

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Український державний університет  
науки і технологій**

---

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

*В авторській редакції*

## **ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

Навчально-методичні рекомендації  
до виконання лабораторних робіт

Частина 2

*Електронне видання*

ДНІПРО  
2025

УДК 62-83 (076.5)  
Т 33

Упорядники:  
*Дмитро Володимирович Устименко*  
*Олексій Юрійович Балійчук*

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми G3.1.05  
«Інтелектуальні системи електропостачання та електромехатронні комплекси»

Протокол №8 від 30.06.2025 р.

**Т 33** Теорія електропривода: навчально- методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт. Частина 2 / упоряд. Д. В. Устименко, О. Ю. Балійчук; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро: УДУНТ, 2025. – 33 с.

Навчально-методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт. Частина 2.

Навчально-методичні рекомендації містять теоретичні положення та практичні рекомендації по дослідженню різноманітних систем електропривода в умовах лабораторій кафедри «Електротехніка та електромеханіка» університету.

Іл. 12. Табл. 2. Бібліогр. 2.

© Устименко Д. В. та ін., укладання, 2025

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА .....	4
Лабораторна робота 7-ЕП. ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА СТЕНДІ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ .....	5
Лабораторна робота 8-ЕП. РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ ТА НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ .....	8
Лабораторна робота 9-ЕП. ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗОВИМ РОТОРОМ У ГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ .....	12
Лабораторна робота 10-ЕП. ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	21
Лабораторна робота 11-ЕП. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА В РЕЖИМАХ S1, S2 І S3 .....	25
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК .....	32

## ПЕРЕДМОВА

Метою видання є методичне забезпечення лабораторних занять з навчальної дисципліни «Теорія електроприводу» і полягає в наданні студентам чітких інструкцій та рекомендацій для правильного виконання лабораторних робіт, а також допомогти викладачам у проведенні занять. Це дозволяє забезпечити стандартизацію процесу навчання, покращити засвоєння матеріалу та забезпечити ефективне використання обладнання та ресурсів.

Видання у відповідності до робочої програми навчальної дисципліни «Теорія електроприводу» сприяє забезпеченню наступних очікуваних результатів навчання:

– ОРН3. Застосовувати знання технічних характеристик, конструкційних особливостей, призначення і правил експлуатації устаткування та обладнання для вирішення технічних задач спеціальності;

– ОРН4. Застосувати математичні та статистичні методи при зборі, систематизації, узагальненні та обробці технічної інформації про роботу електромеханічної системи;

– ОРН5. На основі аналізу режимів роботи та характеру навантаження електроприводу визначати причини несправностей вузлів електроприводу робочого механізму.

Видання містить теоретичний і практичний матеріал, порядок проведення лабораторних робіт, схеми установок, засоби самоконтролю.

## Лабораторна робота 7-ЕП

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА СТЕНДІ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

**Мета роботи:** Дослідити особливості визначення ККД та зняття даних на стенді взаємного навантаження для побудови механічних характеристик.

#### Теоретичні положення

Стенд взаємного навантаження складається з двох однакових машин, що з'єднані між собою механічно та електрично (рис. 1). Для двигуна постійного струму незалежного збудження (ДПС НЗ) встановити частоту обертання 1150...1200 об/хв, після чого частота обертання не регулюється, опір резистора  $R_{p,д}$  залишається незмінним.

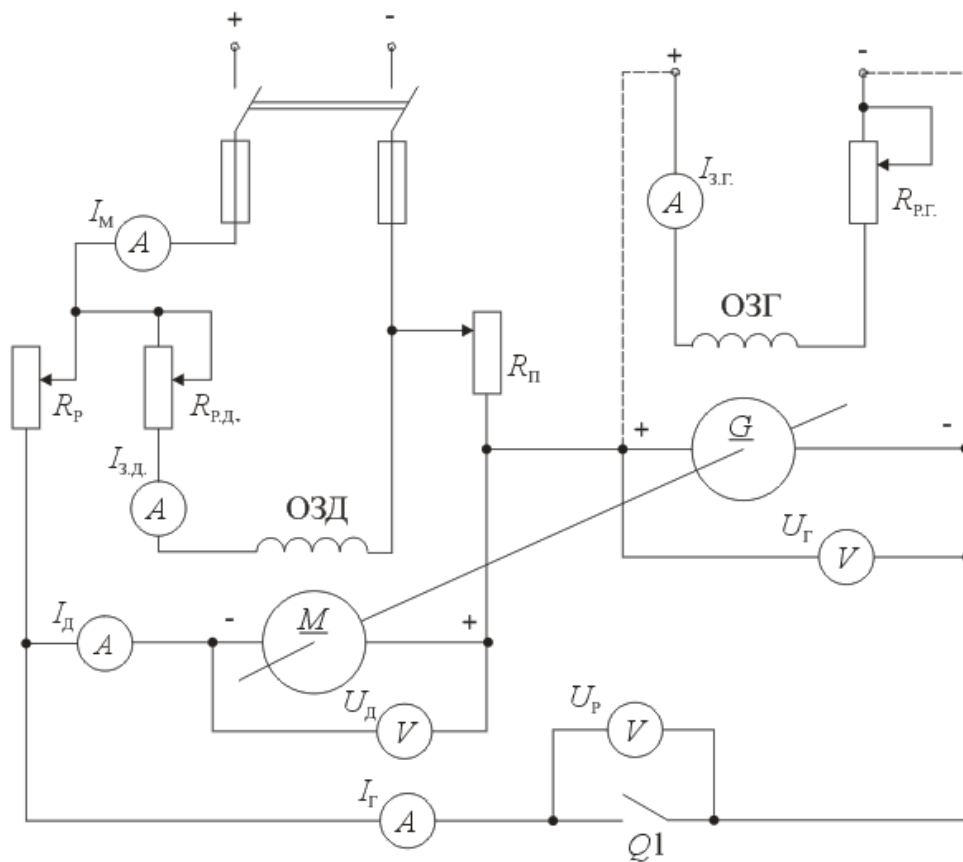


Рис. 1

Генератор, який з'єднаний з двигуном, в ауд. 125 повинен мати незалежне збудження від мережі напругою 220 В, у його коло увімкнено регульований резистор  $R_{p,г}$ . В ауд. 2304 генератор може мати самозбудження, така схема показана на рис. 1 пунктиром.

Генератор вмикається на паралельну роботу з мережею рубильником  $Q1$ , паралельно якому увімкнено вольтметр, який вимірює напругу  $U_0$ . Дякуючи такому ввімкненню даний спосіб випробування є дуже економічним.

Напруга на виводах агрегату повинна бути меншою від номінального її значення на величину спаду напруги у колі якоря і щітковому контакті ( $U_{щ}=2$  В). До початку випробувань двигуна, він повинен бути навантаженим на стенді та прогрітий, після чого стенд потрібно зупинити. Регулювальний реостат  $R_p$  у колі двигуна потрібний для підтримання постійного значення напруги на виводах агрегату, яке розраховується задалегідь за формулою:

$$U_{д}=U_{Г}=U_{ном}-(I_{ном}R_{я}+\Delta U_{щ}). \quad (1)$$

### Програма та порядок виконання роботи

1. Виміряти опір  $R_{я}$  обмотки кола якоря двигуна.
2. Запустити стенд взаємного навантаження, використовуючи пусковий реостат  $R_{п}$ . Регулюючи резистор  $R_{р.д.}$ , встановити потрібну частоту обертання. Рубильник Q1 при цьому повинен бути в розімкненому положенні, а реостат  $R_{р.г.}$  повинен знаходитись у положенні «тах».
3. Зменшуючи опір реостата  $R_{р.г.}$ , довести напругу генератора  $U_{Г}$  до значення напруги двигуна  $U_{д}$  і коли показання вольтметра  $U_{р}$  будуть дорівнювати нулю  $U_0=0$  замкнути рубильник Q1 – генератор перейде в режим роботи паралельно з мережею.
4. Продовжуючи зменшувати опір  $R_{р.г.}$  та збільшувати струм  $I_{з.г.}$ , можна спостерігати, що при цьому будуть збільшуватись струми генератора  $I_{Г}$  та двигуна  $I_{д}$ , що свідчить про навантаження агрегату. Продовжуючи поступово збільшувати струм  $I_{з.г.}$  установити струми  $I_{д}$  і  $I_{Г}$  такими, щоб

$$\frac{(I_{я}+I_{Г})}{2}=I_{д.ном}. \quad (2)$$

5. Змінюючи струм збудження генератора  $I_{з.г.}$ , установити

$$\frac{(I_{д}+I_{Г})}{2}=(1,25; 1,0; 0,75; 0,5) \cdot I_{д.ном} \quad (3)$$

та заповнити табл. 1.

Таблиця 1

№ виміру	Дані вимірів							
	$\frac{(I_{д}+I_{Г})}{2}$	$I_{з.д.}$	$I_{з.г.}$	$I_{М}$	$I_{Г}$	$I_{д}$	$U_{д}$	$n$
	А	А	А	А	А	А	В	об/хв

Розрахункові величини									
$P_{2Г}$	$P_{1д}$	$P_M$	$I_M + I_Г$	$P_{з.г.}$	$\eta_A$	$\eta_д$	$\omega$	$P_{2д}$	$M$
Вт	Вт	Вт	А	Вт	–	–	с <sup>-1</sup>	Вт	Н·м

6. Визначити розрахункові величини табл. 1:

- корисна потужність генератора

$$P_{2Г} = U_Г I_Г = U_д I_Г;$$

- потужність, що споживається двигуном

$$P_{1д} = U_д (I_д + I_{з.д.});$$

- потужність збудження генератора

$$P_{з.г.} = 220 I_{з.г.};$$

- потужність, що споживається з мережі

$$P_M = 110 I_M;$$

- ККД агрегату без врахування потужності  $P_{з.г.}$

$$\eta_A = \frac{P_{2Г}}{P_{1д}}, \quad \eta_A = \frac{I_Г}{I_M + I_Г};$$

Оскільки струм  $I_д + I_{з.д.} = I_M + I_Г$ , то струм  $I_{з.д.}$  залишається незмінним на весь час випробувань.

