки можна зробити при аналізі рівняння механічної характеристики АД у параметричній формі?
8. Яким рівнянням описується залежність пускового моменту АД від ковзання?
9. За якими характерними точками можна побудувати природну механічну характеристику АД з короткозамкненим ротором?
10. Назвіть режими роботи АД?
11. Як здійснити гальмування противмиканням АД?
12. Як збільшити гальмівний момент при динамічному гальмуванні АД?

9 Список літератури

1. Лекції з дисципліни «Основи електропривода» / С.О. Квітка – НІП ТДАТУ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nip.tsatu.edu.ua/mod/resource/view.php?id=3766>.
2. Електропривод: підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.
3. Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лаврінченко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.
4. Назарьян Г.Н. Электрические машины: Учебное издание для вузов. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с., ил.

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ЗВІТУ

З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ І КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка
імені професора В.В. Овчарова»

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

з дисципліни «Основи електропривода»

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА
З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

ЗВІТ

Студент _____ групи

П.І.Б.

(підпис)

Службові примітки

Роботу захищено з оцінкою _____

Викладач _____

П.І.Б.

(підпис)

Мелітополь, 20__ р.