

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД»
для студентів спеціальності
G3 «Електрична інженерія»
всіх форм навчання
Частина 1

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Автоматизований електропривод» для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія» для всіх форм навчання. Частина 1. Укл.: Ю.О. Крисан, Є.В. Васильєва – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. - 66 с.

Укладачі:

Ю.О. Крисан, доц., к.т.н.
Є.В. Васильєва, ст. викладач

Рецензент

В.В. Зіновкін, проф., д.т.н.

Відповідальний
за випуск

А.В. Пирожок, доц., к.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри
Електропривода і автоматизації
промислових установок
протокол № 5 від 04.02.2026 р.

Затверджено
на засіданні НМК ЕТФ
протокол № 7 від 19.02.2026 р.

ЗМІСТ

1 Лабораторна робота №1.	
Дослідження електромеханічних та механічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження при різних способах регулювання швидкості та режимах гальмування.....	4
2 Лабораторна робота №2.	
Дослідження електромеханічних та механічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження у режимах роботи при різних способах регулювання швидкості двигуна та режимах гальмування.....	21
3 Лабораторна робота №3.	
Дослідження електромеханічних та механічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором у режимах роботи при різних способах регулювання швидкості двигуна, та режимах гальмування	34
4 Лабораторна робота № 4	
Дослідження нагрівання електродвигуна.....	51
Перелік джерел посилання.....	66

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Дослідження електромеханічних та механічних характеристик двигуна постійного струму незалежного збудження при різних способах регулювання швидкості та режимах гальмування

Мета роботи – вивчити фізичні процеси і властивості двигуна постійного струму незалежного збудження; дослідити режими роботи двигуна, а також способи регулювання швидкості та гальмування шляхом формального аналізу рівнянь електромеханічної й механічної характеристик при різних умовах; експериментально дослідити режими роботи двигуна та побудувати його характеристики; виконати аналіз експериментальних та розрахункових даних.

1.1 Основні теоретичні положення

Властивості двигуна постійного струму незалежного збудження (ДПС НЗ) виражаються його електромеханічною та механічною характеристиками. Електромеханічна характеристика ДПС НЗ визначає залежність кутової швидкості ω двигуна від струму його якорного кола $I_{я}$, у зв'язку з чим її ще називають швидкісною:

$$\omega = \frac{U_{\text{м}}}{C_{\text{м}} \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}} \cdot \Phi} I_{\text{я}}, \quad (1.1)$$

де $U_{\text{м}}$ – напруга мережі, В;

$C_{\text{м}}$ – конструктивна електромашина стала двигуна, яка враховує особливості конструкції двигуна та визначає величину його ЕРС,

$$E_{\text{я}} = C_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot \omega;$$

де Φ – магнітний потік двигуна, Вб;

$R_{\text{я}}$ – сумарний опір якорного кола, що складається із внутрішнього опору обмотки якоря $R_{\text{яв}}$ та опору додаткового зовнішнього реостата $R_{\text{я0}}$ для регулювання струму якоря, Ом;

$I_{\text{я}}$ – струм в якорному колі двигуна, А.

Механічна характеристика ДПС НЗ визначає залежність кутової швидкості двигуна від його обертаючого електромагнітного моменту $\omega = f(M)$:

$$M = C_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (1.2)$$

де M – електромагнітний момент двигуна, Нм;

$C_{\text{м}}$ – конструктивний коефіцієнт.

Аналітичний вираз для механічної характеристики ДПС НЗ

може бути отримане з рівняння (1.1) підстановкою $I_{я}=M/C_{м}\Phi$, визначеного з (1.2). Після підстановки отримаємо

$$\omega = \frac{U_{м}}{C_{м} \cdot \Phi} - \frac{R_{я}}{(C_{м} \cdot \Phi)^2} M. \quad (1.3)$$

Перша складова у рівняннях (1.1) та (1.3) визначає швидкість ідеального неробочого ходу ДПС НЗ, рад/с. Якщо прийняти незмінними підведені до двигуна напругу та її магнітний потік Φ , швидкість ідеального неробочого ходу машини в (1.1), (1.3) також буде постійною величиною $\omega = U/C_{м}\Phi = A$. Припустимо, що друга складова рівняння (1.1) $R_{я}$ та Φ незмінні, позначимо $R_{я}/C_{м}\Phi = B$, тоді отримаємо новий вигляд рівняння електромеханічної характеристики ДПС НЗ:

$$\omega = A - BI_{я}. \quad (1.4)$$

Можна побачити, що для умов $U=const$, $\Phi=const$, $R_{я}=const$ величини A та B є сталі. Можна стверджувати, що рівняння (1.1) та (1.4) графічно відображаються прямою лінією, що не проходить через початок координат.

Для цих же умов у рівнянні (1.3) позначимо $R_{я}/(C_{м}\Phi)^2 = C$ та отримаємо

$$\omega = A - CM, \quad (1.5)$$

звідки видно, що механічна характеристика графічно відображається такою ж прямою лінією. Обмеження $U=const$, $\Phi=const$, $R_{я}=const$ пов'язуються зі статичними характеристиками роботи електропривода, у зв'язку з чим, електромеханічні та механічні характеристики ДПС НЗ називають статичними. Характеристики двигуна при номінальних значеннях параметрів $U=U_{ном}$, $\Phi=\Phi_{ном}$, $R_{я}=R_{я}$ називають природними статичними характеристиками.

Природна електромеханічна (швидкісна) характеристика (рисунк 1.1, а) – геометричне місце точок, для яких виконується рівняння електричної рівноваги якірного кола двигуна

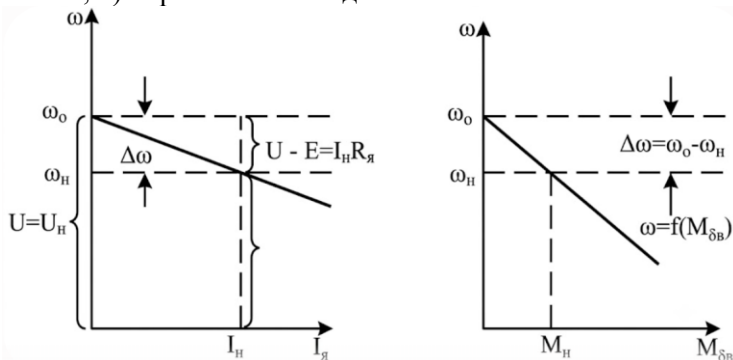
$$U_{ном} = E + I_{ном}R_{я}.$$

Статичне падіння кутової швидкості валу двигуна, викликане дією навантаження,

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega_{ном}$$

складає (3...7)% від швидкості ідеального неробочого ходу. Тому природні характеристики ДПС НЗ називають жорсткими. Сталі коефіцієнти B та C у рівняннях (1.4) та (1.5) визначають кут нахилу

характеристик ДПТ НЗ до горизонтальної осі, причому за абсолютним значенням $C > B$. З цієї причини нахил механічної характеристики (рисунок 1.1, б) порівняно зі швидкісною більше.



а) Електромеханічна характеристика

б) Механічна характеристика

Рисунок 1.1 – Електромеханічна і механічна характеристики ДПС НЗ

Відповідно принципу оберненості електричних машин ДПС НЗ може працювати як у двигуновому режимі, так і у генераторному. Для генераторного режиму рівняння електричної рівноваги має вигляд:

$$U = E - I_{я} R_{я},$$

або

$$E = U + I_{я} R_{я}.$$

При цьому ЕРС двигуна стає більше підведеної напруги і, як результат, струм якоря змінює свій напрям. Виходячи з цього, рівняння швидкісної характеристики буде мати вигляд:

$$\omega = \frac{U}{C_{\mathcal{M}} \cdot \Phi} - \frac{R_{я}}{C_{\mathcal{M}} \cdot \Phi} (-I_{я}). \quad (1.6)$$

Оскільки $E > U$, то цим самим складаються умови віддачі (рекуперації) електричної енергії у мережу. Підставляючи у (1.6) $I_{я} = -M/C_{\mathcal{M}} \cdot \Phi$, отримуємо для цього режиму рівняння механічної характеристики

$$\omega = \frac{U}{C_{\mathcal{M}} \cdot \Phi} - \frac{R_{я}}{(C_{\mathcal{M}} \cdot \Phi)^2} (-M). \quad (1.7)$$

З аналізу рівняння (1.7) видно, що момент двигуна $M < 0$, тому він є гальмівним. Внаслідок цього такий режим роботи електричної

машини називають режимом рекуперативного гальмування.

Якщо двигун вимкнути від напруги живлення і замкнути його якірне коло на деякий опір R_z , зберігаючи при цьому збудження, то і в цьому разі електрична машина буде працювати у генераторному режимі. Підставивши у рівняння (1.1) $U/C_M \cdot \Phi = \omega_0 = 0$, отримаємо для електромеханічної характеристики рівняння:

$$\omega = -\frac{R_{я}}{C_M \Phi} I_{я} = \frac{R_{я} + R_z}{C_M \Phi} (-I_{я}) \quad (1.8)$$

де

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я} + R_z} = -\frac{E}{R_{я} + R_z}; \quad (1.9)$$

R_z – гальмівний опір, Ом.

Таким чином, режим роботи машини – генераторний. Рівняння механічної характеристики для цього режиму після підстановки у (1.3) $U/C_M \cdot \Phi = \omega_0 = 0$, буде мати вигляд:

$$\omega = \frac{R_{я} + R_z}{(C_M \Phi)^2} \cdot (-M). \quad (1.10)$$

Оскільки і в цьому разі $M < 0$, то цей режим називають режимом електродинамічного гальмування.

Характеристики ДПС НЗ, отримані при зміні параметрів U , Φ , та $R_{я}$ від їх номінальних значень, називають штучними. Якщо наприклад, до кола якоря двигуна, який підіймає вантаж, підімкнути значний опір $R_{дод}$. Підвищення опору $R_{я} = R_{яв} + R_{до}$ переводить двигун з природної характеристики на штучну, яка в наслідок цього має більший нахил. При цьому обмежуються струм й момент двигуна, у наслідок чого його кутова швидкість буде зменшуватись. При достатньо великому вантажу може змінюватися напрямок обертання двигуна. В цьому випадку струм і момент двигуна не змінюють знак, оскільки двигун підімкнений на піднімання вантажу. Але, оскільки рух вантажу вниз при цьому гальмується, то такий режим роботи ДПС НЗ називають режимом гальмування противімкненням. В цих умовах ЕРС двигуна змінює знак і діє згідно з напругою живлення:

$$U = (-E) + I_{я}(R_{я} + R_{до}) \quad (1.11)$$

або

$$U + E = I_{я}(R_{я} + R_{до}). \quad (1.12)$$

Електромеханічна і механічна характеристики ДПС НЗ при

цьому відрізняються від виразів (1.1) та (1.3) тільки наявністю в кутовій швидкості протилежного знаку.

Усі розглянуті режими роботи ДПС НЗ для одного напрямку обертання наведені на універсальній діаграмі (рисунок 1.2).

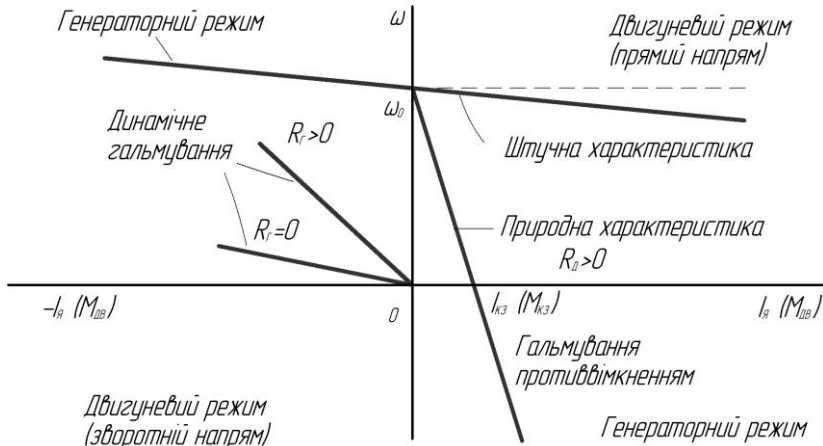


Рисунок 1.2 – Характеристики ДПС НЗ

1.2 Програма роботи

1.2.1 Вивчити електричну схему лабораторної установки та особливості роботи її окремих елементів.

1.2.2 Зняти та побудувати електромеханічні характеристики ДПС НЗ:

- у двигуновому режимі роботи $\omega = f(I_{я})$, при $U = U_{ном} = 220$ В, $\Phi = \Phi_{ном}$, $R_{я0} = 0$;
- реостатні $\omega = f(I_{я})$, при $U = U_{ном} = 220$ В та $R_{я0} > 0$;
- в режимі рекуперативного гальмування $\omega = f(I_{я})$, при $U = U_{ном} = 220$ В, $\Phi = \Phi_{ном}$, $R_{я0} = 0$;
- в режимі гальмування протидвигненням $\omega = f(I_{я})$, при $U = U_{ном} = 220$ В, $\Phi = \Phi_{ном}$, $R_{я0} > 0$;
- в режимі динамічного гальмування $\omega = f(I_{я})$, при $U = 0$, $\Phi = \Phi_{ном}$, $R_{я0} > 0$;
- при зміні підведеної до двигуна напруги за умови $U = var$, $R_{я0} = 0$ та $\Phi = \Phi_{ном}$;
- при послабленні магнітного потоку $\omega = f(I_{я})$ для умов $\Phi = var$,

$R_{я0}=0$ та $U=U_{ном}=220\text{В}$.

1.2.3 Розрахувати та побудувати природну та штучні механічні характеристики.

1.2.4 За результатами експериментальних досліджень та розрахунків зробити короткі висновки.

1.2.5 За умови $\Phi=\Phi_{ном}$ ($I_{зб}=I_{зб,ном}$), $R_{я0}=0$, $M_c=const=0$ ($I_{я}=const\approx 0$) зняти регульовальну характеристику двигуна $\omega=f(U)$ при зміні якірної напруги від 20 до 220 В та окремо побудувати дану характеристику. За цією статичною характеристикою $\omega=f(U)$ підрахувати коефіцієнт передачі K (рисунок 1.3).

$$K = \frac{\Delta\omega}{\Delta U_{я}} = \frac{750 - 500}{167 - 107} \approx 40 \text{ с}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}.$$

1.2.6 Зняти та побудувати електромеханічну (навантажувальну) характеристику у двигуновому режимі $\omega=f(I_{я})$ при $U=U_{я}=U_{ном}=220 \text{ В}$, $\Phi=\Phi_{ном}$ ($I_{зб}=I_{зб,ном}$), $R_{в0}=0$, $M_c=\text{var}$ ($I_{я}=\text{var}$) і за цією статичною характеристикою підрахувати коефіцієнт передачі S (рисунок 1.4).

$$S = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{1000 - 750}{1000} = 0.4 \text{ в.о.}$$

1.2.7 За результатами побудови вищевказаних характеристик та розрахунків коефіцієнтів K та S побудувати статичну модель двигуна постійного струму незалежного збудження у двигуновому режимі (рисунок 1.5). Цю модель побудувати відповідно до вищенаведеного матеріалу та методики, викладеної у додатку [1].