- так як машини агрегату ідентичні, можна вважати, що їх ККД однакові, тобто  $\eta_д = \eta_Г = \eta$ , отже  $\eta_A = \eta^2$  і ККД двигуна

$$\eta_д = \sqrt{\eta_A} = \sqrt{\frac{I_Г}{I_M + I_Г}};$$

- кутова швидкість  $\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}$ ;

- корисна потужність двигуна  $P_{2д} = P_{1д} \eta$ ;

- момент, що розвиває двигун  $M = 9,55 \frac{P_{2д}}{n}$ .

За розрахунковими даними побудувати:

- механічну характеристику  $\omega = f(M)$ ;

- залежність  $\eta = f\left(\frac{I_D + I_\Gamma}{2}\right)$ ;
- залежність  $\eta = f(I_D)$ ;
- залежність  $P_M = f(P_{1D})$ ;
- визначити значення  $\left(\frac{P_M}{P_{1D}}\right) \cdot 100$  при  $\frac{(I_D + I_\Gamma)}{2} = I_{D,ном}$ .

Зробити висновки про енергетичну сторону даного методу випробувань.

### Контрольні запитання

1. Наведіть основні енергетичні показники електропривода.
2. Чим характеризується економічність роботи електропривода?
3. Яке основне призначення стенду взаємного навантаження?
4. З яких основних елементів складається стенд взаємного навантаження і яке їх призначення?
5. Принцип роботи стенду взаємного навантаження, енергообмін між машинами.
6. Як визначаються механічні та електричні втрати у машинах, що працюють у режимі взаємного навантаження?
7. Поясніть, що відбувається з енергією, яку споживає стенд із мережі.
8. Як впливає механічне з'єднання машин на їхні електричні характеристики?

### Лабораторна робота 8-ЕП

#### РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗМІНОЮ ЧАСТОТИ ТА НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ

**Мета роботи:** Дослідити механічні характеристики асинхронної машини у разі регулювання її координат зміною частоти та напруги живлення.

#### Теоретичні положення

Частотне регулювання асинхронного двигуна реалізується у відповідності з законом М. П. Костенко [1, 2]:

$$\frac{U_1}{U_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \sqrt{\frac{M}{M_{ном}}} \quad (1)$$

у разі виконання якого залишаються незмінними значення ККД,  $\cos\varphi$  та  $K_M = M_{max}/M_{ном}$ . Замість напруги, особливо, за малих частот  $f_1$ , слід використовувати ЕРС  $E_1$ , але у даній лабораторній роботі частота не досягає занадто малих значень, тому рівняння (1) залишається дійсним для усього діапазону регулювання.

Потрібно пам'ятати, що ідеальна кутова швидкість холостого ходу асинхронного двигуна пропорційна частоті, тобто  $\omega_0 \sim f_1$ .

З рівняння (1) випливають три основні залежності, які використовують у системах електропривода для регулювання координат асинхронного двигуна:

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad \text{або} \quad \frac{U_1}{\omega_0} = \text{const}, \quad (2)$$

у разі постійного моменту на валу двигуна, тобто коли  $M_{\text{опір}} = \text{const}$ ;

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const} \quad \text{або} \quad \frac{U_1}{\sqrt{\omega_0}} = \text{const}, \quad (3)$$

у разі постійної потужності двигуна, тобто коли  $P_2 = \text{const}$  та  $M_{\text{опір}} \sim 1/\omega$ ;

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const} \quad \text{або} \quad \frac{U_1}{\omega_0^2} = \text{const}, \quad (4)$$

у разі навантаження вентиляторного характеру, коли справедливий вираз  $P_2 \sim \omega^3$ , або  $M_{\text{опір}} \sim \omega^3$ . Вирази (2), (3) і (4) дозволяють встановити значення напруги  $U_1$  за заданою швидкістю  $\omega_0$  (або навпаки) заради отримання першої (на осі ординат) точки робочої частини механічної характеристики  $\omega = f(M)$ , яку слід приймати лінійною [1, 2].

Корисна потужність на валу двигуна  $P_2$  зв'язана з підведеною  $P_1$  виразом:

$$M \cdot \omega = P_2 = P_1 \cdot \eta, \quad (5)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії.

Підведена потужність визначається виразом:

$$P_1 = 3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1, \quad (6)$$

таким чином

$$P_2 \approx U_1 \cdot I_1. \quad (7)$$

Вирази (5) та (7) об'єднують величини  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $M$  та  $\omega$  і дозволяють визначити будь-яку невідому величину, якщо відомі три з них при регулюванні за законами (2), (3) або (4).

Як відомо, критичне ковзання АД  $s_{\text{кр}} = r_2' / x_{\text{к}}$  причому  $x_{\text{к}} \sim f_1$ . Тому можливо вважати, що швидкість за критичним ковзанням  $\omega_{\text{кр}} = \omega_0 (1 - s_{\text{кр}})$  як і будь-яка швидкість  $\omega \sim f_1$ .

Таким чином, робочі частини механічних характеристик за законами регулювання (2), (3) або (4) – **паралельні** [1, 2].

## Програма та порядок виконання роботи

Скласти схему за рис. 2.  $M_{\text{опір}}$  на валу асинхронного двигуна (АД) створюється електромагнітним гальмом. Пуск двигуна здійснити перемиканням з'єднання «У» на з'єднання «Д» ( $U_{\text{ІНОМ}}=220$  В,  $f_{\text{ІНОМ}}=50$  Гц).

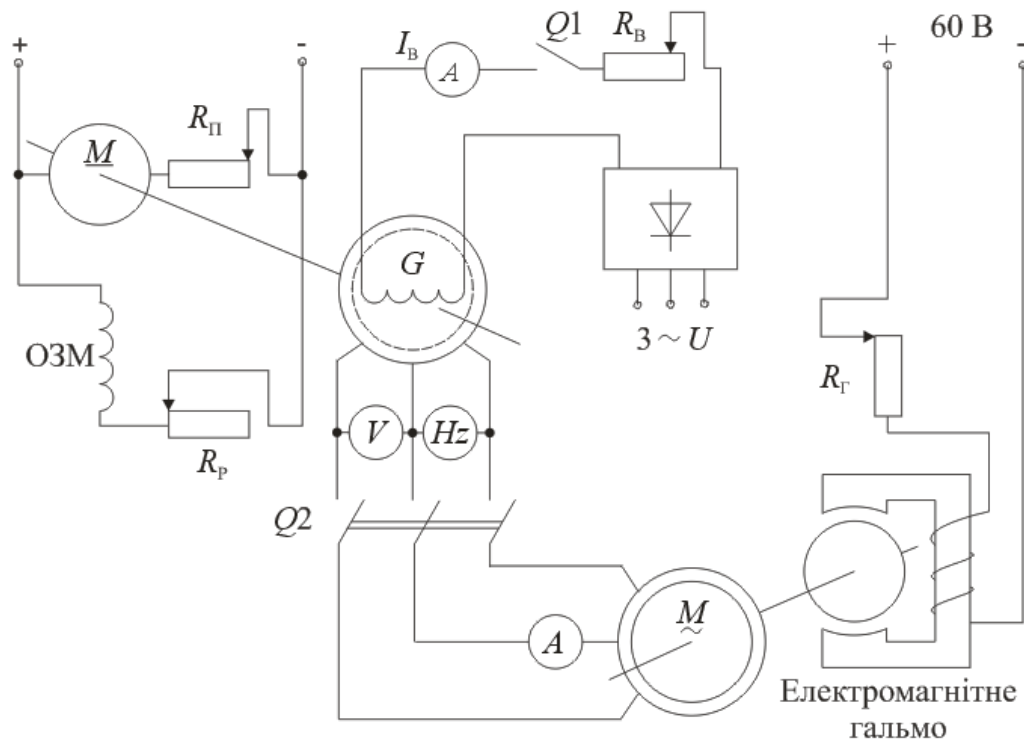


Рис. 2

1.1. Визначити  $\omega_0$  АД за частотою  $f_{\text{ІНОМ}}=50$  Гц,  $\omega=\pi \cdot n/30$  с<sup>-1</sup>. Частоту обертання  $n$  (хв<sup>-1</sup>) визначити за тахометром.

1.2. Синхронний генератор (СГ на схемі рис. 2 –  $G$ ) приводиться в рух Двигуном постійного струму незалежного збудження (ДПС НЗ на схемі рис. 2 –  $M$ ). Зміна опорів у колах збудження цих машин дозволяє відповідно змінювати електрорушійну силу (ЕРС) та частоту обертання синхронного генератора. Частота обертання також регулюється зміною напруги живлення ДПС НЗ.

1.3. Рубильником  $Q2$  підключити АД до СГ, зміна кутової швидкості та ЕРС якого дозволяє регулювати за потрібним законом амплітуду і частоту напруги живлення АД.

1.4. Навантажити АД номінальним струмом, збуджуючи електромагнітне гальмо. Виміряти номінальну частоту обертання  $n_{\text{НОМ}}$  струм  $I_{\text{НОМ}}$  і момент  $M_{\text{опір}}$ . Визначити номінальну кутову швидкість  $\omega_{\text{НОМ}}$ , а також за формулою Клосса побудувати природну механічну характеристику  $\omega=f(M)$ , прийнявши  $K_M=M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}}=2,1$ . Частоту обертання СГ підтримувати постійною, відповідно до обраного значення  $\omega_0$  АД.

1.5. Згідно з формулами (2), (3) і (4) визначити відношення напруги  $U_1$  до кутової швидкості  $\omega_0$  та підтримувати їх постійними за значеннями та розрахунком механічних характеристик.

1.6. Визначити і побудувати механічні характеристики за  $f_1 > 50$  Гц, проте напруга повинна бути  $U_1 \leq 250$  В.

1.7. Визначити і побудувати механічні характеристики за  $f_1 < 50$  Гц.

1.8. Розрахувати та побудувати механічні характеристики згідно з формулами (2), (3) і (4), які б відповідали частотам  $f_1 = 35, 25$  і  $15$  Гц.

1.9. На графіках механічних характеристик за всіма трьома випадками регулювання визначити допустимі значення  $M_{\text{опір}}$  та накреслити криві  $\omega = f(M_{\text{опір}})$ .

1.10. Проаналізувати одержані залежності і зробити висновки про співвідношення між показаннями вольтметра та амперметра у колі статора відповідно формулам (5) і (7).

### Контрольні запитання

1. Які основні координати асинхронного двигуна піддаються регулюванню?
2. Перелічіть основні способи регулювання частоти обертання асинхронного двигуна (АД). Дайте коротку характеристику кожному із способів.
3. Як зміна напруги живлення впливає на крутний момент асинхронного двигуна?
4. Як пов'язані між собою частота обертання ротора та частота напруги живлення?
5. Що відбувається з магнітним потоком у двигуні, якщо при зміні частоти не змінювати напругу?
6. Які переваги має частотно-регульований електропривод перед нерегульованим?
7. Поясніть структуру і функціонування дослідної установки.
8. Запишіть основні закони частотного керування асинхронним двигуном та наведіть якісний вигляд його механічних характеристик при їх застосуванні. Поясніть вигляд характеристик.
9. Дайте оцінку впливу активного опору обмотки статора на момент асинхронного двигуна при частотному регулюванні його швидкості.

## Лабораторна робота 9-ЕП

### ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗОВИМ РОТОРОМ У ГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ

**Мета роботи:** Дослідити механічні та електромеханічні характеристики асинхронної машини у різних режимах електричного гальмування.

#### Теоретичні положення

Для гальмування АД можуть бути використані режими:

- рекуперативного гальмування;
- гальмування противмиканням;
- динамічного гальмування.

1. Режим рекуперативного гальмування (двигун переводиться у генераторний режим з віддачею енергії у мережу) добре відомий з курсу «Електричні машини». Він може бути здійснений у тому разі, якщо кутова швидкість ротора буде більшою від ідеальної швидкості холостого ходу (синхронної швидкості), тобто  $\omega > \omega_0$ .

Практично таке співвідношення швидкостей можливе у кранових механізмах при опусканні важких вантажів, тобто за дією активного моменту опору. Якщо момент опору реактивний, АД повинен допускати перемикання кількості пар полюсів з меншої на більшу (наприклад, у приводах металорізальних верстатів).

2. Гальмування противмиканням – це режим, в якому виконавчий механізм обертає вал двигуна в сторону, протилежну дії електромагнітного моменту. Очевидно, ковзання при цьому  $s > 1$ , струм ротора та статора буде у декілька разів перевищувати їх номінальні значення. Але момент, внаслідок великого індуктивного опору ротора ( $s > 1$ ), буде невеликий. Тому для збільшення моменту і одночасного зменшення струму у коло ротора необхідно увімкнути резистор з достатньо великим опором  $r_{\text{дод}}$  [1, 2].

Графічне визначення опору цього резистора може бути виконано, виходячи з заданого за гальмуванням штучного ковзання, якщо відома природна характеристика (її прямолінійна частина) та природне ковзання ( $s_{\text{пр}}$ ). Маючи

на увазі, що  $s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0}$  збудуємо механічні характеристики у координатах  $s = f(M)$ .

Згідно формули Клосса [1, 2]:

$$\frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} = \frac{M}{M_{\text{max}}}, \quad (1)$$

тоді при однаковому моменті опору  $M_{\text{опору}}$ , як показано на рис. 1, має місце рівняння:

$$\frac{2}{\frac{s_{\text{пр}}}{s_{\text{кр.пр}}} + \frac{s_{\text{кр.пр}}}{s_{\text{пр}}}} = \frac{2}{\frac{s_{\text{ш}}}{s_{\text{кр.ш}}} + \frac{s_{\text{кр.ш}}}{s_{\text{ш}}}} \quad \text{або} \quad \frac{s_{\text{пр}}}{s_{\text{кр.пр}}} + \frac{s_{\text{кр.пр}}}{s_{\text{пр}}} = \frac{s_{\text{ш}}}{s_{\text{кр.ш}}} + \frac{s_{\text{кр.ш}}}{s_{\text{ш}}}. \quad (2)$$

Рівняння (2) може бути лише за умови:

$$\frac{s_{\text{пр}}}{s_{\text{кр.пр}}} = \frac{s_{\text{ш}}}{s_{\text{кр.ш}}} \quad \text{або} \quad a = b. \quad (3)$$

Для доказу цієї умови підставимо (3) у (2), тоді  $a + \frac{1}{a} = b + \frac{1}{b}$  або

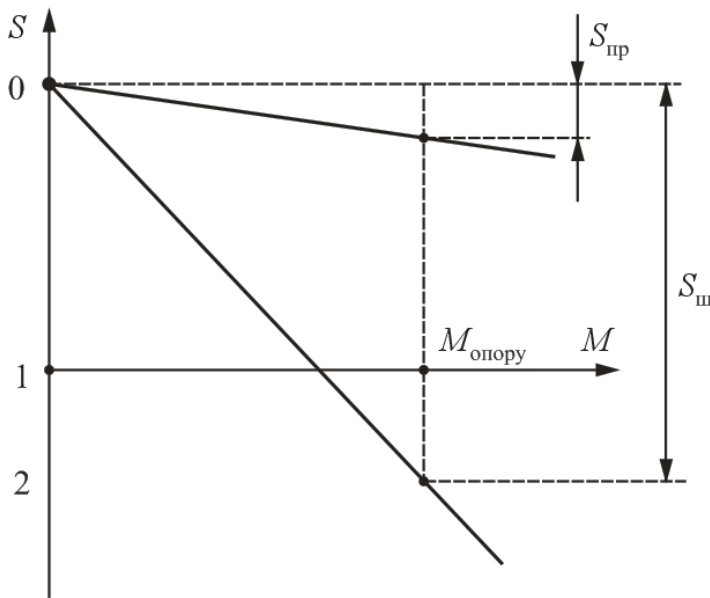


Рис. 3

тобто  $a^2 b + b = ab^2 + a$ ,  
 $a^2 b - a = ab^2 - b$ . Подальший розв'язок останнього рівняння показує, що оскільки  $a(ab-1) = b(ab-1)$  воно має два розв'язки:  $a=b$  та  $a=1/b$ . Другий розв'язок відноситься до частини механічної характеристики за точкою критичного ковзання ( $s > s_{\text{кр}}$ ) і до розрахунку не приймається. Таким чином вираз (3) є слушним.

Тому:

$$s_{\text{ш}} = s_{\text{пр}} \frac{s_{\text{кр.ш}}}{s_{\text{кр.пр}}}. \quad (4)$$

З курсу «Електричні машини» відомо, що  $s_{\text{кр}} = r'_2 / x_{\text{к}}$  отже

$$s_{\text{ш}} = s_{\text{пр}} \frac{r'_2 + r'_{\text{дод}}}{r'_2}. \quad (5)$$

Розв'язуючи рівняння (5) відносно  $r'_{\text{дод}}$ , одержимо:

$$r'_{\text{дод}} = r'_2 \frac{s_{\text{ш}} - s_{\text{пр}}}{s_{\text{пр}}}. \quad (6)$$

Одержані рівняння (5) та (6) дозволяють збудувати будь-яку штучну характеристику. Для такої побудови необхідна природна характеристика (яку можна розрахувати за паспортними даними по формулі Клосса) і значення опору ротора  $r_2'$ . Приймаючи ковзання за природною характеристикою, за допомогою виразу (5) для даного значення  $r_{\text{дод}}$  знаходимо ковзання на шуканій характеристиці при тому ж значенні  $M_{\text{опору}}$ . Або за допомогою виразу (6) визначимо потрібне значення  $r_{\text{дод}}'$  для одержання необхідної штучної механічної характеристики.

Побудова механічної характеристики за паспортними даними за виразом (1) можна виконати наступним чином [1, 2].

Для більшості АД загального призначення коефіцієнт перевантаження може бути прийнятим  $K_M = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,1$ . Знаючи номінальне значення ковзання, можна записати вираз (1) таким чином:

$$\frac{1}{K_M} = \frac{2}{\frac{s_{\text{ном}}}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{ном}}}}, \text{ звідси } s_{\text{кр}}^2 - 2K_M s_{\text{кр}} s_{\text{ном}} + s_{\text{ном}}^2 = 0,$$

тоді

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left( K_M \pm \sqrt{K_M^2 - 1} \right). \quad (7)$$

У виразі (7) перед коренем слід брати лише плюс, оскільки мінус відповідає випадку знаходження  $s_{\text{ном}}$  і  $M_{\text{ном}}$  на механічній характеристиці у зоні, що немає практичного застосування.

Враховуючи ці обставини та приймаючи  $K_M = 2,1$  одержимо значення критичного ковзання з виразу (7):

$$s_{\text{кр}} = 4s_{\text{ном}} \quad (8)$$

Динамічне гальмування виконується з незалежним збудженням статора постійним струмом.

У цьому випадку обмотка статора відключається від мережі трифазного змінного струму і вмикається (два виводи) на джерело постійного струму, який утворює нерухомий магнітний потік. Це можливо при з'єднанні обмоток статора як зіркою так і трикутником. Напряга постійного струму може бути невеликою. У цих умовах АД представляє собою синхронний генератор з неявно вираженими полюсами, який працює із змінною частотою. Навантаженням генератора є резистор, увімкнений у коло ротора, а у випадку короткозамкненого ротора – тільки його обмотка [1, 2].

Характер зміни струму ротора  $I_2$  і його активної складової  $I_{2a}$  у залежності від швидкості показані на рис. 4.