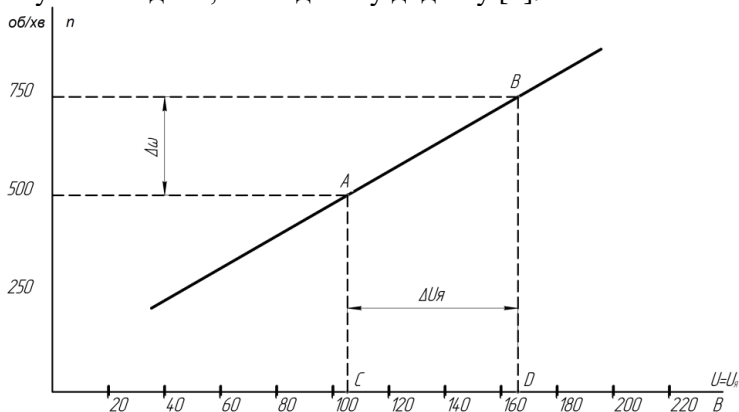


Рисунок 1.3 – Статична регульовальна характеристика та розрахунок коефіцієнту передачі

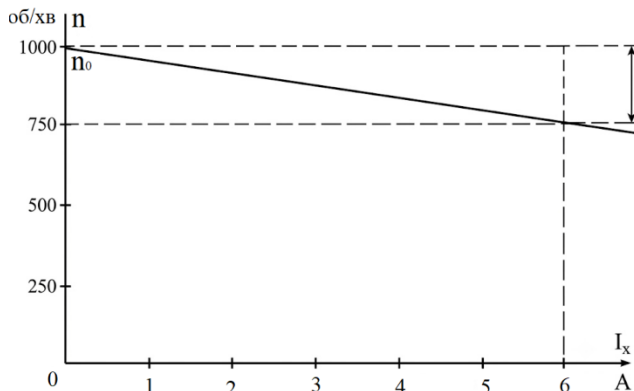


Рисунок 1.4 – Статична навантажувальна характеристика та розрахунок коефіцієнту передачі S

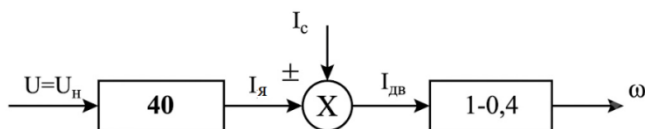


Рисунок 1.5 – Статична модель для двигунового режиму

$$R_{я0}=0; \Phi=\Phi_n (I_{зб}=I_{зб.ном})$$

Вищенаведені пункти 1.2.5, 1.2.6 та 1.2.7 виконуються для будь-якого режиму (за вказівками викладача), передбачених програмою роботи, тобто для характеристик: реостатних, рекуперативного гальмування, послаблення поля та ін.

1.3 Опис лабораторної установки

Принципова електрична схема лабораторної установки зображена на рисунку 1.3. Основними її елементами є досліджувальна машина постійного струму (ДМ) та навантажувальний генератор (НГ). Позначенні на схемі електричні машини відповідно М3 та М4. НГ призначений для утворення регульованого механічного навантаження на валу ДМ, тому вони з'єднані загальним валом. Швидкість їх сумісного обертання вимірюється тахометричним приладом, який складається з тахогенератора ТГ та власно тахометра ТХ, позначених на схемі ВР та ВЕ.

Для живлення машин М3 та М4 використовуються електромашинні перетворювачі П1 та П2, кожен з яких складається з приводного асинхронного двигуна та генератора, попарно з'єднаних загальним валом. Названі пари машин перетворюють енергію мережі змінного струму у постійний, яким живляться якірні кола досліджувальної та навантажувальної машин. Збудження машин постійного струму здійснюється від випрямлячів UZ1, UZ2 з регулюванням від однофазних автотрансформаторів TV1 та TV2 з боку змінного струму.

Для опрацювання режимів роботи ДМ, які перелічені у підрозділі 1.2, та регулювання кутової швидкості, у схемі, передбачені регулівні, комутаційні, електровимірювальні елементи.

Регулівні елементи:

TV1, TV2 – лабораторні автотрансформатори, що використовуються як регулятори напруги збудження МПС;

R1, R3, R4, R5 – змінні опори для струмообмеження та регулювання струму збудження МПС;

R2 – змінний опір, який використовується як пусковий, регульовальний, або гальмівний реостат в залежності від режиму роботи ДМ.

Комутаційні елементи:

SB1, SB2 – кнопки подавання живлення на лабораторну установку та його відімкнення;

QF1, QF5 – вимикачі, які використовуються для запуску асинхронних двигунів М1, М6 та їх захисту за максимальним струмом;

QF2 – вимикач, який використовується для вмикання якірного кола ДМ до затискачів генератора М2 при утворенні перерахованих режимів, крім режиму динамічного гальмування;

QF3 – вимикач, який використовується тільки при реалізації режиму динамічного гальмування при обов'язковому вимиканні вимикача QF2;

QF4 – вимикач, за допомогою якого здійснюється вмикання МПС М4 та М5 у режим паралельної роботи;

SA3, SA6 – вимикачі для подачі збудження до МПС;

SA4 – перемикач для зміни напрямку магнітного потоку при утворенні режиму гальмування ДМ противв'імкненням;

SA5 – перемикач напрямку обертання тахометра.

Таблиця 1.1 – Паспортні дані електричних машин, які використовуються у лабораторному стенді

Найменування та позначення	Тип	Номинальні дані			
		Напруга, В	Потужність, кВт	Струм, А	Частота обертання, об/хв
Досліджуваний двигун МЗ	П-32	220	1.0	5.7	1000
Навантажувальний генератор М4	11-32	220	1.0	5.7	1000
Генератор М2	1114-75	230	1.3	5.7	1000
Генератор М5	111-85	230	6.8	29.6	1460
Двигун М1	A02-4	380	2.8	6.8	1420
Двигун М6		380	5.0	14.25	1420

1.4 Підготовка до роботи

До початку лабораторних занять студент повинен:

- проробити теоретичні положення та самостійно здійснити аналіз рівняння електромеханічної та механічної характеристик при змінюванні величин $R_{яд}$, U , Φ ;

- вивчити схему лабораторної установки та порядок проведення роботи (див. підрозділ 1.5), а також зробити заготівки звіту;

- отримати від викладача перед початком лабораторної роботи допуск до неї, пройшовши перевірку знань в обсягу даної роботи та вимог техніки безпеки; не підготовлений студент до роботи не допускається та відпрацьовує її в установленому порядку.

1.5 Порядок проведення роботи

1.5.1 Перед початком роботи необхідно забезпечити вихідні положення схеми. Усі комутаційні елементи повинні бути вимкнені, а перемикачі SA4 та SA5 повинні знаходитися у положенні “1”.

Резистор R2 треба ввести, R3 вивести, R1, R4, R5 встановити у середнє положення. Рукоятки автотрансформаторів TV1, TV2 повинні знаходитись у положенні “min”.

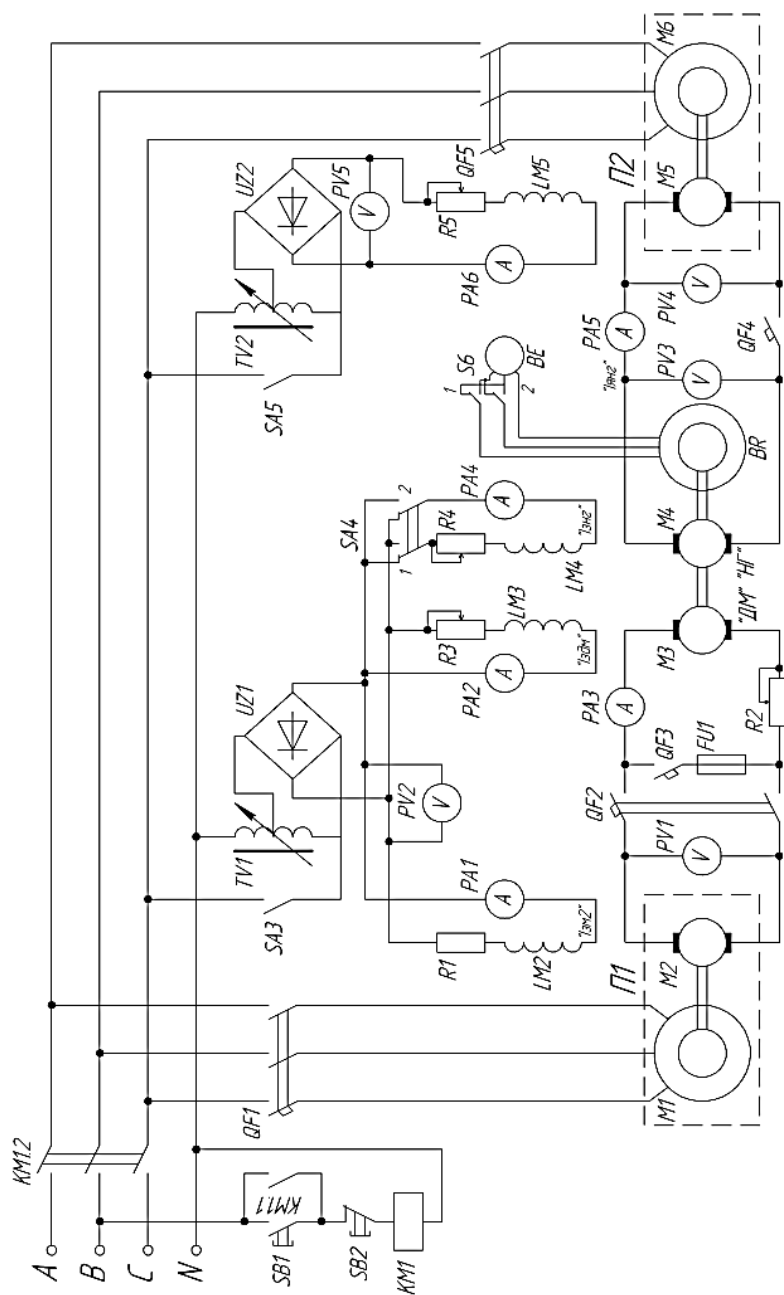


Рисунок 1.6 – Схема лабораторного стенду

Переконавшись у виконанні цих вимог, за допомогою кнопки “Увімк.” подати напругу на установку та вмиканням вимикача QF1 запустити привідний асинхронний двигун перетворювача П1. Після набору швидкості генератора М2 вмикачем SA3 подати напругу на автотрансформатор TV1 і з його допомогою підняти напругу до 220 В у колах збудження машин М2, М3, М4, здійснивши контроль за вольтметром PV2.

В обов’язковому порядку переконавшись у тому, що вимикач QF3 вимкнений, увімкнути вимикач QF2, в наслідок чого досліджувальна машина прийде до руху. Контроль слід здійснювати вольтметром PV1, амперметром PA3 та тахометром BE, які будуть фіксувати напругу, струм якірного кола та кутову швидкість обертання ДМ. Далі слід плавно вивести пусковий реостат R2, після чого довести напругу якірного кола ДМ до 220 В, використовуючи для цього реостат R1. Отриманий режим – реальний неробочий хід ДМ. Звернути увагу на величину та знак струму $I_{\text{ядм}}$.

Згодом запустити перетворювач П2. Ввімкнути QF5 та після набору швидкості машин М5, М6, пов’язаних загальним валом, подати напругу на автотрансформатор TV2, увімкнувши тумблер SA6. Використовуючи рукоятку TV2, зрівняти напруги якірних кіл машин М4, М5, зафіксувавши їх рівновагу за показаннями вольтметрів PV3, PV4. Тільки після цього ввімкнути QF4. Обидві машини будуть увімкнені на паралельну роботу. Таким чином, лабораторна установка підготовлена до проведення експериментальних досліджень.

1.5.2 Двигуневий режим роботи ДМ забезпечується так. Плавно повернувши рукоятку реостата R5 у положення “max”, за допомогою реостата R1 встановити напругу кола ДМ 220 В. Струм в якірному колі машини буде мати значення: $I_{\text{ядм}} = +(1-2,5) \text{ А}$.

Контроль здійснюється за приладами PV1, PA3. Зафіксувавши тахометром кутову швидкість обертання ДМ, занести дані вимірювань двигуневого режиму до таблиці 1.2. (Звернути увагу на режим роботи досліджувальної та навантажувальної машин: ДМ – двигун, а НГ – генератор.)

1.5.3 Режим ідеального неробочого ходу, недосяжний у реальних умовах через наявність втрат (наприклад, на здолення сил тертя у підшипниках), може бути отриманий за рахунок додаткової механічної енергії, яка подається на вал ДМ. Її джерелом у лабораторній установці є машина М4, яка повинна працювати у

двигуневому режимі. Для цього необхідно підвищити швидкість агрегату, складеного з машин М5, М6, що досягається переведенням рукоятки реостата R5 у бік положення “min”. Струм якірного кола ДМ зменшується до значення $I_{\text{ядм}} = +(1-2,5)$ А, але напруга при цьому може перевищити 220 В (контроль за приладами РА3 та РА1). Тоді треба, вводячи реостат зменшити напругу до 220 В, одночасно з цим струм досліджуваної машини буде прямувати до нульового значення. Дані вимірювань при $I_{\text{ядм}} = 0$ занести до таблиці 1.2. Звернути увагу на режим роботи навантажувального генератора: з підвищенням швидкості агрегату М5-М6 він змінюється на двигуневий.

Таблиця 1.2 – Дані вимірювань

Режим роботи ДМ	Експеримент					Розрахунок	
	U, В	I _{ядм}	I _{з_{дм}}	R2, Ом	n, об/хв	ω, рад/с	M, Нм
		А					
Двигуневий	220		0,6	0			
Ідеальний неробочий хід.	220	0	0,6	0			
Генераторний	220		0,6	0			
Реостатна характеристика 1	220		0,6	30			
Реостатна характеристика 2	220		0,6	60			
Гальмування протівімкненням	220		0,6	60			
Динамічне гальмування	220		0,6	60			
	220		0,6	30			
Штучні характеристики при U=Var	180	0	0,6	0			
	180		0,6	0			
	160	0	0,6	0			
	160		0,6	0			
Штучні характеристики при Φ=Var	220	0	0,5	0			
	220		0,5	0			
	220	0	0,4	0			
	220		0,4	0			

1.5.4 Подальша подача енергії з боку перетворювача П2 переведе ДМ у генераторний режим, струм $I_{\text{ядм}}$ змінить свій напрямок: $I_{\text{ядм}} < 0$. Продовжувати переміщення реостата R5 в бік положення “min” до досягнення струмом якірного кола ДМ значення $I_{\text{ядм}} = -(1-2.5)$ А. Далі вводячи реостат R1, встановити напругу якірного кола ДМ 220 В. Дані вимірювань занести до таблиці 1.2. У цьому випадку досліджувальна машина – генератор, навантажувальний генератор – двигун.

1.5.5 Для зняття реостатних характеристик необхідно перевести ДМ з генераторного режиму у двигуневий: реостат R5 перевести у положення “max”. Вслід за цим повністю вивести реостат R1 та ввести першу секцію реостата R2 (30 Ом). Напруга якірного кола ДМ буде значно перевищувати номінальне значення. Його слід зменшити до 220В, встановивши реостат R4 у положення “Виведений”, а тоді використовувати рукоятку автотрансформатора TV2, обертаючи її у бік положення “min”. Струм якірного кола ДМ буде мати значення $I_{\text{ядм}} \approx +3$ А. Дані вимірювань занести до таблиці 1.2. Далі ввести ще одну секцію реостата R2. Оскільки і в цьому випадку напруга якірного кола ДМ буде відрізнятись від номінальної, то її слід встановити рівною 220 В, вводячи реостат R1. Дані вимірювань занести до таблиці 1.2. Тепер досліджувальна машина – двигун, а навантажувальний генератор – генератор.

1.5.6 Для переведення ДМ у режим противімкнення необхідно переконатися у тому, що у якірному колі введені обидві секції реостата R2 (60 Ом), а напруга якірного кола машин ДМ та НГ не перевищує 100В (контроль вольтметрами PV1 та PV3), що забезпечується переміщенням рукоятки реостата R1 у положення “Введений”. Тільки після цього можна перевести перемикачі SA5 та SA4 у положення “П”. Тоді повністю вивести реостат R1 і занести результати вимірювань до таблиці 1.2. Відмітною особливістю цього режиму є той факт, що обмотки досліджуваної машини увімкнені на попередній напрямок обертання, а її якір під дією активного моменту, що утворюється агрегатом П2, обертається у протилежний бік, викликаючи гальмівний момент. Режим противімкнення ДМ виникає за рахунок зміни напрямку струму у колі збудження машини М4.

1.5.7 У режимі динамічного гальмування якірне коло ДМ відмикається від джерела живлення (див. рисунок 1.6) та шунтується

опором R2. Оскільки ДМ приводиться до обертання за допомогою агрегату П2, режим її роботи – генераторний. Для переведення ДМ у режим динамічного гальмування необхідно повністю ввести реостат R1 та вимкнути вимикач QF2. Згодом повернути вимикачі SA4 та SA5

у положення “I” та замкнути вимикач QF3; пересуваючи реостат R1 у бік положення “Виведений”, підняти напругу ДМ до 220 В. Обертаючи рукоятку автотрансформатора TV2 у бік положення “max”, встановити $I_{\text{ядм}} = -(1-2.5)\text{А}$ і занести дані вимірювань до таблиці 1.2. Вивести одну із секцій реостата R2 та повторити вимірювання при $R2=30\text{ Ом}$.