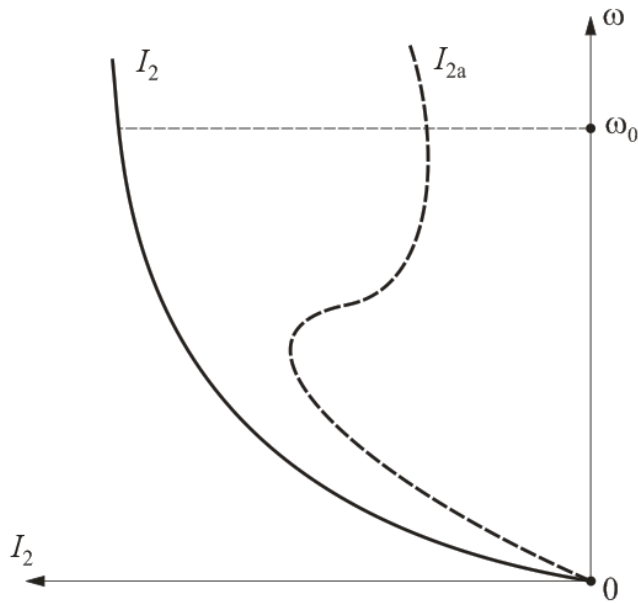


Рис. 4

Таким чином, механічні характеристики АД у режимі динамічного гальмування за формою однако-ві з механічними характеристиками для режиму двигуна.

Для виведення рівнянь механічних характеристик АД у режимі динамічного гальмування вважаємо, що статор замість постійного струму живиться змінним [1, 2].

У цьому випадку результуюча магніторушійна сила (МРС) створюється сукупно обмотками статора та ротора і МРС постійного  $F_{\text{пост}}$  та змінного  $F_{\text{змін}}$  струмів рівні, тобто  $F_{\text{пост}} = F_{\text{змін}}$ .

Схеми увімкнення обмоток статора і векторна діаграма для визначення результуючої МРС показані на рис. 5.

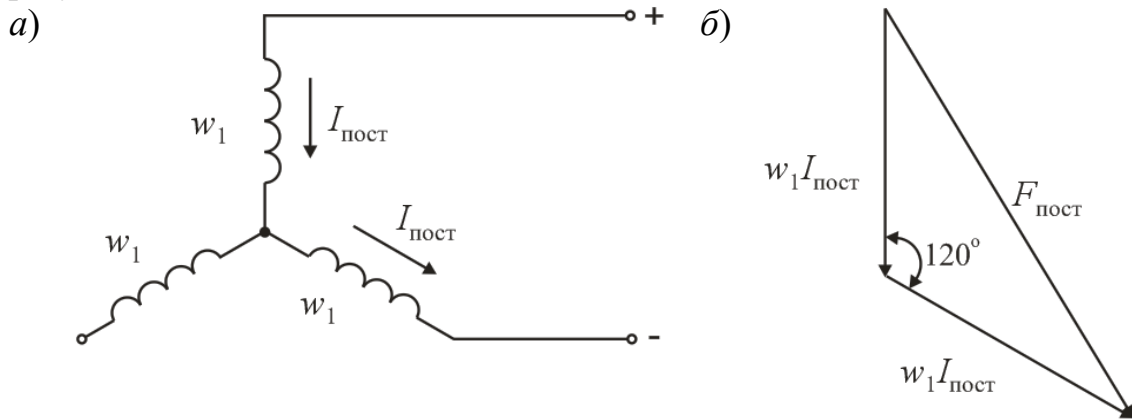


Рис. 5

Згідно з рис. 5б  $F_{\text{пост}} = 2I_{\text{пост}}w_1 \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{\text{пост}}w_1$ . Амплітуда МРС, що створена діючим значенням трифазного змінного струму статора  $I_1$ :

$$F_{\text{змін}} = \frac{3\sqrt{2}}{2} I_1 w_1.$$

Прирівнявши праві частини рівнянь для МРС і розв'язавши одержане рівняння відносно струму  $I_1$ , одержимо:

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{\text{пост}} = 0,816 I_{\text{пост}}, \text{ або} \quad (9)$$

$$I_{\text{пост}} = 1,225 I_1. \quad (9a)$$

Одночасно слід мати на увазі, що опір постійному струму буде  $2\eta$  і потрібна напруга постійного струму:

$$U_{\text{пост}} = I_{\text{пост}} \cdot 2\eta = 2,45 \cdot I_1 \cdot \eta, \quad (10)$$

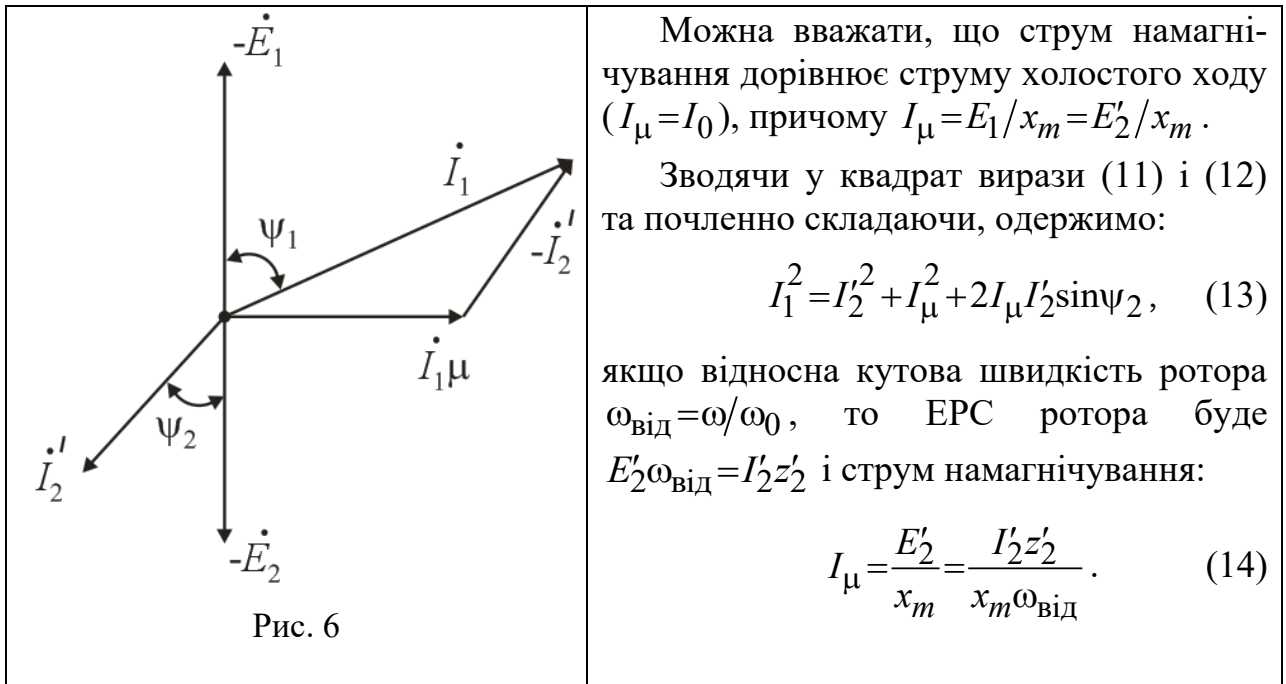
де  $\eta$  – опір фази статора.

На рис. 6 зображена векторна діаграма струмів АД, користуючись якою можна написати:

$$I_1 \cos \varphi_1 = I_2' \cos \psi_2, \quad (11)$$

$$I_1 \sin \varphi_1 = I_\mu + I_2' \sin \psi_2, \quad (12)$$

де  $I_\mu = I_1 + I_2'$  – струм намагнічування.



При гальмуванні індуктивний опір ротора  $x_2'$  змінюється, тоді

$$z_2' = \sqrt{r_2'^2 + (x_2' \omega_{\text{від}})^2} \quad \text{і} \quad (15)$$

$$\sin \psi_2 = \frac{x_2' \omega_{\text{від}}}{z_2'}. \quad (16)$$

Підставивши (14) і (16) у (13), одержимо

$$I_1^2 = I_2'^2 \frac{(x_m \omega_{\text{від}})^2 + z_2'^2 + 2x_m x_2' \omega_{\text{від}}^2}{(x_m \omega_{\text{від}})^2}. \quad (17)$$

Підставивши тепер (15) у (17), одержимо

$$I_2' = \frac{I_1 x_m \omega_{\text{від}}}{\sqrt{r_2'^2 + (x_m + x_2')^2 \omega_{\text{від}}^2}}. \quad (18)$$

Як відомо, електромагнітний момент асинхронної машини

$$M = \frac{m_1 I_2'^2 r_2' / \omega_{\text{від}}}{\omega_0},$$

де  $m_1$  – кількість фаз статора.

Тоді з урахуванням виразу (18) гальмівний момент

$$M = \frac{m_1 I_1^2 x_m r_2' \omega_{\text{від}}}{\omega_0 \left[ r_2'^2 + (x_m + x_2')^2 \omega_{\text{від}}^2 \right]}. \quad (19)$$

Отже, момент при динамічному гальмуванні визначається змінним струмом  $I_1$ , який еквівалентний постійному струму (див. вираз (9)) та є функцією відносної кутової швидкості  $\omega_{\text{від}}$  [1, 2].

Максимальний момент у гальмівному режимі

$$M_{\text{max}} = \frac{m_1 I_1^2 x_m^2}{2\omega_0 (x_m + x_2')} \approx \frac{m_1 I_1^2 x_m}{2\omega_0}, \quad (20)$$

буде за відносною кутовою швидкістю

$$\omega_{\text{від.кр}} = \frac{r_2'}{x_m + x_2'} \approx \frac{r_2'}{x_m}. \quad (21)$$

Величиною  $x_2'$ , як занадто малою, можна знехтувати.

На рис. 7 приведені механічні характеристики при динамічному гальмуванні для двох різних значень опору роторного кола та двох значень  $I_{\text{пост}}$  у колі статора. Криві 1 і 3 відповідають одному й тому ж значенню опору роторного кола та різним значенням  $I_{\text{пост}}$ , криві 2 і 4 тим же значенням  $I_{\text{пост}}$  але більшому опору роторного кола.

З виразу (21) та рис. 7 видно, що відносна критична швидкість, що відповідає критичному ковзанню і максимальному моменту, залежить від значення  $r_2'$ , тому із збільшенням останнього значення  $M_{\text{max}}$  збільшується у бік більших значень  $\omega_{\text{від}}$ ; Через те ж  $\omega_{\text{від.кр.1}} = \omega_{\text{від.кр.3}}$  і  $\omega_{\text{від.кр.2}} = \omega_{\text{від.кр.4}}$ .