1.5.8 Характеристики двигунового режиму при зменшенні напруги живлення $U < 220\text{ В}$ вимагають зняття двох значень кутової швидкості ДМ: при $I_{\text{ядм}} = 0$ та $I_{\text{ядм}} = (1 \dots 5)\text{А}$. З цією метою ДМ з режиму динамічного гальмування необхідно перевести у двигуновий. Необхідно ввести реостат R1 і, вимкнувши вимикач QF3, ввімкнути QF2. Тоді, виводячи реостат R1 до досягнення значення $U_1 = 220\text{ В}$, повністю вивести реостат R2. Вольтметр PV1 та амперметр PA3 повинні при цьому фіксувати значення $U \approx 220\text{ В}$, а $I_{\text{ядм}} \approx (1-2)\text{А}$. Переміщуючи реостат R1 у положення “Введений”, слід переконатися, що струм $I_{\text{ядм}}$ прямує до нуля при $U = 180\text{ В}$. При досягненні струмом $I_{\text{ядм}}$ нульового значення занести результати вимірювань до таблиці 1.2. Для зняття другого значення кутової швидкості ДМ необхідно навантажити, забезпечивши $U = 180\text{ В}$. Для цього за допомогою автотрансформатора TV2 зменшити напругу живлення до значення $U = 180\text{ В}$ і перевести реостат R1 в бік положення “Виведений” до значення $U = 180\text{ В}$. При цьому $I_{\text{ядм}} = (1 \dots 3)\text{А}$. Результати вимірювань занести до таблиці 1.2. Для зняття другої штучної електромеханічної характеристики при $U = \text{var}$ необхідно виконати аналогічні операції. Ввести реостат R1, при цьому $U = 160\text{ В}$, $I_{\text{ядм}} = 0$. Занести дані до таблиці 1.2. Далі за допомогою автотрансформатора TV2 відразу зменшити напругу якірного кола ДМ до значення $U = 140\text{ В}$, а тоді, виводячи реостат R1, відновити його значення до $U = 160\text{ В}$. При цьому $I_{\text{ядм}} = (1 \dots 3)\text{А}$, результати занести до таблиці 1.2.

1.5.9 Для зняття характеристик ДМ при $\Phi = \text{var}$ спочатку необхідно відновити напругу живлення $U = 220\text{ В}$ за допомогою

автотрансформатора TV2, тоді обмежити струм збудження ДМ до обраного значення (0,4...0,5)А (контроль амперметром РА2) та забезпечити вимогу $I_{\text{ядм}}=0$. Результати вимірювань занести до таблиці 1.2. Вивести реостат R1 до досягнення значень $U=220$ В, а $I_{\text{ядм}}=2$ А, після чого за допомогою автотрансформатора TV2 встановити $U=220$ В, а $I_{\text{ядм}}=(1...3)$ А та занести результати вимірювань до таблиці 1.2.

1.5.10 Побудова усіх електромеханічних характеристик, крім характеристик при $U=\text{var}$ та $\Phi=\text{var}$ слід виконати на одному графіку. (Необхідна інформація наведена на рисунку 1.2, а результати експериментальних досліджень – у таблиці 1.2.) Крім того, для їх побудови необхідно попередньо перевести частоту обертання, виміряну тахометром (об/хв), у кутову швидкість (рад/с):

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}. \quad (1.13)$$

Регульовні електромеханічні характеристики для умов $U=\text{var}$ та $\Phi=\text{var}$ разом з природною характеристикою побудувати на окремому графіку. Студент повинен знати вид цих характеристик за результатами самостійного аналізу рівнянь (1.1) та (1.5) при зміні параметрів U та Φ . Таким чином, для побудови цих характеристик достатньо результатів експериментальних вимірювань, наведених у таблиці 1.2.

Кінцевим результатом роботи є побудова механічних характеристик $\omega=f(M)$ (крім характеристик при ослабленні магнітного потоку ДМ). Виходячи з цього, необхідний перехід від значень $\{n; I_{\text{ядм}}\}$ до параметрів $\{\omega, M\}$. Для цього слід використовувати рівняння (1.13), (1.2), (1.1), з яких спочатку визначити кутову швидкість, а тоді з (1.1) для номінальних значень параметрів

$$C_M \Phi_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ядм.ном}} R_{\text{ядм}}}{\omega_{\text{ном}}},$$

після чого

$$M = C_M \Phi_{\text{ном}} I_{\text{ядм}}.$$

Внутрішній опір якірного кола двигуна можна знайти наближено:

$$R_{\text{ядм}} = 0,5(1 - \eta_{\text{ном}}) \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ядм.ном}}},$$

де ККД двигуна

$$\eta_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \cdot I_{я\delta м. ном}}.$$

1.6 Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен вмішувати:

- таблиці з паспортними даними електричних машин, результатами вимірювань та розрахунків, а також електричну схему лабораторної установки;

- графіки електромеханічних та механічних характеристик ДПС НЗ;

- стислі висновки про особливості досліджувальних режимів роботи ДПС НЗ, проведених розрахунків, а також аналіз отриманого графічного матеріалу;

- статичну модель у вигляді регулювальних та навантажувальних характеристик з розрахунком коефіцієнтів К та S;

- статичну модель двигуна з зазначенням передатних коефіцієнтів та умов, при яких побудована модель.

1.7 Контрольні запитання

1.7.1 Викладіть роботу установки в цілому та поясніть призначення її елементів.

1.7.2 У відповідності до схеми викладіть суть кожного з режимів ДПС НЗ, досліджуваних у роботі.

1.7.3 Назвіть умови, за яких знімалися відповідні характеристики ДПС НЗ.

1.7.4 У чому відмінність та взаємозв'язок електромеханічних та механічних характеристик.

1.7.5 Як побудувати природну механічну характеристику ДПС НЗ за паспортними даними.

1.7.6 У чому відмінність між природною та штучною характеристиками.

1.7.7 Проведіть порівняльний аналіз способів регулювання швидкості ДПС НЗ.

1.7.8 Проведіть порівняльний аналіз гальмівних режимів, що досліджувались у роботі.

1.7.9 Чим відрізняються режими реального та ідеального

неробочого ходу ДПС НЗ.

1.7.10 Пояснити лінійність статичних характеристик ДПС НЗ.

1.7.11 Як визначити жорсткість будь-якої із характеристик ДПС НЗ. Назвіть галузі застосування ДПС НЗ.

1.7.12 Які характеристики називаються статичними.

1.7.13 Які характеристики називаються регулівними.

1.7.14 Які характеристики називаються навантажувальними.

1.7.15 З якою метою будуються статичні характеристики.

1.7.16 З якою метою будуються статичні моделі двигунів, робочих машин та робочих процесів.

1.7.17 Яким чином підраховується коефіцієнт передачі електродвигуна за напругою (K).

1.7.18 Яким чином підраховується коефіцієнт статизму (S).

1.7.19 Розкажіть, яким чином лінеаризуються нелінійні характеристики електродвигунів постійного струму незалежного збудження.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Дослідження електромеханічних та механічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження у режимах роботи при різних способах регулювання швидкості двигуна, та режимах гальмування

Мета роботи - вивчити фізичні процеси та властивості двигуна постійного струму послідовного збудження шляхом зняття електромеханічних характеристик, розрахунку механічних характеристик, а також аналізу цих характеристик у двигуновому та гальмівних режимах.

2.1 Основні теоретичні положення

Для електродвигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) у загальному вигляді рівняння електромеханічної характеристики, яке пов'язує кутову швидкість ω та струм кола якоря I_a , така ж як і для двигуна незалежного збудження (ДПС НЗ):

$$\omega = \frac{(U_m - I_a R_a)}{C_m \cdot \Phi_{ном}}, \quad (2.1)$$

де U_m – напруга джерела живлення двигуна, В; I_a – струм якірного кола двигуна, А; R_a – сумарний опір якірного кола, який складається для ДПС ПЗ з опору обмотки якоря R_a , обмотки збудження $R_{зб}$ та опору зовнішнього реостата R_p , Ом; C_m – постійний коефіцієнт, який враховує особливості конструкції двигуна; Φ – магнітний потік, Вб; ω – кутова швидкість двигуна, с⁻¹.

На відміну від ДПС НЗ, тут магнітний потік Φ є функцією струму I_a , яка графічно зображується кривою намагнічування сталі двигуна і, як відомо, має нелінійний характер. За цих умов відсутній точний аналітичний вираз як для електромеханічної, так і для механічної характеристик ДПС ПЗ:

$$\omega = f(I_a), \quad \omega = f(M),$$

де M – момент на валу двигуна, Нм, що визначається залежністю

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I_a.$$

Якщо для спрощення аналізу припустити, нехтуючи насиченням магнітної системи, лінійну залежність між потоком та струмом якоря, тобто вважати, що $\Phi = \beta \cdot I_a$, то момент двигуна

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = \beta \cdot C_m \cdot I_{\text{я}}^2. \quad (2.2)$$

У цьому випадку з рівняння (2.1) отримаємо вираз для механічної характеристики підстановкою значень струму з (2.2):

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{C_m \beta \cdot M}} - \frac{R_{\text{я}}}{C_m \beta}. \quad (2.3)$$

Звідси випливає, що при насиченні магнітного кола двигуна механічна характеристика зображується кривою, для якої вісь ординат є асимптотою. Рівняння (2.3) дає тільки загальне уявлення про механічну характеристику ДПС ПЗ. При точних розрахунках користуватися цим виразом неможливо, оскільки машин з ненасиченою магнітною системою у сучасній практиці майже немає.

Механічну характеристику, отриману для нормальної схеми вмикання при номінальних параметрах напруги живлення і без додаткових опорів у колах двигуна, називають природною. Її побудову для ДПС ПЗ у вибраному масштабі виконують за даними каталогів, у яких приводяться універсальні природні характеристики у відносних одиницях.

На рисунку 2.1 зображена наближена універсальна характеристика двигунів послідовного збудження серії ПБ.

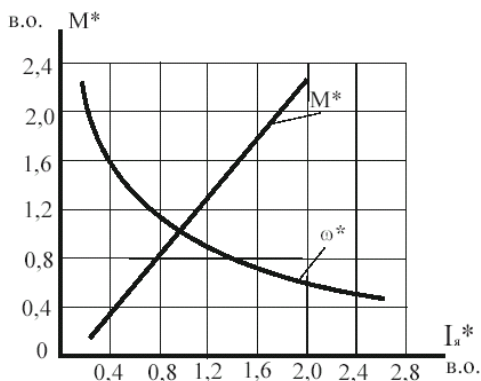


Рисунок 2.1 – Універсальна характеристика ДПС серії ПБ

Регулювання швидкості ДПС НЗ проводять або змінюванням величини напруги живлення U , або регулюванням опору реостата R_p у якірному колі двигуна, або регулюванням струму збудження I_z , використовуючи реостати, які шунтують обмотку якоря або обмотку

збудження двигуна.

На рисунку 2.2 зображена схема вмикання ДПС ПЗ з зображенням реостатів $R_{шя}$ й $R_{шз}$, вмикання яких забезпечує отримання штучних характеристик двигуна.

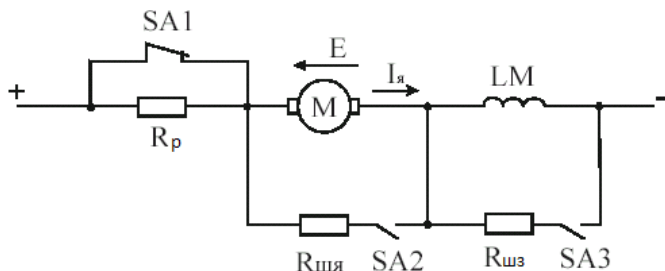


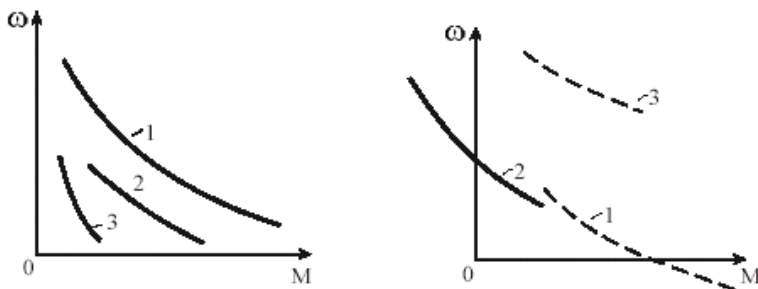
Рисунок 2.2 – Схема вмикання ДПС ПЗ

На рисунку 2.3 показаний приблизний вигляд механічних характеристик ДПС ПЗ. Аналогічний вигляд мають і електромеханічні характеристики.

В усіх режимах, крім шунтування обмотки якоря, ДПС ПЗ не має кінцевого значення швидкості ідеального неробочого ходу, оскільки при зменшенні моменту навантаження на валу і струму якорного кола I_a зниження потоку Φ відбувається у більшій мірі, ніж зростання швидкості ω , тому ЕРС двигуна $E = C_m \Phi \omega$ не може бути більшою за напругу живлення U і двигун не може перейти у генераторний режим і віддавати енергію у мережу (див. криву 1 на рисунку 2.3, а).

Через різку нелінійність механічних та електромеханічних характеристик ДПС ПЗ кутова швидкість обертання вала двигуна у зоні малих навантажень різко зростає, що робить експлуатацію привода у цьому режимі неприпустимою.

При шунтуванні обмотки якоря ДПС ПЗ реостатом $R_{шя}$ (див. рисунок 2.2) струм при розвантаженні двигуна знижується до нульового значення (при кінцевому значенні ЕРС), а обмотка збудження живиться струмом, який протікає через шунтуючий реостат. Це забезпечує перетин механічної характеристики, яка відповідає цьому режиму, з віссю ординат (характеристика 2 на рисунку 2.3, б). ДПС ПЗ при цьому працює у генераторному режимі на шунтуючий реостат.



- а) 1- природна
2-при зниженій напрузі та $R_{я}=0$
3-реостатна $R_{я}>0$

- б) 1-гальмування проти ввімкненням
2-шунтування обмотки якоря
3-шунтування обмотки збудження

Рисунок 2.3 – Штучні характеристики ДПС ПЗ

При шунтуванні обмотки якоря ДПС ПЗ реостатом $R_{шя}$ (див. рисунок 2.2) струм при розвантаженні двигуна знижується до нульового значення (при кінцевому значенні ЕРС), а обмотка збудження живиться струмом, який протікає через шунтуючий реостат. Це забезпечує перетин механічної характеристики, яка відповідає цьому режиму, з віссю ординат (характеристика 2 на рисунку 2.3, б). ДПС ПЗ при цьому працює у генераторному режимі на шунтуючий реостат.

Для ДПС ПЗ можливі два режими гальмування: противвімкненням та динамічний. У режимі гальмування противвімкненням вал двигуна під дією моменту опору обертається у напрямку, протилежному тому, який відповідає полярності, прикладеної до двигуна напруги живлення (крива 1 на рисунку 2.3, б).

У режимі динамічного гальмування обмотка якоря замикається на зовнішній реостат. При цьому виникає перетворення накопиченої у приводі механічної енергії у електричну, яка розсівається двигуном у зовнішньому реостаті. ДПС ПЗ у цьому випадку працює у режимі генератора. Через малу жорсткість механічних та електромеханічних характеристик ДПС ПЗ знаходять застосування у електроприводах, де неприпустимим є підвищення швидкості при малих навантаженнях.

Шунтування обмотки якоря ДПС ПЗ застосовується у випадках, коли необхідно забезпечити стійку роботу двигуна у зоні малих моментів навантажень.

2.2 Програма роботи

2.2.1 Вивчити схему лабораторної установки та особливості роботи її окремих елементів.

2.2.2 Зняти електромеханічні характеристики ДПС ПЗ у двигуновому режимі при кількох значеннях опору реостата у якірному колі.

2.2.3 Зняти електромеханічні характеристики у режимі противімкнення.

2.2.4 Зняти електромеханічні характеристики при шунтуванні обмотки якоря.

2.2.5 Зняти електромеханічні характеристики при шунтуванні обмотки збудження.

2.2.6 За результатами вимірювань побудувати електромеханічні характеристики ДПС ПЗ, розрахувати та побудувати його природні та штучні механічні характеристики.

2.2.7 За результатами досліджень зробити короткі висновки.

2.2.8 Установити двигуновий режим при уведеному опорі реостата у якірному колі та, змінюючи якірну напругу, зняти статичну регульовальну характеристику. Провести лінеаризацію регульовальної характеристики та розрахувати коефіцієнт передачі за напругою “К”. Значення опору реостата та діапазон вимірювання якірної напруги встановлюється викладачем.

2.2.9 За знятою електромеханічною характеристикою ДПС НЗ у двигуновому режимі при тому ж значенні опору реостата у якірному колі та величині якірної напруги побудувати навантажувальну характеристику, провести її лінеаризацію та розрахувати коефіцієнт статизму “S”. Величини опорів реостата повинні відповідати значенням цих величин за пунктом 2.2.8.

2.2.10 За результатами розрахунків коефіцієнтів К та S побудувати статичну модель двигуна постійного струму послідовного збудження.

2.3 Опис лабораторної установки

Схема установки зображена на рисунку 2.4. Досліджуваною машиною (ДМ) є двигун постійного струму послідовного збудження, паспортні дані якої наведені у таблиці 2.1. Опір R_2 у якірному колі ДМ використовується як пусковий, регульовальний або гальмівний у залежності від режиму роботи. На одному валу з ДМ знаходиться навантажувальний генератор МЗ, призначений для утворення

регулювального навантаження на валу ДМ. Навантаженням або джерелом живлення МЗ (в залежності від режиму його роботи) є електромашинний перетворювач П, зібраний з приводного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором М1 і генератора постійного струму незалежного збудження М2. Паспортні дані цих машин також наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Паспортні дані електричних машин, лабораторного стенду

Найменування та позначення	Тип	Номінальні дані			
		Напруга, В	Потужність, кВт	Струм, А	Частота обертання, об/хв
Досліджувальний двигун М4	ПБ-32	220	1,0	5,5	1500
Навантажувальний генератор МЗ	ПН-45	320	2,6	8,1	1440
Генератор М2	ПН-45	230		14,4	1440
Двигун М1	АД/2/31/4	380		3	1430

Для живлення досліджувального двигуна використовується однофазний автотрансформатор TV3 та випрямляч UZ3. Вимикач QF4 призначений для шунтування обмотки якоря, QF3 – для шунтування обмотки збудження ДМ, QF2 – для ввімкнення якірних кіл М2, М3 на паралельну роботу. Обмотки збудження машин М2, М3 живляться від випрямлячів UZ2 та UZ3, підімкнених до мережі змінного струму через автотрансформатори TV2, TV3 відповідно.

Регулювання моменту навантаження на валу ДМ у двигуновому режимі здійснюється регулюванням струму якірного кола машин М2, М3 шляхом зміни напруги на затискачах генератора М2. Для перевodu ДМ у режим гальмування противімкненням додатково змінюють полярність струму збудження МЗ, переводячи останній у двигуновий режим. Для вимірювання частоти обертання ДМ використовується тахометричний прилад, складений з датчика (трифазний асинхронний тахогенератор BR, розташований на одному валу з ДМ) і приймача BE, встановленого на одному валу з ДМ. Перемикач SA4 служить для зміни напрямку магнітного потоку генератора МЗ. У зв'язку з різким зростанням швидкості ДМ при малому навантаженні на валу необхідно слідкувати, щоб швидкість не перевищувала 1.25 номінальної (1500 об/хв).

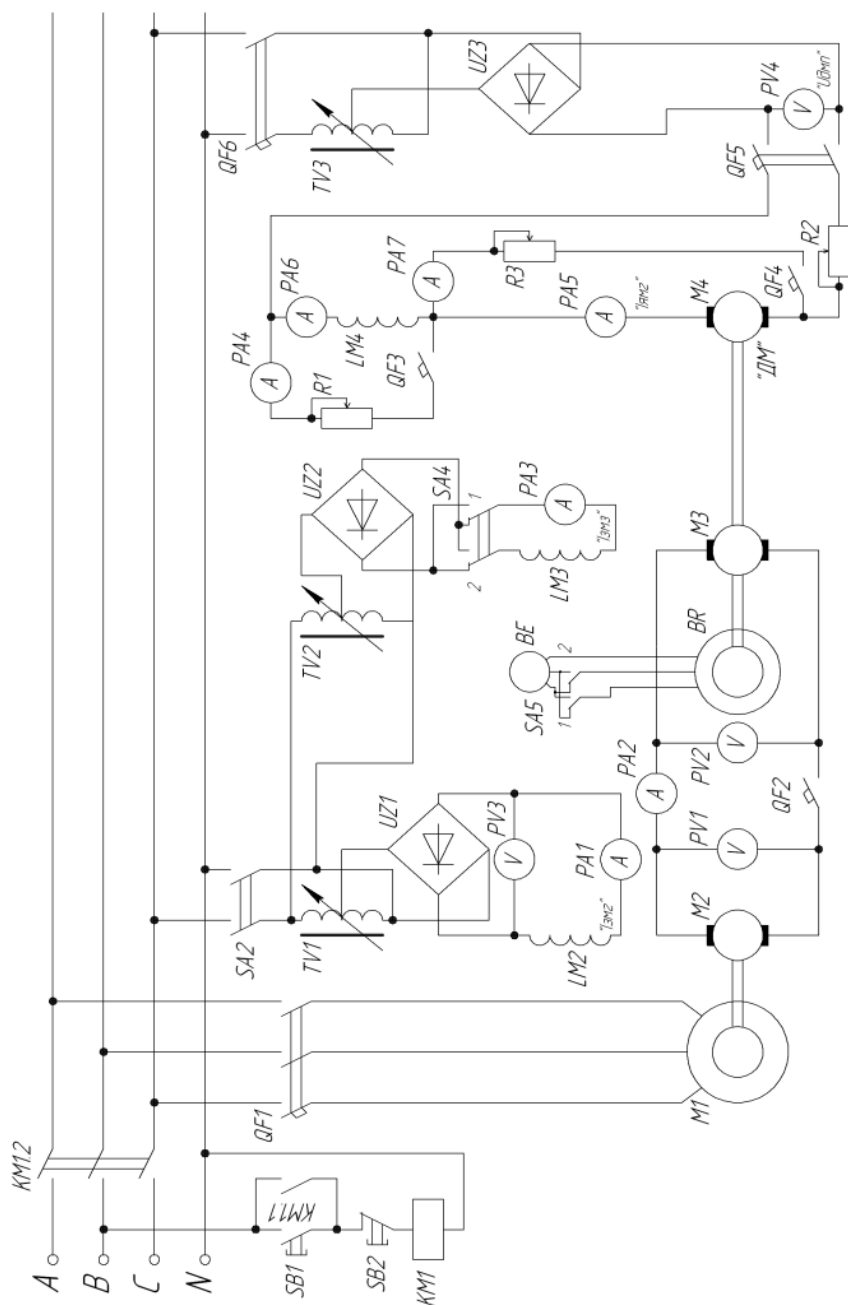


Рисунок 2.4 – Схема лабораторного стенда

2.4 Підготовка до роботи

Кожен студент повинен завчасно підготуватися до наступної лабораторної роботи. Для цього необхідно опрацювати теоретичний курс за питаннями, які вимагаються, вивчити порядок проведення роботи, зробити заголовки звіту.

Перед початком виконання лабораторної роботи студент показує викладачу заготовку звіту та відповідає на питання, поставлені за сутністю роботи. Непідготовлений студент до виконання лабораторної роботи не допускається, та відпрацьовує її в установленому порядку.

2.5 Порядок проведення роботи

2.5.1 Перед початком роботи необхідно перевірити початкові положення елементів установки: перемикач SA5 і тумблер SA4 повинні бути у положенні “I”, інші вимикачі вимкнені. Рукоятки автотрансформаторів TV1, TV2 у крайньому лівому положенні (у положенні “min”), пусковий реостат R2-виведений, рукоятка автотрансформатора TV3-у положенні “min”.

2.5.2 Вмикання схеми проводиться наступним чином. Для подачі напруги на стенд треба натиснути кнопку “Вкл”. Запуск ДМ необхідно здійснити зниженою напругою, починаючи від нуля. Для цього при відімкненому вимикачі QF3 ввімкнути QF6 та, переконавшись за показником вольтметра PV4, що $U_{DM}=0$, ввімкнути QF5. За допомогою TV3 плавно підвищити напругу U_{DM} до досягнення двигуном частоти обертання 900...1000 об/хв. Вимикачем QF1 запустити перетворювач П. Увімкнути вимикач SA3 і, повертаючи рукоятку TV1, підняти напругу збудження U_z до 100 В (контроль вольтметром PV3). Установити за допомогою автотрансформатора TV2 напругу навантажувального генератора $U_2=160$ В (контроль вольтметром PV2), а автотрансформатора TV1 – напругу генератора M2 $U_1=160$ В. Положення “I” перемикача SA4 узгоджує полярність напруг машин M2, M3, тому при досягненні рівності $U_1=U_2$ необхідно ввімкнути за допомогою QF2 їх на паралельну роботу. Після вмикання QF2 схема повністю підготовлена до роботи.

2.5.3 Характеристики ДПС ПЗ у двигуновому режимі при $R_0=R_2$ змінюється наступним чином. Установити за допомогою TV3 напругу $U_{DM}=60$ В. Змінюючи автотрансформатором TV1 момент навантаження ДМ шляхом зміни напруги машини M3, яка працює у

генераторному режимі, фіксувати показання приладів: струм $I_{яДМ}$ (контроль амперметром РА5) не повинен перевищувати 7 А. Вимірювання слід проводити приблизно через 1 А. Дані вимірювань та результати подальших розрахунків повинні бути зведені до таблиці 2.2. Повторити дослід, виставивши напругу $U_{ДМ}=70$ В.

Таблиця 2.2 – Дані вимірювань й результати розрахунків для визначення електромеханічної та механічної характеристик двигуна

Номер вимірів	Дані вимірювань						Розрахункові дані			
	$U_{ДМ}=60$ В			$U_{ДМ}=70$ В			$U_{ДМ}=60$ В		$U_{ДМ}=70$ В	
	$I_{яДМ},$ А	$I_3,$ А	$n,$ об/хв	$I_{яДМ},$ А	$I_3,$ А	$n,$ об/хв	$\omega,$ c^{-1}	$M,$ Н·м	$\omega,$ c^{-1}	$M,$ Н·м

2.5.4 Дослідження характеристик ДПС НЗ у двигуновому режимі при $R_o \neq 0$ проводиться аналогічно попередньому досліді при $U_{ДМ}=70$ В, тільки у якірне коло ДМ необхідно ввести реостат R2. Дослід проводиться двічі: один раз при значенні $R2'=0,5 \cdot R2$, другий – при $R2''=R2$. Вимірювання слід проводити приблизно через 0,5 А.

Дані вимірювань та результати подальших розрахунків звести до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Дані вимірювань та результати розрахунків для визначення електромеханічних й реостатних механічних характеристик у двигуновому режимі при $R_o \neq 0$ та у режимі гальмування проти ввімкненням

Номер вимірів	Дані вимірювань						Розрахункові дані			
	$R2'=0,5 \cdot R2$			$R2''=R2$			$R2'=0,5 \cdot R2$		$R2''=R2$	
	$I_{яДМ},$ А	$I_3,$ А	$n,$ об/хв	$I_{яДМ},$ А	$I_3,$ А	$n,$ об/хв	$\omega,$ c^{-1}	$M,$ Н·м	$\omega,$ c^{-1}	$M,$ Н·м

2.5.5 Гальмівний режим противввімкненням – продовження попереднього режиму при більшій величині R2. Для переведення ДМ у цей режим необхідно перевести МЗ у двигуновий режим, і тоді МЗ, отримуючи живлення від генератора М2, буде обертати ДМ проти напрямку моменту, який розвиває ДМ. Таким чином, МЗ буде створювати активний момент опору.

2.5.7 Дослідження характеристик ДПС ПЗ у двигуновому режимі при шунтуванні обмотки збудження проводиться таким чином:

- установити початковий стан схеми $U_{ДМ}=70$ В;
- вимкнути вимикач QF4;
- вивести реостат R2;
- ввести повністю реостат R1;
- увімкнути вимикач QF3;

– змінюючи навантаження ДМ, як і раніше, шляхом варіювання напруги M2 автотрансформатором TV1, здійснити 5-6 вимірювань, дані вимірювань та результати подальших розрахунків занести до таблиці 2.5; повторити дослід, зменшивши удвічі R_1 . При проведенні дослідів необхідно слідкувати, щоб частота обертання двигуна не перевищувала 1500 об/хв.

Таблиця 2.5 – Дані вимірювань та розрахункові дані для визначення електромеханічних та механічних характеристик двигуна при шунтуванні обмотки збудження

Номер вимірів	Дані вимірювань						Розрахункові дані			
	$R_1'=0.5 \cdot R_1$			$R_1''=R_1$			$R_1'=0.5 \cdot R_1$		$R_1''=R_1$	
	$I_{яДМ},$ А	$I_3,$ А	$n,$ об/хв	$I_{яДМ},$ А	$I_3,$ А	$n,$ об/хв	$\omega,$ c^{-1}	$M,$ Н·м	$\omega,$ c^{-1}	$M,$ Н·м
1										

2.5.8 При побудові та розрахунку характеристик необхідно керуватися наступним. Оскільки електромеханічні характеристики являють собою залежності $\omega=f(I_{я})$, побудову їх здійснити безпосередньо за даними вимірювань. При цьому попередньо треба перевести частоту обертання (n , об/хв), зафіксовану тахометром, у кутову швидкість, c^{-1} (у систему одиниць СІ):

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}. \quad (2.4)$$

Природну механічну характеристику ДПС ПЗ $\omega=f(M)$ побудувати, використовуючи універсальні характеристики $\omega^*=f(I^*)$, $M^*=f(I^*)$, наведені на рисунку 2.1. Для цього для декількох (6-7) значень I^* за графіком рисунку 2.1 визначити відповідні їм значення:

$$\omega^* = \omega / \omega_{ном}, \quad M^* = M / M_{ном}.$$

Після цього розрахувати абсолютні значення $\omega = \omega_{ном} \cdot \omega^*$, $M = M_{ном} \cdot M^*$ з урахуванням того, що

$$M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном},$$

де $\omega_{ном}$, $P_{ном}$ – паспортні дані двигуна.

Штучні механічні характеристики слід будувати з урахуванням співвідношення:

$$M_{шт} = M \frac{I_я}{I_з}, \quad (2.5)$$

де $M_{шт}$ – шукане значення штучного моменту;

M – момент двигуна при даному $R1$;

$I_з$ – струм обмотки збудження ДПС ПЗ.

Порядок розрахунку та побудови штучних механічних характеристик такий:

- для вибраної, експериментально знятої К-ї точки електромеханічної характеристики, за графіком природної характеристики $M = f(I_я)$, (рисунок 2.1), знайти значення моменту, який мав би двигун при струмі $I_з$, який протікає через обмотку збудження ДПС ПЗ при швидкості ω_k при даній схемі вмикання двигуна;

- потім за формулою (2.5) розрахувати $M_{шт}$, використовуючи як величини $I_я$ показання амперметра РА5, а в якості $I_з$ показання амперметра РА6, які відповідають обраній точці ω_k ;

- повторивши вказані операції для усіх проведених дослідів, побудувати штучні характеристики $\omega = f(M_{шт})$

2.6 Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен вміщувати:

- таблиці з паспортними даними електричних машин, з даними вимірювань та результатів розрахунків;

- графіки універсальних характеристик ДПС ПЗ;

- графіки електромеханічних характеристик;

- графіки природних та штучних механічних характеристик;

- короткі висновки з аналізом характеристик двигуна;

- лінеаризувати статичні регулювальні та навантажувальні характеристики ДПС ПЗ;

- статичну модель ДПС ПЗ, яка відповідає умовам згідно з пунктами 2.2.8 та 2.2.9.

Примітка. Методика побудови статичної моделі наведена у додатку 1Д.

Для того, щоб уникнути нагромадження кривих при графічній побудові характеристик слід будувати окремо графіки механічних та електромеханічних характеристик, причому криві для режимів за пп. 2.5.3 – 2.5.4 представити на одному рисунку, а криві для режимів за пп. 2.5.5 – 2.5.7 – на іншому.

2.7 Контрольні запитання

2.7.1 Викладіть роботу установки в цілому та особливості роботи її окремих елементів.

2.7.2 У відповідності до схеми викладіть отримання кожного з режимів ДПС ПЗ, що досліджувались у роботі.

2.7.3 Викласти суть електромеханічних та механічних характеристик, їх взаємозв'язок та відмінність.