Значення  $M_{\text{max}}$  не залежить від значення  $r_2'$ , а визначається сумою індуктивних опорів  $(x_m + x_2')$  та струмом  $I_1$ . Розділивши (19) на (20) і використавши (21) одержимо вираз:

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{\omega_{\text{від}}}{\omega_{\text{від.кр}}} + \frac{\omega_{\text{від.кр}}}{\omega_{\text{від}}}}. \quad (22)$$

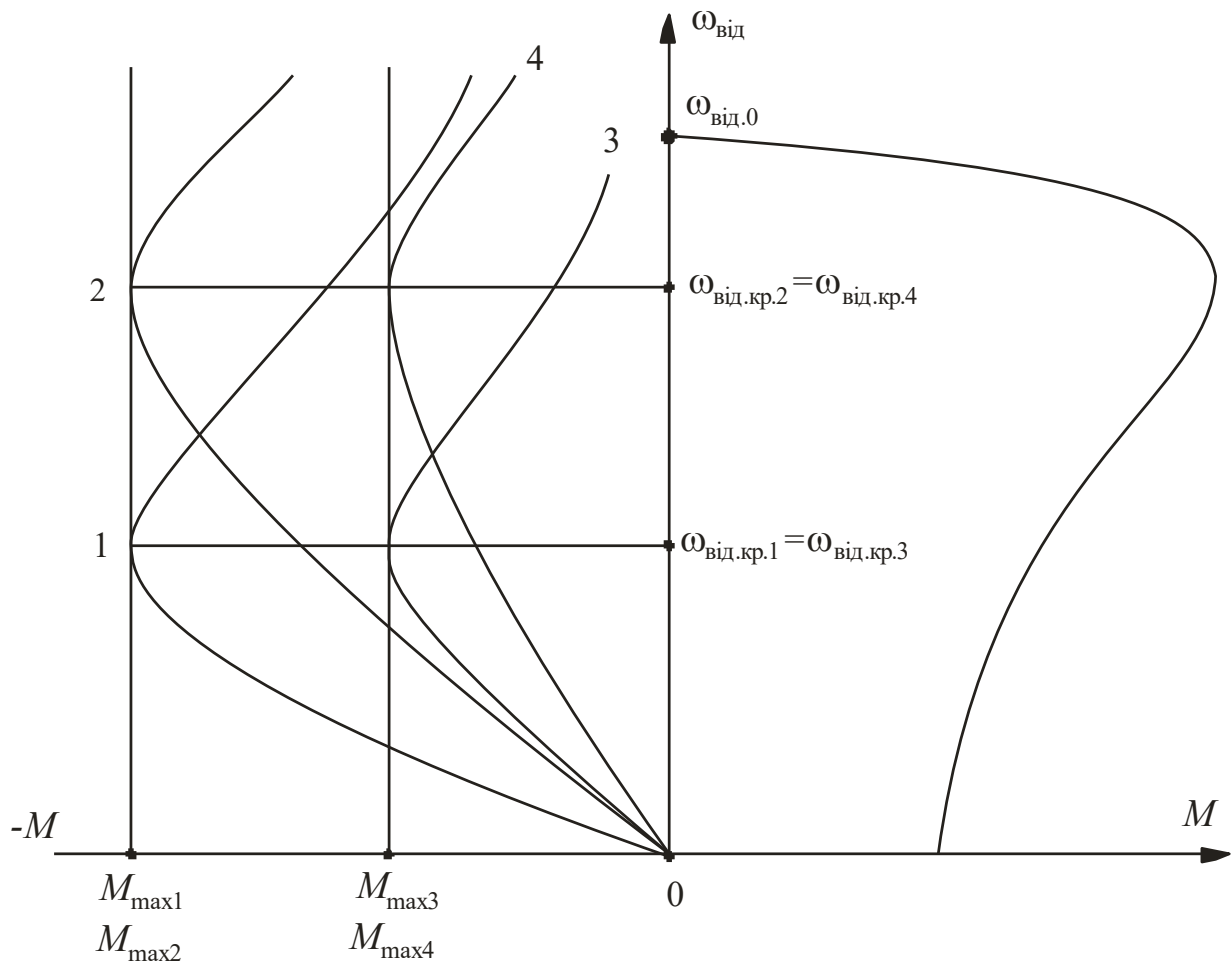


Рис. 7

Таким чином, вигляд механічної характеристики при динамічному гальмуванні визначається значеннями  $M_{\max}$  і  $\omega_{\text{від.кр}}$ , якими при розрахунку характеристики необхідно задатись.

Розрахунок гальмівної характеристики виконується у такій послідовності:

3.1.1. Виконуючи досліди холостого ходу та короткого замикання, визначають значення  $x_m$ ,  $x'_2$  і  $r'_2$ .

3.1.2. Оскільки повний опір роторного кола з урахуванням увімкненого резистора  $r'_{\text{дод}}$  дорівнює  $(r'_{\text{дод}} + r'_2)$  із виразу (21) за заданим значенням  $\omega_{\text{від.кр}}$  можна знайти  $(r'_{\text{дод}} + r'_2) = \omega_{\text{від.кр}} (x_m + x'_2)$ , тоді

$$r'_{\text{дод}} = \omega_{\text{від.кр}} (x_m + x'_2) - r'_2. \quad (23)$$

Приймаючи  $M_{\max} = 2,1M_{\text{ном}}$  (або інше значення), з виразу (20) можна визначити струм статора схеми заміщення АД

$$I_1 = \sqrt{\frac{2\omega_0 M_{\max} (x_m + x'_2)}{m_1 x_m^2}} \approx \sqrt{\frac{2\omega_0 M_{\max}}{m_1 x_m}}. \quad (24)$$

З виразу (9а) знаходять значення постійного струму  $I_{\text{пост}}$ .

Розрахунок самої характеристики може бути виконаний за допомогою виразу (19) або (22). Цей розрахунок є недостатньо точним, оскільки уся його метода не враховує насичення магнітного кола. Урахування насичення значно ускладнює розрахунок і він можливий лише при певному значенні постійного струму у обмотці статора. В цьому випадку виходити з потрібних значень  $M_{\max}$  і  $\omega_{\text{від.кр}}$  вже неможливо.

Режим динамічного гальмування і його характеристики суттєво відрізняються від режиму двигуна:

- в режимі двигуна кутова швидкість магнітного потоку  $\omega_{\phi} = \omega_0$ , а при динамічному гальмуванні  $\omega_{\phi} = 0$  (потік нерухомий);
- в режимі двигуна струм статора залежить від ковзання, а при динамічному гальмуванні він незмінний;
- в режимі двигуна магнітний потік приблизно незмінний, а при динамічному гальмуванні та малому значенні  $\omega$  він збільшується, оскільки зменшується дія реакції якоря, яка його розмагнічує;
- в режимі двигуна усі характеристики починаються у точці, яка відповідає  $\omega = \omega_0$ , а при динамічному гальмуванні – у точці, яка відповідає  $\omega = 0$ .

### Програма та порядок виконання роботи

Користуючись паспортними даними за допомогою рівнянь (1) і (8) збудувати природну механічну характеристику.

1.1. Визначити значення  $M_{\text{ном}}$  та задатись моментом опору  $M_{\text{опір}} = 0,9M_{\text{ном}}$ .

1.2. Провести дослід холостого ходу і визначити значення параметру  $x_m$  схеми заміщення.

1.3. Методом амперметра-вольтметра визначити опір  $r_1$  фази обмотки статора і прийняти у першому наближенні  $r_2' \approx r_1$ .

1.4. Задаючи декілька значень  $s_{\text{III}}$  у межах від 1,3 до 1,8, визначити для останніх опір додаткового резистора у колі ротора (використати водяний або будь-який інший реостат та вираз (6)).

1.5. Збудувати сімейство гальмівних характеристик, визначивши для кожної з них момент короткого замикання, співвіднести його із значенням  $M_{\text{опір}}$ .

1.6. Методом амперметра-вольтметра визначити реальний опір фази ротора  $r_2$ .

1.7. Для прийнятих у пункті 1.5 значень  $s_{\text{III}}$ , використовуючи вираз (6), визначити реальні значення опорів  $r_{\text{дод}}$  та встановити їх на водяному (або іншому) реостаті.

1.8. Підключити двигун до мережі, та проводячи режим противмикання, зафіксувати кидки струму при різних значеннях  $r_{\text{дод}}$ , визначених у пункті 1.8, а також час від початку гальмування до повної зупинки двигуна.

1.9. Збудувати залежність значень кидків струму при гальмуванні проти-вмиканням від значень опору  $r_{\text{дод}}$ , а також часу гальмування від  $r_{\text{дод}}$ .

1.10. Задаючи (за консультацією викладача) два-три значення потрібного максимального гальмівного моменту і два-три значення  $\omega_{\text{від.кр}}$ , визначити постійний струм збудження для кожного заданого режиму і відповідну на-пругу постійного струму.

1.11. Визначити потрібні значення опору додаткового резистора у колі ро-тора та встановити їх на водяному (або іншому) реостаті.

1.12. Запустити двигун від мережі 3-фазного змінного струму і перевести його у режим динамічного гальмування при кожному визначеному струмі збудження  $I_{\text{пост}}$ .

Виконуючи режим динамічного гальмування, зафіксувати максимальні струми у колі ротора, а також час від початку гальмування до повної зупинки двигуна.

Для вибраних режимів гальмування розрахувати та збудувати гальмівні характеристики (аналогічно рис. 7).

Збудувати залежності часу гальмування від постійного струму збуджен-ня.

Зробити висновки про ефективність динамічного гальмування, порівняти його з гальмуванням противмиканням.