2.7.4 Як побудувати природну та механічну характеристику ДПС ПЗ за універсальними характеристиками $\omega = f(I_A)$, $M = f(I_A)$.

2.7.5 Поясніть не лінійність характеристик ДПС ПЗ.

2.7.6 Чи можливий режим гальмування ДПС ПЗ з віддачею енергії у мережу.

2.7.7 Чи можливо отримати кінцеву швидкість ідеального неробочого ходу ДПС ПЗ.

2.7.8 Переваги та недоліки ДПС ПЗ порівняно з ДПС НЗ.

2.7.9 Назвіть галузі застосування ДПС ПЗ.

2.7.10 Який вигляд має статична регульовальна характеристика ДПС ПЗ.

2.7.11 Який вигляд має статична навантажувальна характеристика ДПС ПЗ.

2.7.12 Яким чином лінеаризується статична навантажувальна характеристика.

2.7.13 Який вигляд має статична характеристика при різних значеннях навантаження.

2.7.14 Наведіть приблизний вигляд статичних лінеаризованих регульовальних та навантажувальних характеристик у різноманітних режимах роботи ДПС ПЗ (двигуневому, противвімкненням, при шунтуванні обмотки якоря, при шунтуванні обмотки збудження), [2,4,5].

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Дослідження електромеханічних та механічних характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором у режимах роботи при різних способах регулювання швидкості двигуна, та режимах гальмування

Мета роботи – вивчити фізичні процеси та властивості асинхронного двигуна з фазним ротором шляхом зняття електромеханічних характеристик, розрахунку та побудови механічних характеристик, а також аналізу цих характеристик у генераторному, двигуновому та гальмівному режимах.

Через те, що електроустаткування стенду лабораторної роботи №3 не містить перетворювача частоти з певним законом регулювання, то не є можливим зняти реальну регулівну характеристику АД з фазним ротором. Тому при побудові моделі необхідно прийняти лінійний характер залежності швидкості від напруги при $f_c = \text{const} = 50 \text{ Гц}$ (f_c – частота мережі живлення двигуна), тобто у першому наближенні може бути прийнятий пропорційний закон частотного регулювання (рисунок 3.1).

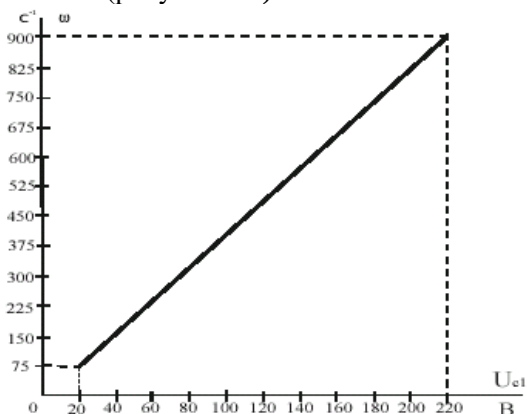


Рисунок 3.1 – Статична регулівна характеристика АД типу АК-51/6 при пропорційному законі частотного керування ($f=50 \text{ Гц}$, $M_c = \text{const} = 0$)

Точка лінеаризації повинна відповідати параметрам електромеханічної характеристики у двигуновому режимі.

Точка лінеаризації (тобто значення напруги, яка подається на статор двигуна) задається викладачем.

За характеристикою рисунку 3.1 обчислюється коефіцієнт передачі за напругою “К” для побудови статичної моделі двигуна.

3.1 Основні теоретичні положення

На відміну від конструкції двигунів постійного струму та синхронних, асинхронний двигун є індукційним, тобто зв'язок між статором і ротором електромагнітний, а це значить, що неможливо для формування аналітичного виразу механічної характеристики безпосередньо користуватися методом теорії електричних кіл.

Тому, основний метод аналізу процесів в асинхронних двигунах – використання еквівалентних заступних схем, у яких електромагнітні зв'язки замінені електричними (коло статора електрично пов'язано з колом ротора). Через симетрію трифазного асинхронного двигуна, розглядаються фізичні явища, відповідно тільки до однієї фази двигуна (обмотки статора і ротора з'єднані “зіркою”). Найбільш зручна для цього спрощена Г-подібна заступна схема (рисунк 3.2) з намагнічуючим контуром, винесеним на затискачі. Де U_1 – первинна фазна напруга; I_1 – фазний струм статора; I'_2 – зведений фазний струм ротора; I_μ – струм намагнічування; X_1 , X'_2 – індуктивні опори розсіювання первинної та зведеної вторинної обмоток; R_m , X_m – активний та індуктивний опори намагнічуючого контуру; R_1 , R'_2 – активні опори первинної та зведеної вторинної обмоток; $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ –

ковзання.

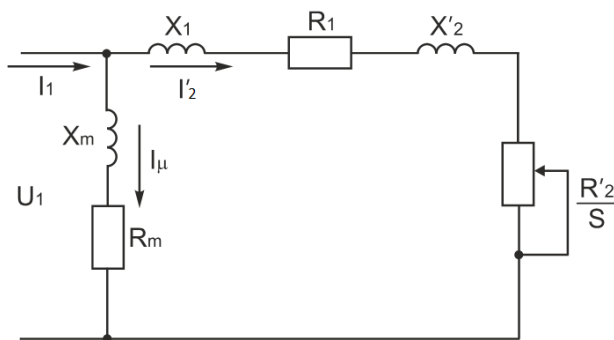


Рисунок 3.2 – Г-подібна заступна схема АД

Виведення рівняння механічної характеристики виконується з умов рівності втрат у роторі для реального двигуна і для заступної схеми:

$$\begin{aligned}\Delta P_2 &= 3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2'; \\ \Delta P_2 &= P_{EM} - P_n = M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot \omega_0 \cdot S; \\ \Delta P_2 &= \Delta P; \\ M \omega_0 S &= 3(I_2')^2 R_2', \quad M = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\omega_0 S},\end{aligned}\tag{3.1}$$

де ΔP_2 – втрати у роторі для заступної схеми;

P_2 – втрати у роторі для реального двигуна;

P_{EM} – електромагнітна потужність;

P_n – корисна потужність (потужність на валу двигуна);

ω_0 – синхронна швидкість (швидкість ідеального неробочого ходу машини);

ω – швидкість ротора двигуна.

Із заступної схеми (рисунок 3.2):

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{Z} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}.\tag{3.2}$$

Вирішуючи спільно (3.1) та (3.2), отримуємо вираз для механічної характеристики асинхронного двигуна:

$$M = \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right] \cdot S}.\tag{3.3}$$

За рівнянням (3.3) можна побудувати механічну характеристику, якщо відомі опори кола статора і ротора. Ці величини задані у паспорті машини і, тому для практичних розрахунків формула (3.3) незручна. Для цієї мети більш зручним є рівняння (3.4), отримане після дослідження виразу на екстремум й спрощення рівняння (3.3):

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max} \cdot (1 + a \cdot S_{kp})}{\frac{S}{S_{kp}} + \frac{S_{kp}}{S} + 2 \cdot a \cdot S_{kp}}.\tag{3.4}$$

де $M_{\max}$ – максимальне значення моменту у двигуновому режимі, що

відповідає критичному значенню ковзання ($S_{кр}$), визначається з перевантажувальної здатності $\lambda = M_{\max}/M_{ном}$, вказаної в у каталозі; $a = R_1/R'_2$.

Для звичайних асинхронних двигунів параметр a близький до одиниці, тому для звичайних інженерних розрахунків можна користуватися більш спрощеною формулою, отриманою з виразу (3.4):

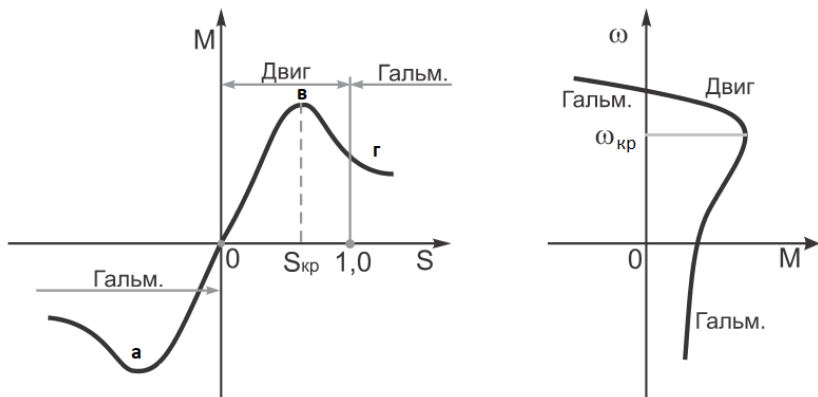
$$M = \frac{2 \cdot M_{\max} \cdot (1 + S_{кр})}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + 2 \cdot S_{кр}}. \quad (3.5)$$

Якщо у рівнянні (3.3) покласти $R_l = 0$, яке мале порівняно з величиною $X_2 + X_2^l$ (особливо для великих асинхронних машин), то рівняння механічної характеристики набуде ще більш спрощеного вигляду (формула Клосса):

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}. \quad (3.6)$$

Вираз (3.6) з достатньою для практики точністю відповідає фізичним процесам у двигунах. Побудовану на його основі характеристику можна поділити на дві ділянки – лінійну та нелінійну.

На рисунку 3.3 показані ці ділянки механічної характеристики у координатах $M=f(S)$ (рисунок 3.3, а) та $\omega=f(M)$ (рисунок 3.3, б).



а) Механічна характеристика $M=f(S)$

б) Механічна характеристика $\omega=f(M)$

Рисунок 3.3 – Механічні характеристики АД

Перша ділянка *ав* ($|S| < |S_{кр}|$) знаходиться у межах малих (за абсолютним значенням) ковзань. Ця ділянка характеристики є лінійною. Для двигуневого режиму це робоча частина характеристики, на ній знаходиться точка номінального режиму роботи. Друга ділянка характеристики – *вг* являє собою криву близьку до рівнобічної гіперболи і знаходиться у межах великих ковзань ($|S| > |S_{кр}|$). Ділянка відповідає неробочій частині характеристики (режими пуску двигуна й гальмування).

Для двигуна з фазним ротором, як вже зазначалося, величина *a* близька до одиниці, тому з достатньою точністю $S_{кр}$ можна визначити з (3.5) для номінального режиму ($M=M_{ном}$; $S=S_{ном}$; $\lambda = M_{max}/M_{ном}$):

$$S_{кр} = \frac{S_{ном} \cdot \left[\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 2 \cdot S_{н} \cdot (1 - \lambda)} - 1 \right]}{1 + 2 \cdot S_{н} \cdot (1 - \lambda)} \quad (3.7)$$

Приблизне значення $S_{кр}$ для асинхронних двигунів з фазним ротором можна знайти також і за формулою (3.6):

$$S_{кр} = S_{ном} \cdot \left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1} \right).$$

Для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором $S_{кр}$ й *a* можна розрахувати, використовуючи рівняння (3.4) для двох характерних режимів:

- пускового ($M=M_{ном}$; $S=1,0$),
- номінального ($M=M_{ном}$; $S=S_{ном}$).

Отриману систему рівнянь

$$M = \frac{2 \cdot M_{max} \cdot (1 + a \cdot S_{кр})}{\frac{1}{S_{кр}} + S_{кр} + 2 \cdot a \cdot S_{кр}}, \quad M = \frac{2 \cdot M_{max} \cdot (1 + a \cdot S_{кр})}{\frac{S_{ном}}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S_{ном}} + 2 \cdot a \cdot S_{кр}}$$

вирішують відносно $S_{кр}$ та *a*, тоді обчислюють $M=f(S)$ для двигуневого режиму, спираючись на низку поточних значень ковзання $S(0 \leq S \leq 1)$, та будують механічну характеристику: $\omega=f(M)$

У наведених формулах використовувалось номінальне ковзання, розраховане у системі одиниць СІ за формулою

$$S_{ном} = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0},$$

де $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f / p$, $[с^{-1}]$ – синхронна кутова швидкість.

У практичній системі одиниць ця формула має вигляд

$$S_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0},$$

де $n_0 = 60 \cdot f / p$ [об/хв.] – синхронна частота обертання.

Зв'язок між синхронною швидкістю у системі одиниць СІ і у практичній системі одиниць має вигляд

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{60} \cdot n_0 [1/с].$$

Частота живлення f задана, здебільшого це промислова частота 50 Гц, число пар полюсів p легко визначити з паспортних даних двигуна.

3.2 Програма роботи

3.2.1 Вивчити схему лабораторної установки та особливості роботи окремих її елементів.

3.2.2 Зняти електромеханічні характеристики у генераторному, гальмівному та двигуновому режимах .

3.2.3 За результатами вимірювань розрахувати й побудувати штучні та природну механічні характеристики .

3.2.4 Зробити висновки з досліджених характеристик двигуна.

3.2.5 Навести окремо одну з навантажувальних (електромеханічних) характеристик (природну), провести її лінеаризацію та розрахувати коефіцієнт “S”.

3.2.6 Побудувати статичну модель АД з фазним ротором при вказаних умовах.

3.2.7 При навантаженні на досліджувальному двигуні М4 (ДМ) приблизно 40% від номінального (узгодити з викладачем), вимірюючи опір роторного реостату від максимального до мінімального, зняти регулівну характеристику та побудувати її.

3.2.8 З регулівної характеристики обчислити коефіцієнт передачі “K”.

3.2.9 Для ідентичних значень статичної напруги (за вказівками викладача) за результатами розрахунків згідно пунктів 3.2.5 та 3.2.8 побудувати статичну модель АД з фазним ротором при регулюванні швидкості з боку ротора.

3.2.10 Провести порівняння величин коефіцієнтів передачі “K” при регулюванні швидкості асинхронного фазного двигуна зі сторони статора і ротора.

Методика побудови моделей наведена у [1].

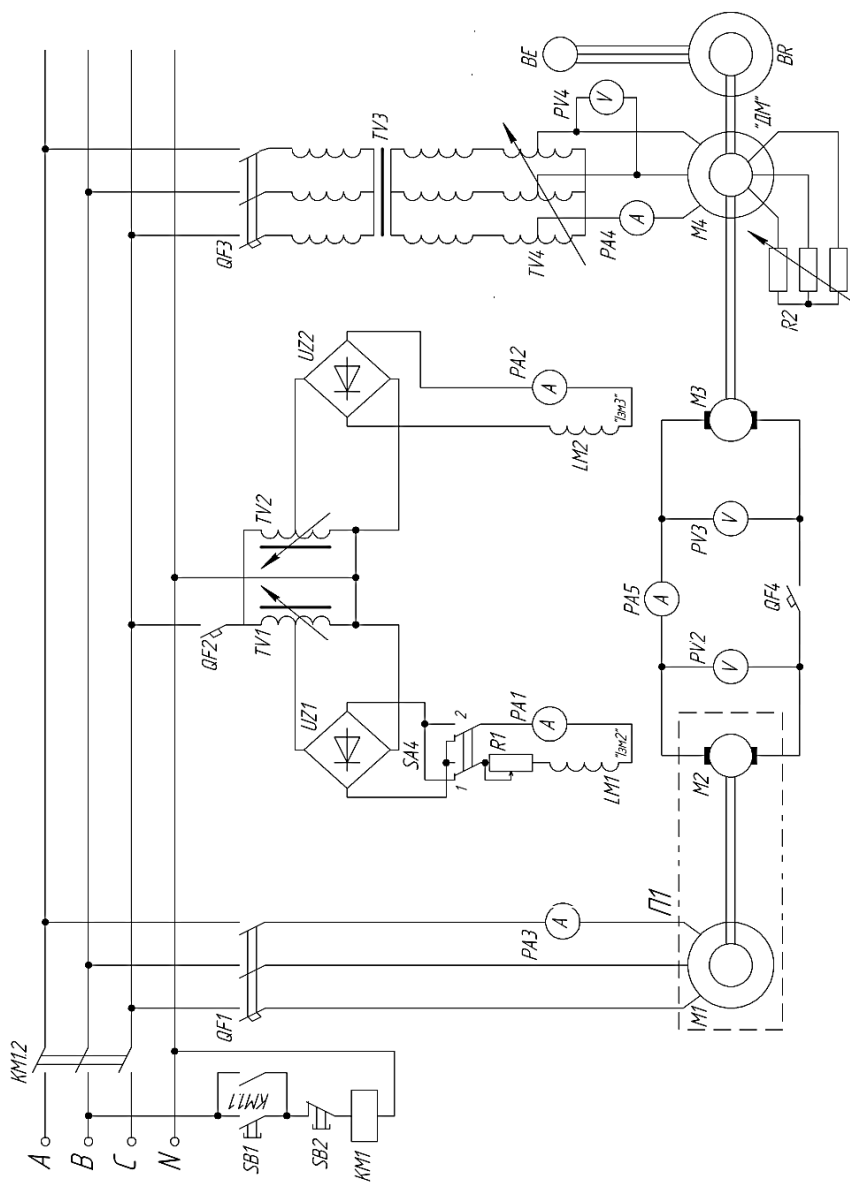


Рисунок 3.4 — Схема лабораторного стенда

3.3 Опис лабораторної установки

Схема установки зображена на рисунку 3.4 (а також на приладовій панелі стенду). Об'єктом досліджень є асинхронний трифазний двигун з фазним ротором (позначення на схемі ДМ – досліджувальна машина), паспортні дані якої наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Паспортні дані електричних машин, які використовуються у лабораторному стенді

Найменування та позначення	Тип	Номинальні дані			
		Напруга, В	Потужність, кВт	Струм, А	Частота обертання, об/хв
Досліджувальна машина М4	АК-51/6	380	1.7	5.0	880
Навантажувальний генератор МЗ	ЛЗ2	230	1.0	5.7	1000
Генератор М2	ПН-85	230	6.8	28.5	1460
Машина М1	А5І-4	380	4.5	16.3	1440

Резистор R2 у колі ротора ДМ використовується як пусковий або регулівний, залежно від режиму роботи.