### Контрольні запитання

1. Що таке ковзання та критичне ковзання, їх фізичний зміст? Наведіть формулу для визначення ковзання та критичного ковзання?
2. Що таке перевантажувальна здатність двигуна?
3. Зобразіть повну механічну характеристику асинхронної машини і пояс-нить, яким режимам її роботи відповідають окремі ділянки характе-ристики.
4. В який спосіб можна отримати гальмівні режими асинхронного двигу-на?
5. Поясніть принцип рекуперативного гальмування асинхронного двигу-на, зобразіть механічні характеристики.
6. Поясніть принцип динамічного гальмування асинхронного двигуна, зо-бразіть механічні характеристики.
7. Призначення додаткових опорів, що вводяться в коло ротора.
8. Чи можна використовувати спрощену формулу Клосса для побудови механічних характеристик асинхронного двигуна в гальмівному режи-мі?
9. У яких випадках в умовах експлуатації можливо виникнення генерато-рного режиму АМ?

## Лабораторна робота 10-ЕП

### ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

**Мета роботи:** Дослідити особливості роботи взаємозв'язаного приводу, різні схеми ввімкнення та визначити їх характеристики.

#### Теоретичні положення

Взаємозв'язаний привод з механічним з'єднанням валів двох електричних машин дозволяє одержати механічні характеристики більшої жорсткості, ніж привод з однією машиною, як в режимі двигуна так і в гальмівному режимі [1, 2].

Взаємозв'язаний привод може складатись з двох асинхронних двигунів або з одного асинхронного двигуна та допоміжного генератора постійного струму. У першому випадку використовують два однакових асинхронних двигуна з фазними роторами, вали яких обертаються в одному напрямку. При цьому зменшується момент інерції системи.

Для одержання малих кутових швидкостей з жорсткою механічною характеристикою один асинхронний двигун вмикають у звичайний режим двигуна, а другий працює в режимі противвімкнення (рис. 8).

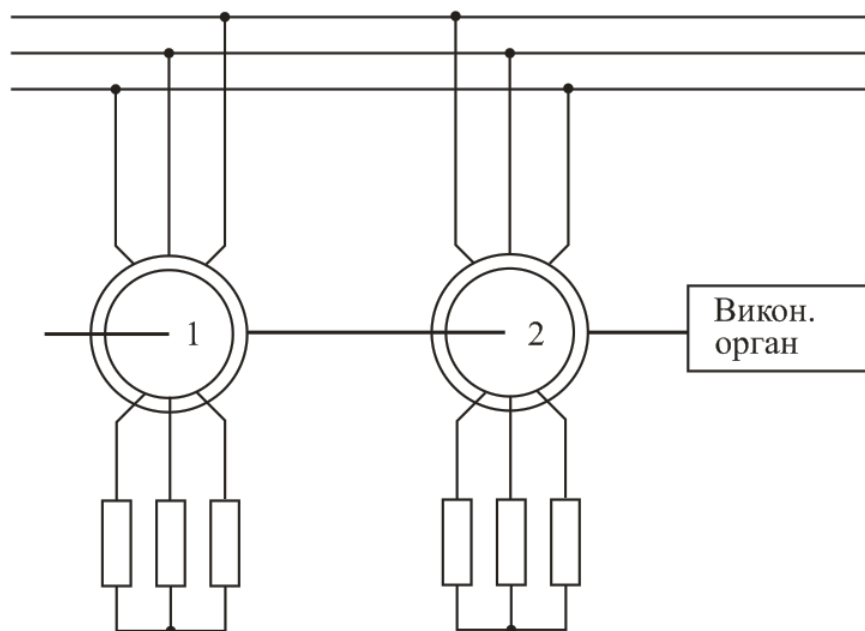


Рис. 8

Значення моментів кожного з асинхронних двигунів залежить від опорів резисторів, що увімкнені у кола роторів. Індекси величин, що входять у нижче наведені рівняння, відповідають номерам машин за схемою, де АД1 працює в режимі двигуна, а АД2 – у режимі противвімкнення. Відповідні їм рівняння механічних характеристик мають вигляд:

$$\omega_1 = \omega_0 - \beta_1 M_1, \quad (1)$$

$$\omega_2 = \omega_0 - \beta_2 M_2, \quad (2)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт жорсткості характеристик.

Очевидно,  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , а результуючий момент приводу:

$$M = M_1 + M_2 = \frac{\omega_0 - \omega}{\beta_1} + \left( \frac{-\omega_0 - \omega}{\beta_2} \right) = \omega_0 \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1 \cdot \beta_2} - \omega \frac{\beta_2 + \beta_1}{\beta_1 \cdot \beta_2}. \quad (3)$$

Розв'язуючи рівняння (3) відносно кутової швидкості, одержимо рівняння механічної характеристики взаємозв'язаного привода з двома АД з'єднаних по схемі механічного валу:

$$\omega = \omega_0 \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1 + \beta_2} - M \frac{\beta_2 \cdot \beta_1}{\beta_1 + \beta_2}. \quad (4)$$

Аналіз рівняння (4) показує, що ідеальна швидкість холостого ходу взаємозв'язаного привода з двома АД з'єднаних по схемі механічного валу нижче тієї ж швидкості кожного з АД, а жорсткість характеристик більше кожної з характеристик.

Механічні характеристики кожного двигуна, а також результуюча мають вигляд показаний на рис. 2.

Недоліком розглянутої системи є напружений тепловий режим другого двигуна.

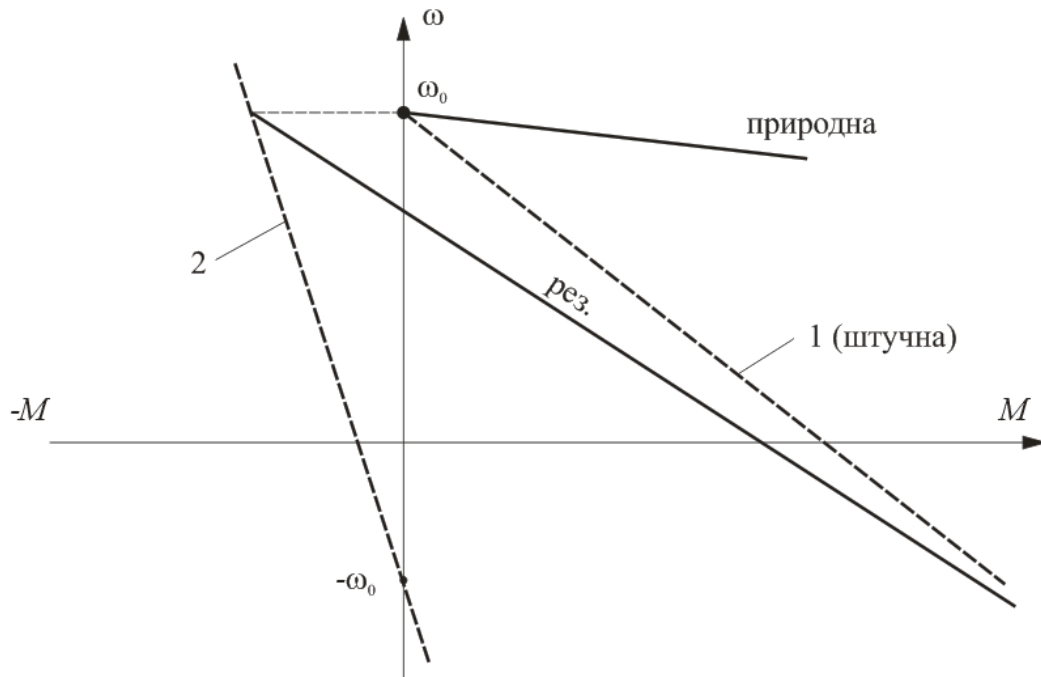


Рис. 9

Зменшити перегрів можливо, якщо увімкнути його на динамічне гальмування із збудженням постійним струмом, що, природно, потребує спеціального джерела живлення (рис. 10) [1, 2].

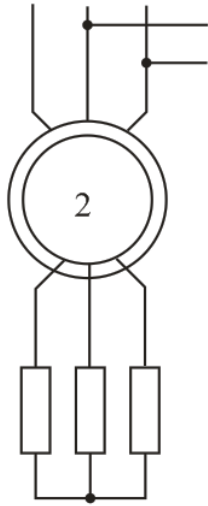


Рис. 10

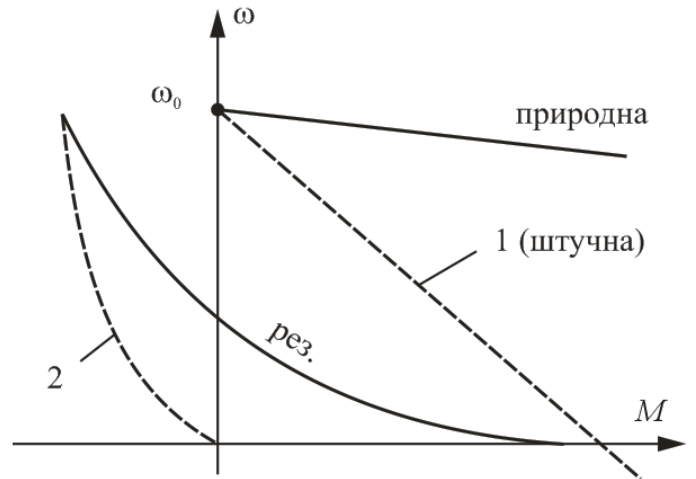


Рис. 11

Механічні характеристики кожного з асинхронних двигунів та результуюча наведені на рис. 11.

Електропривод з додатковим генератором постійного струму складається з асинхронного двигуна та з'єднаного з ним механічно генератора постійного струму послідовного збудження, якір якого замкнений на гальмівний резистор [1, 2].

При спуску вантажу, наприклад, АД1 підключений до мережі і працює у режимі силового спуску, а машина постійного струму 3 – у режимі динамічного гальмування. Відповідні характеристики машин 1, 3 та результуюча наведені на рис. 12.