Двигун ДМ слід досліджувати при зниженій напрузі живлення $U_{\text{ДМ}}$ для запобігання великих струмів у двигуні при малій швидкості у двигуновому режимі та у режимі гальмування протипротивленням. Для зниження напруги $U_{\text{ДМ}}$ до необхідного значення передбачений знижувальний трансформатор TV3; коло живлення включає в себе і регулівний трансформатор TV4, який призначений для підтримки постійності підведеної напруги. При розрахунку механічних характеристик ця умова ($U_{\text{ДМ}} = \text{const}$) дозволяє легко привести параметри, отримані у досліді при зниженій напрузі, до параметрів, які відповідають номінальній напрузі.

Досліджувальна машина механічно пов'язана з генератором МЗ, який є машиною постійного струму незалежного збудження (МПС НЗ). Використовуючи у якості навантаження для ДМ машину постійного струму МЗ, можна реалізувати на ДМ двигуновий, гальмівний та генераторний режими. Для вимірювання частоти обертання ДМ використовується тахометричний пристрій, який

складається з давача (трифазний синхронний тахогенератор BR з магнітоелектричним збудженням та приймача BE, встановленого на приладовій дошці стенду).

Навантажувальний генератор M3 увімкнений за схемою генератор-двигун з МПС НЗ M2. Остання приводиться до обертання практично зі сталою швидкістю за допомогою приводного АД двигуна M1 (асинхронного, трифазного з короткозамкненим ротором).

Перетворювач П, який складається з двигуна M1 і генератора M2, призначений для живлення постійним струмом навантажувального генератора M3. Паспортні дані цих машин наведені у таблиці 3.1.

Вмиканням кнопки SB1 (“Пуск”) подається напруга на стенд. Вимикачем QF3 напруга мережі подається на знижувальний трансформатор TV3, а потім на досліджувальний двигун через автотрансформатор TV4. Вимикач QF4 призначений для вмикання якірного кола генераторів M2, M3 на паралельну роботу. Обмотки збудження генераторів постійного струму M2, M3 живляться від мережі змінного струму через випрямлячі UZ1 та UZ2, при чому у колі збудження M2, M3 перед випрямлячем увімкнені автотрансформатори TV1, TV2, які дозволяють регулювати напругу збудження генераторів M2, M3 у широких межах. Перемикач SA4 призначений для зміни напрямку магнітного потоку генератора M2. Кола збудження генераторів M2, M3 вмикаються вимикачем QF2. Перетворювач П запускається вимикачем QF1.

3.4 Підготовка до роботи

Студент повинен завчасно підготуватися до лабораторної роботи. Для цього необхідно опрацювати теоретичний матеріал у відповідності до поставлених питань, вивчити порядок проведення роботи, зробити заготовку звіту.

Перед початком виконання лабораторної роботи студент подає викладачу заготовку звіту та відповідає на питання. Непідготовлений студент до виконання лабораторної роботи не допускається, та відпрацьовує її в установленому порядку.

3.5 Порядок проведення роботи

3.5.1 Перед початком роботи необхідно перевірити початкові положення елементів установки: перемикач SA1 повинен бути

встановлений у положення “І”, інші вимикачі відключені. Реостат R1 у колі збудження генератора M2 – уведений. Рукоятки автотрансформаторів TV1, TV2, TV4 встановлені у нульове положення. Пусковий реостат досліджувальної машини R2-виведений.

3.5.2 Включення стенду проводиться таким чином.

Вмиканням кнопки SB1 “Вкл” подається живлення на стенд. Для запуску ДМ необхідно увімкнути вимикач QF3. Автотрансформатором TV4 встановлюють напругу живлення двигуна U_{DM} до значення, вказаного викладачем $U_{DM}=(140\dots160)$ В.

Запускають привідний двигун M1 перетворювача П, увімкнувши автомат QF1. Двигун M1 залишається увімкненим до кінця усіх дослідів.

За допомогою вимикача QF2 вмикають обмотки збудження машин M2, M3. За допомогою автотрансформатора TV2 встановлюють струм збудження M3 $I_{3M3}=0.6$ А й протягом усієї роботи підтримують його сталим ($I_{3M3}=\text{const}$).

Автотрансформатором TV1 та реостатом R1 можна встановити напругу на затискачах генераторів M2, M3 однаковою (120÷140В).

Положення “І” перемикача SA4 узгоджує полярність напруг генераторів M2, M3, тому при досягненні рівності $U_1=U_2$ можна увімкнути вимикач QF4, який замикає якірні кола генераторів на паралельну роботу.

Після вмикання QF4 схема підготовлена до роботи.

Оскільки електромеханічна характеристика ДМ являє собою криву, яка проходить з меж генераторного режиму у межі двигуневого і в гальмівний (режим противімкнення), досліди для отримання названої характеристики краще починати з генераторного режиму, а тоді переходити відповідно у двигуневий і далі у гальмівний.

При виконанні дослідів слід звертати увагу на те, що у перехідних режимах (пуск, зміна струму збудження I_{BM3} і т.ін.), спостерігається динамічний момент $M=Jd\omega/dt$, який впливає на показання багатьох приладів схеми. Тому, перед тим, як зафіксувати ці показання, необхідно дочекатися встановленого режиму та відкорегувати величини I_{BM3} , U_{DM} .

3.5.3

Щоб асинхронний двигун працював як генератор паралельно з мережею, необхідно змусити його обертатися зі швидкістю, вищою за синхронну (для асинхронних двигунів з фазним ротором частота обертання не повинна перевищувати синхронну

більше, ніж на 20...30%). З паспортних даних випливає, що синхронна частота обертання ДМ складає 1000 об/хв.

Підвищуючи струм збудження I_{3M2} генератора М2, піднімають швидкість ДМ до максимально допустимого значення, а тоді, знижуючи її до синхронії, виконують 3–6 вимірювань; дані вимірювань та результати розрахунків зводять до таблиці 3.2. Окремо відмічають точку синхронної швидкості, для чого при зменшенні струму збудження I_{3M2} треба встановити частоту обертання 1000 об/хв. При цьому треба пам'ятати, що цей дослід і усі наступні необхідно виконувати при $I_{3M3} = \text{const}$ та $U_{DM} = \text{const}$.

Таблиця 3.2 – Результати вимірювань та результати розрахунків для визначення електромеханічних та механічних характеристик ДМ у різних режимах

Номер вимірів	Дані вимірювань				Розрахункові дані					Режим роботи
	$U_4 = U_{DM}$, В	I_4 , А	I_5 , А	n , об/хв	I_0 , А	ω , с ⁻¹	M_n , Н·м	I , А	M , Н·м	

3.5.4 При роботі досліджуваної машини у генераторному режимі машина М3 працювала як генератор, М2 – як двигун. При зниженні струму I_{3M2} швидкість машини М3, а разом з нею і швидкість досліджуваного двигуна ДМ зменшується. Перехід ДМ з генераторного режиму у двигуневий (а машини М3 навпаки, з двигуневого у генераторний) проходить через точку синхронної швидкості струм статора має найменше значення (I_{4min}) без будь-яких перемикань у схемі.

Подальше зменшення струму I_{3M2} буде відповідно призводити і до подальшого зменшення швидкості ДМ, яка працює вже у двигуневому режимі. Слід відзначити, що при переході від генераторного режиму ДМ до двигуневого через точку синхронної швидкості струм статора має найменше значення (I_{4min}).

Таким чином, переведення ДМ у двигуневий режим здійснюється тільки шляхом зменшення струму збудження генератору М2 I_{3M2} . У межах двигуневого режиму ДМ (зменшення швидкості від синхронної до нуля) слід виконати 6-8 вимірювань, дані вимірювань та результати розрахунків занести до таблиці 3.2.

Необхідно пам'ятати, що для визначення максимального

моменту у цьому режимі, потрібно ретельно знімати дані у районі критичної швидкості. Для цього половину усіх вимірювань виконують на одній чверті діапазону регулювання швидкості з боку генераторного режиму. Досягнення критичної швидкості треба зафіксувати показаннями приладів. На цій швидкості двигун ДМ працює нестійко і при цьому з'являється помітне коливання стрілки амперметра РА4 у колі статора ДМ.

Кінцевою точкою характеристики у двигуновому режимі ДМ буде точка з координатами $\{\omega=0; I_{3M2}\}$. При цьому автотрансформатор TV1 виведений. Може статися, що при повністю виведеному автотрансформаторі TV1 двигун ДМ не зупинився, тоді необхідно перемикач SA1 у колі генератора M2 перевести у положення "II" (при цьому змінюється напрямок струму збудження M2) і приступити до підвищення струму збудження I_{3M2} до повної зупинки двигуна.

3.5.5 У режимі гальмування противімкненням обмотка статора двигуна увімкнена на один напрямок обертання, ротор же під впливом зовнішнього моменту або сил інерції обертається у протилежний бік. У цьому досліді зовнішній протидіючий момент для ДМ утворюється навантажувальним генератором M3.

Цей дослід є продовженням попереднього. Якщо ж у кінці попереднього досліді ротор ДМ зупинився ще при увімкненому перемикачі SA1 (положення "I"), то для здійснення режиму гальмування противімкненням треба перемикач SA1 поставити у положення "II" і приступити до підвищення струму збудження I_{3M2} .

При збільшенні струму I_{3M2} (оберненої полярності порівняно зі струмом I_{3M2} у двигуновому режимі) ротор ДМ під дією машини M2 буде обертатися проти напрямку обертання поля статора зі зростаючою швидкістю, максимальна швидкість у зворотному напрямку також не повинна перевищувати синхронну більш, ніж на 25...30%. У межах режиму противімкнення (від нуля до названої швидкості) можна виконати 5–6 вимірювань, дані вимірювань та розрахункові дані занести до таблиці 3.2.

3.5.6 Усі описані досліді проводилися для визначення природних характеристик ($R_2=0$) при зниженій напрузі живлення. Реостатні характеристики ДМ знижуються при введенні у коло ротора додаткового опору (пускового реостату R_2). При проведенні досліді можна обмежитися тільки двигуновим режимом, для цього необхідно:

- а) перевести ДМ з режиму противімкнення у двигуновий режим

(знов зменшити струм I_{3M2} до нуля, автотрансформатор TV1 вивести. Знизивши таким чином швидкість системи до мінімуму, перевести перемикач SA1 у положення “Г”, перемкнути тумблер тахометра, ввести автотрансформатор TV1 і підвищити швидкість до синхронної);

б) за вказівками викладача встановити величину напруги живлення U_{DM} досліджуваного двигуна;

в) ввести реостат R2 у колі ротора ДМ, при цьому величина опору визначається викладачем;

г) у межах двигуневого режиму ДМ (зменшення швидкості від синхронії до нуля) виконати 5-6 вимірювань, (отримані данні та результати розрахунків занести до таблиці 3.2), значення R2 розміщується у графі таблиці “режим роботи”);

д) аналогічно двигуневому режиму при R2=0 ретельно зняти дані в межах критичної швидкості.

3.5.7 При розрахунку та побудові характеристик необхідно керуватися наступним: електромеханічні характеристики ДМ являють собою залежність:

$$\omega = f(I),$$

де ω – кутова швидкість двигуна, c^{-1} ;

I – струм статора двигуна при номінальній напрузі U_4 .

Для побудови цих характеристик необхідно частоту обертання, зафіксовану тахометром подавати у системі одиниць СІ:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60},$$

де n – частота обертання, об/хв.

Нехтуючи насиченням двигуна, можна вважати, що при заданому ковзанні (кутовій швидкості ротора) струм статора є пропорційним напрузі, тому

$$I = I_4 \cdot \frac{U_{DMном}}{U_{DM}},$$

де I – струм статора при номінальній напрузі ($U_{DMном}=380$ В), А;

I_4 – струм статора, отриманий у досліді при зниженій напрузі $U_{DMном} = U_4$, А.

Щоб побудувати механічні характеристики, необхідно розрахувати момент M на валу ДМ при номінальній напрузі живлення $U_{DMном}=380$ В. Момент двигуна фіксується струмом якоря навантажувального генератора МЗ в усталеному режимі.

Електромагнітний момент генератора МЗ, Нм:

$$M_{\text{ЕЛ}} = C_1 \cdot \Phi \cdot I_5,$$

де C_1 – коефіцієнт пропорційності, який залежить від струму збудження при таритуванні машини;

I_5 – струм якоря генератора МЗ, А;

C_1 визначається з дослідних даних, наведених у таблиці 3.3. Де коефіцієнт C_1 заданий для деяких значень струму збудження навантажувального генератора МЗ.

Таблиця 3.3 – Значення коефіцієнту C_1 навантажувального генератора

$I_{3M2}, \text{А}$	0,5	0,6	0,7
$C_1, \text{Нм/А}$	–	1,77	–

Момент $M_{\text{ДМ}}$ на валу досліджуваного двигуна ДМ дорівнює утворюваному генератором МЗ:

$$M_{\text{ДМ}} = M_{\text{ЕЛ1}} + M_n$$

де M_n – момент втрат, обумовлений механічними втратами і втратами у сталі навантажувального генератора МЗ, а також механічними втратами у ДМ, Нм.

Права частина цього рівняння являє собою алгебраїчну суму, тому у тих випадках, коли навантажувальний генератор МЗ працює у двигуновому режимі, він надолужує втрати у агрегаті. Це спостерігається при генераторному режимі досліджуваного двигуна ДМ і при його гальмуванні протіввімкненням:

$$|M_{\text{ДМ}}| = |M_{\text{ЕЛ1}}| - |M_n|.$$

При двигуновому режимі ДМ генератор МЗ працює у режимі генератора, отже втрати у агрегаті надолжуються самим досліджуванним двигуном ДМ, тому у даному випадку момент можна розрахувати за формулою:

$$|M_{\text{ДМ}}| = |M_{\text{ЕЛ1}}| + |M_n|.$$

Для знаходження M_n знімається так звана крива втрат:

$$\omega = f(I_0),$$

де I_0 – струм якоря генератора МЗ при вимкненому досліджуваному двигуні ДМ.

У таблиці 3.4 представлена залежність струму I_0 від швидкості.

Таблиця 3.4 – Залежність швидкості ω від струму якоря I_0 навантаувального генератора МЗ

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	10,5	31,4	42,0	52	63	84	105	126	147	768
$I_0, \text{А}$	0,35	0,5	0,63	0,7	0,72	0,75	0,8	0,9	0,93	0,98	1,0

Знаючи цю залежність, легко підрахувати момент втрат, Нм:

$$M_{\text{ел}} = C_1 \cdot \Phi \cdot I_5,$$

де C_1 визначають з таблиці 3.3 у відповідності до струму збудження $I_{3М2}$, Нм/А; струм I_0 – з таблиці 3.4 за швидкістю ω , яка береться з розрахункових даних таблиці 3.2.