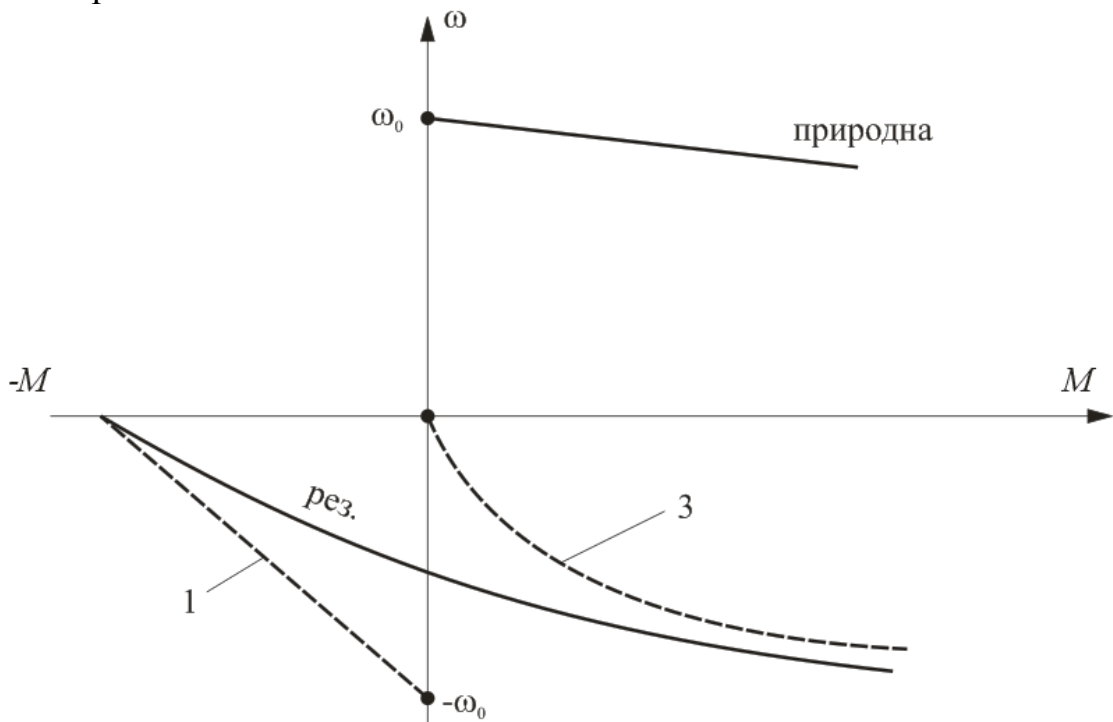


Рис. 12

Генератор постійного струму може бути будь-якої системи збудження,

але більш бажаний послідовного збудження, тому що у разі зникнення напруги змінного струму, генератор сам здібний опустити вантаж, працюючи у режимі динамічного гальмування з самозбудженням.

### Програма та порядок виконання роботи

Зібрати схему наведену на рис. 8, в якості виконавчого органа застосувати генератор постійного струму навантажений водяним реостатом.

1.1. Змінюючи значення додаткових опорів у колах роторів, запустити спочатку кожен машину без навантаження на валу окремо (опір  $r_{\text{дод2}}$  додаткового резистора у колі ротора АД2 повинен у 2...3 рази перевищувати  $r_{\text{дод1}}$ ).

Запустити два двигуни одночасно та простежити роботу взаємозв'язаного привода з двома АД з'єднаних по схемі механічного валу, змінюючи опір навантаження у колі якоря ГПС, з метою недопущення перегріву АД2, режим провести короткочасно.

1.2. За формулою Клосса розрахувати і побудувати природну та штучні характеристики обох АД з урахуванням свого значення опору  $r_{\text{дод}}$  резистора увімкненого у коло ротора.

Побудувати результуючу механічну характеристику електроприводу.

Вимкнути двигун АД2 з 3-фазної мережі і увімкнути його на збудження постійним струмом, як показано на рис. 10.

2.1. Встановити значення струму збудження так, як це зроблено у попередній лабораторній роботі (9-ЕП). Прийняти  $M_{\text{max}} \approx 1,5M_{\text{ном}}$ , а  $\omega_{\text{від.кр}} \approx 0,7$ . Узгодити ці значення з величиною  $r_{\text{дод2}}$ .

Запустити електропривод та простежити за його роботою, змінюючи опір навантаження у колі якоря ГПС.

Розрахувати та збудувати гальмівну характеристику АД2 і результуючу характеристику взаємозв'язаного електропривода, як показано на рис. 11.

Зібрати схему взаємозв'язаного привода з додатковим генератором постійного струму, при цьому АД1 і АД2 потрібну увімкнути зустрічно: АД1 – працює в системі ЕП, а АД2 – імітує вантаж, що спускається, створюючи гальмівний момент.

Запустити ЕП і простежити його роботу, регулюючи опір резистора у колі ГПС. Обидва АД, з метою обмеження їх струмів, повинні мати додаткові резистори у колах роторів.

### Контрольні запитання

1. Що таке взаємозв'язаний асинхронний електропривод і чим він відрізняється від індивідуального та групового?
2. Класифікація взаємозв'язаних електроприводів. Охарактеризуйте основні типи взаємозв'язку між двигунами (механічний, електричний).

3. Як впливає використання взаємозв'язаного електропривода на жорсткість механічних характеристик у порівнянні з індивідуальним електроприводом?
4. Як відбувається розподіл навантаження між двигунами у взаємозв'язаному приводі?
5. Які методи синхронізації використовуються у взаємозв'язаних асинхронних електроприводах?

### Лабораторна робота 11-ЕП

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА В РЕЖИМАХ S1, S2 І S3

**Мета роботи:** Дослідження процесів нагрівання електричної машини в режимах S1, S2 і S3.

#### Теоретичні положення

1. Сталі часу нагрівання  $T_H$  та охолодження  $T_0$ .

Відомо, що рівняння нагрівання має вигляд [1, 2]:

$$\tau = \tau_{\text{кін}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T_H}}, \quad (1)$$

де  $\tau$ ,  $\tau_{\text{кін}}$  та  $\tau_0$  – поточне, кінцеве та початкове значення перегріву;

$t$  – поточний час;

$T_H = C/A$  – стала часу нагрівання, а  $C$  і  $A$  – відповідно повні теплоємність та тепловіддача за одиницю часу, які вимірюються в  $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^\circ\text{C}}$  і  $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{с} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

Із рівняння (1) видно, що при  $t=4T_H$   $\tau=0,98\tau_{\text{кін}}$ . Якщо  $\tau_0=\tau_{\text{кін}}$ , а  $\tau_{\text{кін}}=0$ , то рівняння (1) перетворюється в рівняння охолодження:

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T_H}}. \quad (2)$$

Звернемо увагу, що якщо  $\sum p$  – сумарні втрати у машині, то  $A = \sum p / \tau_{\text{кін}}$ . Тоді:

$$\sum p = \frac{C}{T_H} \tau_{\text{кін}}, \quad (3)$$

оскільки  $C = \text{const}$  і  $T_H = \text{const}$ , то у вузькому діапазоні можливо вважати, що перегрів пропорційний сумарним втратам [1, 2].

В рівняннях (1) і (2) сталі  $T_H$  одні і ті ж, при цьому  $T_H \propto 1/A$ . Проте, прак-

тично у машинах з самовентиляцією (переважна більшість малої та середньої потужності) тепловіддача при стоячому роторі  $A_0$  суттєво зменшується порівняно з тепловіддачею  $A$  при обертанні ротора.

Коефіцієнт погіршення тепловіддачі:

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A}, \quad (4)$$

у захищених машинах з самовентиляцією  $\beta_0 \approx 0,3$ .

Отже, якщо двигун остигає нерухомим, то стала часу:

$$T_0 = \frac{C}{A_0}. \quad (5)$$

Розв'язавши разом (4) і (5), одержимо:

$$T_0 = \frac{C}{\beta_0 \cdot A} = \frac{T_H}{\beta_0}, \quad (6)$$

яку слід підставити у рівняння (2) для визначення залежності при остиганні двигуна.

2. Проведення режиму  $S1$  дозволяє визначити кінцеві (сталі) перегріву при різних струмах навантаження, наприклад при  $I_{я.ном}$ ,  $1,25I_{я.ном}$ ,  $0,7I_{я.ном}$ .

Вимірювання температури відбувається методом опору (амперметра-вольтметра). Цей метод ґрунтується на тому, що значення опору змінюється із зміною температури, причому температурний коефіцієнт матеріалу провідника рівний відносному збільшенню його опору при підвищенні температури на  $1^\circ\text{C}$ , для міді рівний  $\alpha=1/250$ , а для алюмінію  $\alpha=1/260$ . Опір обмоток ненагрітої машини  $r_{15}$  приводиться до  $15^\circ\text{C}$ . Якщо температура навколишнього середовища  $\Theta_0$ , а перегрів –  $\tau$ , то абсолютна температура нагрітої обмотки  $\Theta_{\text{Гар}} = \tau + \Theta_0$ . Оскільки  $r_{\text{хол}} = r_{15} [1 + \alpha(\Theta_{\text{хол}} - 15)]$ , а  $r_{\text{Гар}} = r_{15} [1 + \alpha(\Theta_{\text{Гар}} - 15)]$ , то:

$$\Theta_{\text{Гар}} = \frac{r_{\text{Гар}}}{r_{\text{хол}}} (235 + \Theta_{\text{хол}}) - 235.$$

Розв'язок цього рівняння може бути недостатньо точним, якщо значення  $r_{\text{Гар}}$  і  $r_{\text{хол}}$  близькі. Тому до чисельника правої частини рівняння додамо і віднімемо  $r_{\text{хол}}$  і перетворивши, одержимо значення перегріву:

$$\tau = \Theta_{\text{Гар}} - \Theta_0 = \frac{r_{\text{Гар}} - r_{\text{хол}}}{r_{\text{хол}}} (235 + \Theta_{\text{хол}}) + \Theta_{\text{хол}} - \Theta_0, \quad (7)$$

оскільки:

$$\Theta_{\text{Гар}} = 250 \frac{r_{\text{Гар}} - r_{15}}{r_{15}} + 15, \quad (8)$$

то підставивши (8) у (7) та перетворивши, одержимо остаточно:

$$\tau = 250 \frac{r_{\text{Гар}} - r_{15}}{r_{15}} + 15 - \Theta_0. \quad (9)$$

За рахунок того, що дослідні машини після їх відключення від мережі, зупиняються дуже швидко, можливо вважати, що час відключення і зупинки один і той же. Вимір опорів необхідно проводити як можна швидше з метою зменшення помилок пов'язаних з охолодженням обмоток після відключення.