Таким чином, розрахункова формула для визначення моменту $M_{\text{ДМ}}$ (Нм) на валу досліджуваного двигуна ДМ при пониженні напруги живлення, коли ДМ працює у двигуновому режимі:

$$M_{\text{ДМ}} = C_1(I_5 + I_0).$$

У генераторному режимі та режимі гальмування протипротивленню

$$M_{\text{ДМ}} = C_1(I_5 - I_0).$$

Момент, який розвивається асинхронним двигуном пропорційний квадрату підведеної напруги, тому для визначення моменту двигуна при зниженій напрузі необхідно виконати перерахунок моменту, виходячи з моменту при зниженій напрузі, Нм:

$$M = M_{\text{ДМ}} \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{ДМ}}} \right)^2,$$

де M – момент ДМ при номінальній напрузі $U_{\text{ДМНОМ}}=380 \text{ В}$;

$M_{\text{ДМ}}$ – момент ДМ при зниженій напрузі $U_{\text{ДМ}}$, яка береться з експериментальних даних (таблиця 3.2).

3.6 Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен вміщувати:

- схеми і таблиці з даними вимірювань та результатами розрахунків, короткий опис їх характерних особливостей;
- графіки електромеханічних характеристик;
- графіки механічних характеристик ;
- короткий аналіз та висновки з роботи;
- регулювальну характеристику при регулюванні з боку статора з розрахунком коефіцієнта “К”;

- навантажувальну характеристику з розрахунком коефіцієнту “S”;
- статичну модель АД з фазним ротором при регулюванні швидкості з боку статора;
- регульовальну характеристику з розрахунком коефіцієнта передачі “K” при регулюванні з боку ротора;
- статичну модель АД з фазним ротором при регулюванні швидкості з боку ротора;
- результати аналізу якості регулювання швидкості АД з фазним ротором при регулюванні з боку ротора і статора.

3.7 Контрольні запитання

3.7.1 Поясніть роботу установки в цілому та особливості роботи її окремих елементів.

3.7.2 Поясніть у відповідності до схеми, реалізацію кожного з режимів ДМ, визначених у роботі.

3.7.3 У чому суть електромеханічних та механічних характеристик, їх взаємозв'язок та відмінність.

3.7.4 Наведіть графіки природних та реостатних характеристик.

3.7.5 Заступна схема асинхронного двигуна.

3.7.6 Будова асинхронних двигунів з фазним та короткозамкненими роторами, принцип їх роботи.

3.7.7 Як розрахувати природну характеристику за даними каталогу.

3.7.8 Напишіть рівняння механічної характеристики асинхронного двигуна.

3.7.9 Знайдіть на механічній характеристиці її характерні точки, прокоментуйте їх.

3.7.10 Чому характеристики асинхронного двигуна знімалися при зниженій напрузі, а не при номінальній.

3.7.11 Чому у проведених дослідах необхідне виконання умов $I_{зм3} = \text{const}$ та $U_{дм} = \text{const}$.

3.7.12 У чому суть режиму гальмування противімкненням для асинхронних двигунів.

3.7.13 У чому особливості режиму рекуперативного гальмування для асинхронних двигунів.

3.7.14 Способи регулювання швидкості асинхронних двигунів, які можливі за умовами проведених дослідів.

3.7.15 Переваги та недоліки привода з асинхронним двигуном порівняно з приводом постійного струму.

3.7.16 Назвіть галузі застосування асинхронних двигунів.

3.7.17 Яким чином може бути знята регулівна характеристика АД?

3.7.18 Який вигляд мають навантажувальні статичні характеристики асинхронних двигунів при різних законах частотного регулювання.

3.7.19 У яких межах змінюється величина коефіцієнта передачі “К” для асинхронних к.з. двигунів й АД з фазним ротором при регулюванні швидкості з боку статора і ротора.

3.7.20 У яких межах змінюється величина коефіцієнта для асинхронних к.з. двигунів й АД з фазним ротором, [1,2,5,6].

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Дослідження нагрівання електродвигуна

Мета роботи - експериментальне дослідження процесу нагрівання й охолодження асинхронного двигуна, у тривалому режимі роботи, порівняння теоретичної й експериментальної залежності. Перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища від часу нагрівання й охолодження.

4.1 Основні теоретичні положення

Аналіз теплового стану електродвигунів – одна з найважливіших задач, що виникають при проектуванні або експлуатації будь-якої системи електричного привода. Електрична машина може нагріватися лише до температури, що не перевищує допустиму температуру її класу. Дотримання встановлених обмежень пов'язаних з навантажувальною здатністю, забезпечує нормативний термін служби електричної машини. Перевищення допустимих температур веде до передчасного руйнування ізоляції обмоток. Так, для ізоляції класу А перевищення припустимої температури нагрівання на $(8 - 10) ^\circ\text{C}$ скорочує термін служби ізоляції (і, отже, електричної машини в цілому) приблизно вдвічі.

Аналіз теплового стану електродвигуна дозволяє оцінити ступінь його завантаження за потужністю. Якщо нагрівання двигуна близьке до нормативного і не перевищує його, це свідчить про оптимальне використання встановленої потужності двигуна. У цьому випадку електропривод має найкращі техніко-економічні показники роботи, у першу чергу ККД і коефіцієнт потужності. Нагрівання двигуна нижче припустимого, говорить про недовантаження двигуна або про його завищену номінальну потужність у порівнянні з необхідною. Робота такого електропривода буде характеризуватися низькими енергетичними показниками.

Таким чином, оцінка теплового стану електродвигунів є важливою техніко-економічною задачею. При перетворенні електричної енергії в механічну (або навпаки) частина енергії втрачається в самому двигуні: на подолання опору обмоток протіканню електричного струму, на перемагнічування сталі і вихрові струми в сталі, на тертя в підшипниках і в щитковому апараті, на вентиляцію. Усі ці втрати енергії виділяються у вигляді теплоти.

Частина її віддається у навколишнє середовище, інша акумулюється в двигуни і викликає збільшення його нагрівання.

Точне дослідження процесів нагрівання й охолодження двигунів – складна задача. Двигун являє собою сукупність деталей і вузлів складної конфігурації, виконаних із різноманітних матеріалів, що обумовлює їхню різноманітну теплоємність і теплопередачу. Неоднаковими є умови нагрівання окремих частин двигуна, а напрямок теплових потоків залежить від режиму роботи двигуна. Так, при неробочому ході, споживаний двигуном струм невеликий, і нагрівання обмоток буде менше, ніж нагрівання сталі, у навантаженому стані більше нагріваються обмотки і тепловий потік від сталі до обмоток змінює свій напрямок на протилежний. Тому дослідження теплових процесів у теорії електропривода проводиться з такими припущеннями: двигун розглядається як однорідне тіло, що має нескінченно велику теплопровідність і однакову температуру в усіх своїх точках; тепловіддача в зовнішнє середовище пропорційна першому ступеню різниці температур двигуна і навколишнього середовища; навколишнє середовище має нескінченно велику теплоємність, тобто в процесі нагрівання двигуна її температура не змінюється; його коефіцієнт тепловіддачі не залежить від температури двигуна.

Рівняння теплового балансу двигуна при постійному навантаженні

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau \quad (4.1)$$

де P – потужність втрат у двигуні, Вт; t – час, с;

A – тепловіддача двигуна, тобто кількість тепла, що віддається двигуном у навколишнє середовище за одиницю часу при різниці температур 1°C ;

τ – перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$;

C – теплоємність двигуна, тобто кількість тепла, яке необхідне для підвищення температури двигуна на 1°C .

Для двигунів нормується перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища 35°C (для помірно холодної кліматичної зони), що відповідає номінальній потужності двигуна.

Рішення рівняння (4.1) щодо T при заданих допущеннях має вигляд:

$$\tau = \tau_{уст} \cdot (1 - e^{-t/T_H}) + \tau_{поч} e^{-t/T_H}, \quad (4.2)$$

де $\tau_{уст}$, $\tau_{поч}$ усталене і початкове значення перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища, °C, відповідно;

$T_H = C/A$ - стала часу нагрівання двигуна, с.

При $\tau_{поч} = 0$ рівняння (4.2) приймає вигляд:

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T_H}). \quad (4.3)$$

Для процесу охолодження при відімкненому двигуні рівняння (4.2) запишеться у вигляді:

$$\tau = \tau_{поч} \cdot e^{-t/T_{охол}}, \quad (4.4)$$

де $T_{охол}$ - стала часу охолодження, с.

Рівняння (4.2)-(4.4) показують, що при прийнятих припущеннях процеси нагрівання й охолодження двигуна протікають за експоненційними законами до усталеної температури, при якій настає теплова рівновага, тобто вся теплота, що виділяється в двигуні, віддається у навколишнє середовище і, отже, температура двигуна не змінюється. Цю умову можна записати у вигляді рівняння:

$$\Delta P dt = A \tau_{уст} dt \quad (4.5)$$

звідки:

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A}.$$

Значення $\tau_{уст}$ можна визначити за експериментальною кривою нагрівання, використовуючи метод трьох точок, що базуються на властивості експоненти, яка полягає в тому, що збільшення температури за рівні проміжки часу пропорційні відстані точок на кривій нагрівання від лінії усталеної температури $\tau_{уст}$. Якщо позначити перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища в моменти t_1 , t_2 , t_3 (при умові, що $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$) як τ_1 , τ_2 , τ_3 відповідно,

$$\Delta \tau_1 = \tau_2 - \tau_1;$$

$$\Delta \tau_2 = \tau_3 - \tau_2;$$

і можна записати пропорцію:

$$\frac{\tau_{уст} - \tau_1}{\tau_{уст} - \tau_2} = \frac{\Delta \tau_1}{\Delta \tau_2}. \quad (4.6)$$

Вирішуючи рівняння (4.6) щодо $\tau_{уст}$ одержимо розрахункову формулу для обчислення $\tau_{уст}$ по зазначеним трьом точкам:

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta\tau_1\tau_2 - \Delta\tau_2\tau_1}{\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2}. \quad (4.7)$$

Сталу часу T_H нагрівання визначають із тієї умови, що при $t \approx 3T_H$, $\tau = 0,95 \tau_{уст}$. Для економії часу запозичують тільки частину кривої нагрівання і визначають за тими самими трьома точками

$$T_H = \frac{\Delta t}{\ln(\Delta\tau_1 / \Delta\tau_2)}. \quad (4.8)$$

Сталу часу охолодження $T_{охол}$ визначають за (4.8), використовуючи метод трьох точок експериментальної кривої охолодження. Помітний вплив на точність експерименту робить метод виміру температури. Звичайно використовують термопари, закладені в різноманітних частинах двигуна, проте при цьому треба мати на увазі, що неможливий прямий контакт термопари з дротом обмотки, а електрична ізоляція є одночасно і тепловою ізоляцією. Це призводить до того, що температура в обмотці росте спочатку швидше, ніж за теоретичною кривою, і лише при $t \geq 0,5T_H$ дійсна крива наближається до експоненціальної.

Більш точно виміряти температуру в обмотці можна за методом опору, проте для цього необхідно на час вимірів відмикати двигун від мережі, що порушує встановлений режим його роботи. Тому звичайно обмежуються двома контрольними вимірами опору обмотки в холодному й нагрітому стані двигуна. Одержане рівняння, що пов'язує опір і температуру в обмотці:

$$R_{to} = R_{nc}(1 - \alpha_0 t_2^o), \quad (4.9)$$

де $\alpha_0 = 1/234$ – температурний коефіцієнт опору, $1/^\circ\text{C}$;

R_{to} , R_{nc} – опір обмотки при температурі відповідно $t_2^o = 0^\circ$, Ом.

Якщо відомий опір R_1 при температурі навколишнього середовища t_{nc}^o то опір R_2 при t_2^o визначиться за формулою:

$$R_2 = R_1 \frac{1 + \alpha_0 t_2^o}{1 + \alpha_0 t_{nc}^o} \quad (4.10)$$

Обчислюючи рівняння (4.10) відносно t_2^o , одержимо розрахункову формулу для обчислення температури обмотки двигуна по зміні її опору:

$$t_2^{\circ} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \left(\frac{1}{\alpha_0} + t_{nc}^{\circ} \right) + t_{nc}^{\circ}. \quad (4.11)$$

Для обчислення перевищення температури отримуємо вираз:

$$\tau = t_2^{\circ} - t_{nc}^{\circ} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \left(\frac{1}{\alpha_0} + t_{nc}^{\circ} \right). \quad (4.12)$$

Швидкість наростання температури залежить від показника ступеня експоненти. Відношення теплоємності до тепловіддачі має одиницю часу і називається постійною часу нагрівання, із:

$$T = \frac{C}{A}. \quad (4.13)$$

Якщо при пуску машина мала початкову температуру, рівну температурі навколишнього середовища ($\tau_{поч}=0$), рівняння (4.2) скоротиться:

$$\tau = \tau_{ycm} (1 - e^{-t/T_n}). \quad (4.14)$$

Графік функції (4.14) зображений на рисунку 4.1. З нього легко усвідомити фізичний зміст сталої часу нагрівання T .

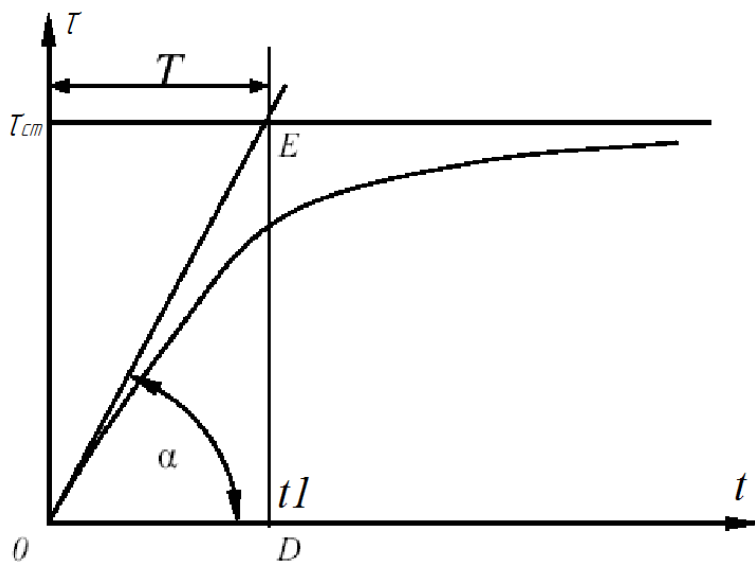


Рисунок 4.1 – Графік функції

Для цього проведемо дотичну до кривої у точці відповідному початку координат. Будь-яка дотична до кривої характеризує швидкість розглядаємого процесу. Розглянемо трикутник ODE, з цього трикутника випливає, що

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{ED}{OD} = \frac{\tau_{ycm}}{t_1} \quad (4.15)$$

З іншого боку:

$$\operatorname{tg} \alpha = \left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t \rightarrow 0} \quad (4.16)$$

З рівняння (4.14) випливає, що похідна від температури за часом буде дорівнювати

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_{ycm}}{T} e^{-t/T_n} \quad (4.17)$$

Якщо процес розглядати при $t \rightarrow 0$, рівняння (4.16) запишеться

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_{ycm}}{T_n} \quad (4.18)$$

З порівняння (4.15), (4.16) і (4.18) випливає, $t_1 = T_n$, тобто проекція дотичної на вісь абсцис чисельно дорівнює сталій часу нагрівання T . Вона визначається як час, протягом якого машина з ідеальною ізоляцією (без теплопередачі) нагрівається до такої температури, до якої б вона нагрілася у звичайних умовах за необмежений час. Для практичних розрахунків тривалість нагрівання t приймають $t = (3 - 5)T_n$.

Як випливає з (4.14) вже при $t = 3T$ машина практично нагрівається до сталої температури:

$$\begin{aligned} \text{при } t = 3T_n \quad \tau &= 0,93\tau_y, \\ \text{при } t = 5T_n \quad \tau &= 0,99\tau_y. \end{aligned} \quad (4.19)$$

На випробуваннях, за усталену температуру приймають таку температуру, що протягом часу роботи машини нагріє останню не більш, ніж на 1°C .

Визначення сталої температури нагрівання обмотки статора асинхронного двигуна в лабораторних умовах. Для цього необхідно зняти й побудувати частину кривої сталої нагрівання $\tau = f(t)$ обмотки статора. Крива нагрівання знімається при сталому навантаженні на валі двигуна протягом 40-60 хвилин. Побудована крива нагрівання для названого проміжку часу зображена на рисунку 4.2.

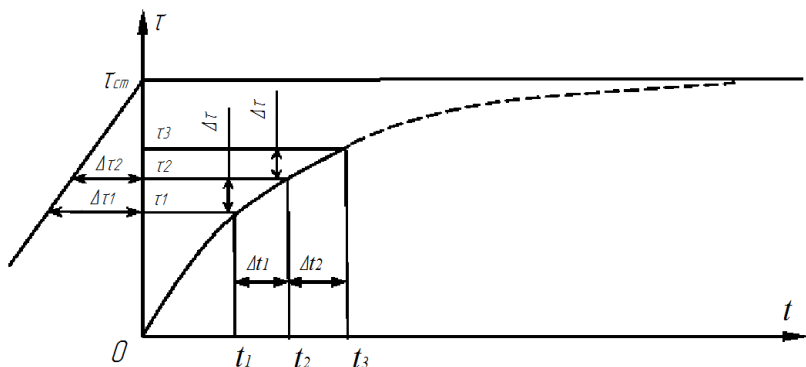


Рисунок 4.2

Вибрати на осі абсцис, наприклад, три точки t_1 , t_2 і t_3 , що відповідають однаковим проміжкам часу:

$$\Delta t_1 = t_2 - t_1, \quad (4.20)$$

$$\Delta t_2 = t_3 - t_2.$$

На осі ординат знайти відповідні їм точки температур τ_1 , τ_2 і τ_3 за якими визначаються:

$$\Delta \tau_1 = \tau_2 - \tau_1, \quad (4.21)$$

$$\Delta \tau_2 = \tau_3 - \tau_2.$$

З точок τ_1 і τ_2 ліворуч відкласти абсциси, рівні ординатам відповідно $\Delta \tau_1$ і $\Delta \tau_2$.

Кінці цих відрізків з'єднати прямою і продовжити до перетину з віссю ординат. Точка перетину τ_{y1} визначає значення сталої температури обмотки. З метою більш точного знаходження $\tau_{уст}$ повторити побудову 2-3 рази. Для цього на тому ж графіку (рисунок 4.2) вибрати нові точки на осі абсцис, що відповідають іншим проміжкам часу. Повторюючи побудову, знайти сталу температуру τ_{y2} . Ще раз повторюючи побудову для третього варіанта обраних проміжків часу на осі абсцис, знайти сталу температуру τ_{y3} .

$$\tau_{уст} = \frac{\tau_{y1} + \tau_{y2} + \tau_{y3}}{3}. \quad (4.22)$$

Визначення постійної часу нагрівання обмотки статора. Для цього можна скористатися одним із трьох методів.

Метод трьох точок. Підставивши в рівняння (4.14) абсциси трьох точок, що відповідають однаковим проміжкам часу (рисунок 4.2), вирішити його щодо постійної часу T :

$$T = \frac{\Delta t}{23 \ln \frac{\Delta \tau_1}{\Delta \tau_2}} . \quad (4.23)$$

При розрахунку одиниці розмірів повинні відповідати використаним при побудові графіка 4.2. Позначення трьох точок абсциси повинні бути обрані таким чином, щоб відповідали до розрахункової формули $\Delta \tau_1$ $\Delta \tau_2$.

Повторивши розрахунок для трьох різноманітних ділянок, знайти середній розмір T .

Метод дотичних. На графіку частини кривої нагрівання (побудованої аналогічно випадку знаходження сталої температури) провести три дотичні до перетину з лінією, що відповідає знайденій середній сталій температурі $\tau_{у\text{сер}}$ (рисунок 4.3). Визначивши графічно сталої часу нагрівання для кожної із дотичних T_1 , T_2 , і T_3 , , знайти середнє значення сталої часу нагрівання

$$T = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} . \quad (4.24)$$

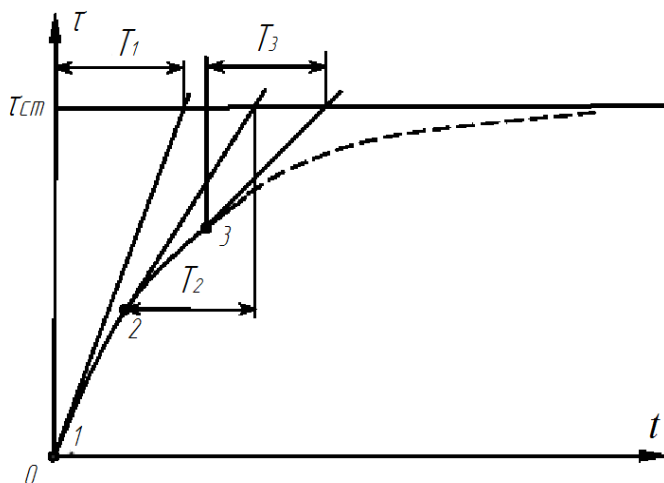


Рисунок 4.3

Графічний метод. Підставити в рівняння (4.14) відповідно значення часу нагріву $t_1=T$, $t_2=2T$; $t_3=3T$ і т.д. Одержати перевищення температури нагрівання (над температурою середовище) відповідно $\tau=0,63 \tau_y$; $0,85 \tau_y$; $0,95 \tau_y$; і т.д. аналогічно випадку знаходження усталеної температури) по осі ординат частки від середньої сталої $\tau_{усер}$ ($0,63 \tau_{усер}$; $0,85 \tau_{усер}$; $0,95 \tau_{усер}$).

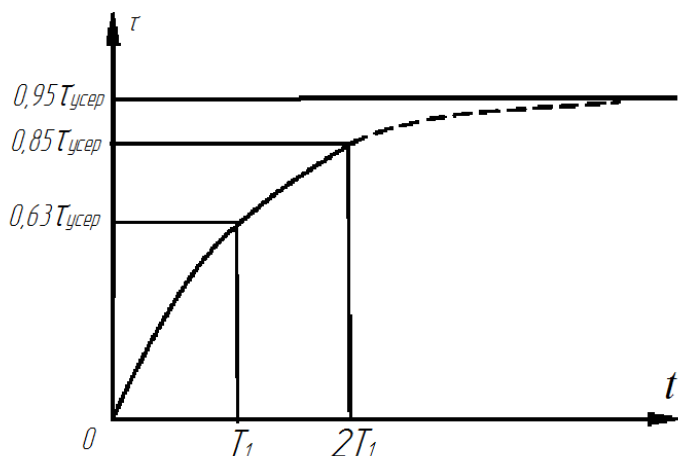


Рисунок 4.4

Знайти на осі абсцис відповідний час нагрівання T_1 , $2T_1$, $3T_1$ (рисунок 4.4). По отриманим значенням часу нагрівання визначити середній розмір сталої часу нагрівання. Наприклад, відкласти на осі ординат значення $0,63 \tau_{усер}$ і $0,85 \tau_{усер}$. За цими значеннями на осі абсцис знайти відповідний час нагрівання T_1 і $2T_1$. Визначити сталу часу нагрівання

$$T = \frac{T_1 + \frac{2T_2}{2}}{3} \quad (4.25)$$

На точність отриманих результатів істотно впливають методи виміру температури. Вимір температури активної сталі двигуна за допомогою термопар дає цілком задовільні результати. Проте температуру обмоток за допомогою термопар можна визначити тільки приблизно, тому що неможливий безпосередній контакт термопар з д्रोном. Тут бажано мати непрямі методи, наприклад, метод

вимірювання омичного опору.

Відомо, що опір провідника при нагріванні збільшується відповідно за цим рівнянням:

$$R_{t_2} = R_{t_1} \cdot (1 + \alpha_T \cdot t) \quad (4.26)$$

де R_{t_2} – опір обмотки наприкінці дослідів, тобто при температурі обмотки t_2 ;

R_{t_1} – опір обмотки на початку дослідів, тобто при температурі обмотки t_1 ;

t – збільшення температури нагріву обмотки за час дослідів $t = t_2 - t_1$;

α_T – коефіцієнт, що залежить від матеріалу обмотки, наприклад, для міді $\alpha_T = 1/234,5$, а для алюмінію $\alpha_T = 1/245$.

Рівняння (4.25) можна розрахувати відносно температури обмотки наприкінці дослідів t_2 або як перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{R_{t_1}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_T} + t_1 \right), \quad (4.28)$$

$$t_2 = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{R_{t_1}} \cdot \frac{1 + \alpha_T t_1}{\alpha_T}. \quad (4.27)$$

4.2 Програма роботи

4.2.1 Вивчити основні положення теорії нагрівання двигуна, підготувати звіт за паспортними даними електричних машин, із схемою установки, таблицею.

4.2.2 Ознайомитися з лабораторною установкою.

4.2.3 Провести експеримент, записати результати вимірювання.

4.2.4 Побудувати експериментальну залежність $\tau = f(t)$ за середніми значеннями термопар.

4.2.5 Розрахувати перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища у нагрітому стані за результатами вимірювання опору у обмотці. Задати отримане значення у графік. Побудувати графік за одержаними значеннями.

4.2.6 Розрахувати сталі значення перевищення температури і задати його у графіку $\tau = f(t)$.

4.2.7 Визначити постійні часу нагрівання T_n і охолодження $T_{охол.}$

4.2.8 Розрахувати і задати у графік $\tau = f(t)$ теоретичні залежності нагрівання й охолодження, порівняти їх з експериментальними,

зробити висновки роботи.

4.3 Опис лабораторної установки

Схема установки зображена на рисунку 4.5, а також на панелі стенда. Досліджуваний об'єкт – асинхронний двигун $M1$ з короткозамкненим ротором, навантажений генератором постійного струму $M2$. Навантаження генератора виконує опір R_H . Обмотка порушення генератора живиться від випрямляча $UZ1$ через регулювальний реостат $R4$. Номінальні параметри асинхронного двигуна:

Таблиця 4.1 – Паспортні дані двигуна

№	Позначення	Одиниці	Номінальні дані
1	P_H	кВт	1,1
2	U_H	В	380
3	I_{1H}	А	2,8
4	$2p$	-	6
5	η	-	0,77
6	$\cos \varphi$	-	0,78

Схема з'єднання - Y .

Номінальні параметри генератора:

Таблиця 4.2 – Паспортні дані генератора

№	Позначення	Одиниці	Номінальні дані
1	P_H	кВт	1
2	U_H	В	110
3	I_a	А	11,7
4	n	об/хв	1000
5	η	-	0,78

Випробуваний двигун підключений до мережі $\sim 380V$ через автоматичний вимикач $QF1$ і контакти $KM2.3$ лінійного контактора $KM2$.

У схемі передбачено два способи виміру температури двигуна: за термопарою і виміру опору в обмотці статора постійного струму. Чотири термопари, підімкнені до мікропроцесорної системи вимірювання, розташовані так: №1 - в пазу ротора, №2 - в обмотці, №3 - у ярмі, №4 - на корпусі двигуна. Термоелектрорушійна сила термопар вимірюється встановленим на схемі приладом PS1. Для вимірювання опору на стенді є незалежне джерело постійної напруги $U = 15 \text{ В}$, що можна підімкнути до обмотки статора за допомогою кнопки SB5 «В» (вимір). Для запобігання одночасної подачі на обмотки статора змінної і постійної напруги передбачене взаємне блокування кнопок SB5 і SB6 "П" (пуск). Кнопка SB7 "С" (стоп) відмикає двигун.

4.4 Порядок проведення роботи

4.4.1 Одержати дозвіл викладача на проведення досліду.

4.4.2 Виміряти опір обмотки двигуна в холодному стані. Для цього увімкнути стенд натисканням кнопки SB1 ("Вімк"), увімкнути - S2 і QF1. Перемикач S5 поставити в положення "Длит.", потім, натискаючи кнопку SB5 ("П"), увімкнути контактор KM3 і записати показання приладів PA1, PV1 при двох різних значеннях струму, змінюючи його реостатом R3.

4.4.3 Запустити випробуваний двигун, для чого кнопкою SB6 ("П") увімкнути контактор KM2.

4.4.4 Увімкнути автомат Q F2. Змінюючи струм збудження генератора реостатом R4, встановити за ватметром PW1 навантаження 360 Вт.

4.4.5 Виміряти опір обмотки в нагрітому стані аналогічно проведеному в холодному стані. Виміри по термопарах продовжувати до $t = 60$ хвилин.

У момент $t_1 = 40$ хвилин після зняття показників термопар вимкнути двигун кнопкою SB7 ("С"), вимкнути автомати QF1 і QF2.

4.4.6 По закінченню роботи перемикач S1 перевести в нижнє положення, зняти живлення зі стенду натисканням кнопки SB2 ("Вимкн").

Таблиця 4.3 – Результати вимірювання і розрахунків

Час	Результати вимірювання								Результати розрахунків			
	W, Вт	T _{oc} , C	U ₁ , В	I ₁ А	Термопар				τ _{сер} , C	R _{обм} , З	τ _{обм} , З	τ _{теор} , C°
					1	2	3	4				
					C°							
0												
5												
10												
15												
20												
30												
40												
50												
60												

4.4.7 Вказівки по проведенню розрахунків:

– середнє значення показників термопар для побудови графіка $\tau=f(t)$ визначається як середнє арифметичне для кожного моменту часу, зазначеного в табл. 4.1;

– перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища визначити за формулою (4.12);

– сталі значення перевищення температури $\tau_{\text{уст}}$ визначити за формулою (4.7);

– постійну часу T_n розрахувати за формулою (4.8) для моментів часу 20, 30, 40 хвилин, $T_{\text{охол}}$ - для 40, 50, 60 хвилин;

– теоретичні залежності розрахувати за формулами (4.2) або (4.3) і (4.4).

4.5 Зміст звіту

Звіт повинен мати схему установки, паспортні дані електричних машин, таблицю з експериментальними даними і результатами розрахунків, а також графік залежності $\tau=f(t)$, побудований за результатами експерименту і розрахунків, висновки по роботі.

4.6 Контрольні запитання

4.6.1 Який фізичний сенс має постійна часу нагрівання і від чого залежить її значення?

4.6.2 Чи відрізняються постійні часу нагрівання й охолодження? Чим це викликано?

4.6.3 Як записується рівняння теплового балансу?

4.6.4 Коли температура двигуна стає сталою і від чого залежить її значення?

4.6.5 Що таке теплоємність?

4.6.6 Як обчислити температуру за зміною опору обмотки?

4.6.7 У якій послідовності варто увімкнути установку?

4.6.8 Зазначте призначення всіх елементів схеми установки.

4.6.9 Що більше нагрівається при неробочому ході і в робочому режимі, сталь чи обмотка статора?

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко В.І., Крисан Ю.О. Основи електропривода: навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. 402 с.
2. Попович М.Г., Лозинський О.Ю. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб. Київ: Либідь, 2005. 680 с.
3. Колб Ант.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: навч. посіб./ Нац. гірн. ун-т. 2-ге вид., переробл. і допов. Дніпро: НГУ, 2011. 540 с.
4. Кажан В. Є. Теорія електропривода. Частотне регулювання, структури та енергетика електроприводів. Ч.3: навч. посіб. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 87 с.
5. Булгар В. В. Теорія електроприводу. Збірник задач: навч. посіб. Одеса: Поліграф, 2006. 408 с.
6. Загірняк, М.В., Клепіков, В.Б., Ковбаса, С.М., Михальський, В.М., Пересада, С.М., Садовой, О.В., Шаповал, І.А. Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Монографія. – НАН України, 2018, 254 с. ISBN 978-966-02-8403-6..
7. Метельський В. П. Електричні машини: навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2000. 832 с.
8. Електропривід і автоматизація: конспект лекцій / уклад.: О. А. Авдєєва, О. С. Садовий. Миколаїв: МНАУ, 2019. 97 с.
9. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб. / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В.Б. Клепіков та ін. Київ: Либідь, 2005. Ч. 1. 397 с.; Ч. 2. 680 с.
10. Крисан Ю.О., Залужний М. Ю. Універсальний стенд дистанційного керування і контролю параметрів електропривода MICROMASTER 440. «Електротехніка та електроенергетика». 2011. № 1. С. 56–59.
11. Крисан Ю.О. Модернізація лабораторного стенда дослідження асинхронного електропривода. «Електротехніка та електроенергетика». 2014. № 1. С. 49–54.
12. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Автоматизований електропривод» для студентів спеціальності G3 всіх форм навчання. Ч. 2 / уклад.: Ю.О. Крисан, Є.В. Васильєва. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. 86 с.
13. Schneider Electric: офіційний сайт. URL: <https://www.se.com>