Перед початком роботи необхідно заміряти температуру навколишнього середовища  $\Theta_0$ , вважаючи, що обмотки дослідної машини мають ту ж температуру.

Вимір опорів проводиться три рази за різних струмів, наприклад 1 А, 2 А і 3 А, які обмежують реостатом. За дійсний опір приймають середнє арифметичне.

Вимірювання «гарячих» опорів проводиться на двигуні який зупинився через 10...12 хвилин роботи. Процес вважається сталим, якщо зміна температури не перевищує 1 °С збігом однієї години.

У випадку досягнення допустимого для даного класу ізоляції перегріву  $\tau_{\text{доп}}$ , процес нагрівання слід припинити, а кінцевий (сталий) перегрів для цього коефіцієнта навантаження  $K_{\text{H}}$  визначити методом екстраполяції.

Якщо у режимі S2 працює двигун, виготовлений для режиму S1, то його перегрів не досягає допустимого значення  $\tau_{\text{доп}}$ , двигун буде недовикористаний. Тому його можна використовувати з більшим навантаженням.

Відношення сумарних втрат в короткочасному режимі до втрат у номінальному тривалому режимі має назву коефіцієнта термічного перевантаження:

$$K_{\text{терм}} = \frac{\sum p_{\text{кор}}}{\sum p_{\text{ном}}}. \quad (10)$$

Позначимо через  $\tau'_{\text{кін}}$  – кінцевий, сталий перегрів при перевантаженні, тоді з урахуванням (3) рівняння (10) отримає вигляд:

$$K_{\text{терм}} = \frac{\tau'_{\text{кін}}}{\tau_{\text{доп}}}. \quad (11)$$

Оскільки при роботі з перевантаженням за час роботи  $t_p$  потрібно прагнути, щоб  $\tau'_{\text{кін}} \leq \tau_{\text{доп}}$ , то  $\tau_{\text{доп}} = \tau'_{\text{кін}} \left( 1 - e^{-\frac{t_p}{T_{\text{H}}}} \right)$ , тоді:

$$K_{\text{терм}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}}. \quad (12)$$

Якщо надано значення  $K_{\text{терм}}$ , то:

$$t_p = T_H \ln \frac{K_{\text{терм}}}{K_{\text{терм}} - 1}. \quad (13)$$

На практиці частіше користуються коефіцієнтом механічного перевантаження:

$$K_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (14)$$

де  $P_{\text{кор}}$  і  $P_{\text{ном}}$  – потужності відповідно у короткочасному і номінальному тривалому режимах.

У теорії електроприводу широко використовується відношення постійних і змінних (пропорційних квадрату струму) втрат  $\alpha = p_0 / p_{\text{ел.ном}}$ , причому  $K_{\text{терм}} = \left( \alpha + K_{\text{мех}}^2 \right) / (\alpha + 1)$ , тоді

$$K_{\text{мех}} = \sqrt{(1 + \alpha) K_{\text{терм}} - \alpha}. \quad (15)$$

Якщо  $\alpha \leq 0,3 \dots 0,4$ , то у першому наближенні величиною  $\alpha$  можна знехтувати, тоді рівняння (15) отримає вигляд:

$$K_{\text{мех}} = \sqrt{K_{\text{терм}}}. \quad (16)$$

Підставивши (12) у (16), а (16) у (14), одержимо:

$$P_{\text{кор}} = P_{\text{ном}} \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}}}. \quad (17)$$

3. В режимі S3 для повного використання двигуна, що призначений для режиму S1, потрібно запустити його в роботу з деяким перевантаженням. При великій кількості циклів температура двигуна у кінці паузи, тобто на початку роботи, буде  $\tau_{\text{п}}$ , а у кінці роботи (початку паузи) –  $\tau_{\text{доп}}$ . Тоді:

$$\tau_{\text{доп}} = \tau'_{\text{кін}} \left( 1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}} \right) + \tau_{\text{п}} e^{-\frac{t_p}{T_H}}. \quad (18)$$

Позначимо відношення часу роботи  $t_p$  до часу циклу  $t_{\text{ц}}=t_p+t_0$  через  $\xi=t_p/t_{\text{ц}}$ .

Для спрощення прийємо  $T_0=T_H$ , тоді процес охолодження за час паузи  $t_0$  можна записати рівнянням:

$$\tau_{\text{п}}=\tau_{\text{доп}}e^{-\frac{t_0}{T_H}}, \quad (19)$$

підставивши (19) у (18), отримаємо:

$$\tau_{\text{доп}}=\tau'_{\text{кін}}\left(1-e^{-\frac{t_p}{T_H}}\right)+\tau_{\text{доп}}e^{-\frac{t_{\text{ц}}}{T_H}}, \text{ або}$$

$$\tau_{\text{доп}}\left(1-e^{-\frac{t_{\text{ц}}}{T_H}}\right)=\tau'_{\text{кін}}\left(1-e^{-\frac{t_p}{T_H}}\right). \quad (20)$$

Отже, коефіцієнти термічного і механічного перевантаження відповідно дорівнюють:

$$K_{\text{терм}}=\frac{\tau_{\text{кін}}}{\tau_{\text{доп}}}=\frac{1-e^{-\frac{t_{\text{ц}}}{T_H}}}{1-e^{-\frac{t_p}{T_H}}}, \quad (21)$$

$$K_{\text{мех}}=\sqrt{\frac{1-e^{-\frac{t_{\text{ц}}}{T_H}}}{1-e^{-\frac{t_p}{T_H}}}}, \quad (22)$$

а допустима потужність двигуна у короткочасному режимі згідно (14):

$$P_{\text{пв}}=P_{\text{ном}}\sqrt{\frac{1-e^{-\frac{t_{\text{ц}}}{T_H}}}{1-e^{-\frac{t_p}{T_H}}}}. \quad (23)$$

Тривалість часу циклу у роботі приймається  $t_{\text{ц}}=10$  хвилин.

Якщо за час  $t_0$  погіршиться тепловіддача, то двигун призначений для режиму  $S1$ , тобто  $\xi=1$ , для деякого режиму ПВ з  $\xi_1$  обирається так, щоб у квазі

сталому режимі встановлювалась рівновага між теплотою яка виділяється та яка розсіюється.

Оскільки  $\frac{t_0}{t_{\text{ц}}} = \frac{t_{\text{ц}} - t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}} = 1 - \xi_1$ , то струм у тривалому режимі за потужністю,

що відповідає режиму ПВ:

$$I_{\infty} = I_{\text{ПВ}} \sqrt{\frac{\xi_1}{\beta_0(1-\xi_1)(\alpha+1) + \xi_1}} \leq I_{\text{НОМ}}. \quad (24)$$

З урахуванням раніше прийнятих спрощень, можна приймати приблизно:

$$I_{\infty} = I_{\text{ПВ}} \sqrt{\xi_1}. \quad (25)$$

### Програма та порядок виконання роботи

1.1. Зібрати схему для дослідження процесу нагрівання двигуна. Двигун працює на генератор постійного струму незалежного збудження, який навантажений на водяний реостат.

1.2. Визначити дослідним шляхом та збудувати криві нагрівання якоря двигуна при роботі його у тривалому режимі при  $K_{\text{н}} = 1; 1,25; 0,7$ .

1.3. Визначити дослідним шляхом та збудувати криві охолодження якоря двигуна: якір обертається, якір нерухомий (на різних робочих місцях).

1.4. Визначити у всіх випадках методом дотичних значення  $T_{\text{н}}$  і  $T_0$  та визначити значення  $\beta_0$  за формулою (6).

1.5. Розрахувати допустиму потужність (струм)  $P_{\text{кор}}$  у режимі  $S2$  за варіантами, наданими викладачем.

1.6. Визначити дослідним шляхом і побудувати криву нагрівання при роботі двигуна у режимі  $S2$  відповідно пункту 1.5. Тривалість досліду не повинна перевищувати заданий час короткочасного режиму.

1.7. Розрахувати допустиму потужність (струм)  $P_{\text{ПВ}}$  у режимі  $S3$  за варіантами, наданими викладачем.

1.8. Визначити дослідним шляхом і побудувати криву нагрівання при роботі двигуна у режимі  $S3$  згідно пункту 1.7.

1.9. Визначити  $\tau_{\text{кін}}$  у режимах  $S1$ ,  $S2$  і  $S3$  методом експерименту та графічного будування. Порівняти температуру перегріву за всіма режимами, пояснити їх різницю.

2.1. Виконання досліджень за пунктами 1.2, 1.6 і 1.8 повинно починатись при температурі обмоток двигуна рівній температурі навколишнього середовища, тобто при  $\tau_0 = 0$ .

2.2. Дані вимірювань зручно заносити в таблицю яка має наступний формат (табл. 2)

Таблиця 2

№ виміру	Час вимірювання	Дані вимірювань		Розрахункові дані	
		$I$	$U$	$r$	$\tau$
	хв	А	В	Ом	°С

### Контрольні запитання

1. Що таке тепловий режим електродвигуна? Від чого він залежить? Назвіть основні причини нагріву електродвигуна.
2. Які методи вимірювання температури використовуються для дослідження теплових режимів електродвигунів?
3. Як впливає температура навколишнього середовища на тепловий режим двигуна?
4. Охарактеризуйте режим роботи S1. Як змінюється температура обмоток електродвигуна в цьому режимі з часом?
5. Чому температура обмоток не зростає нескінченно, а стабілізується на певному рівні?
6. Як залежить температура усталеного режиму від навантаження двигуна?
7. Опишіть режим роботи S2. У чому його особливість?
8. Чому для двигуна, що працює в режимі S2, допускається більше навантаження, ніж у режимі S1?
9. Чи досягається усталений тепловий стан в режимі S2? Поясніть.
10. Які фактори визначають тепловий режим двигуна в режимі S3?
11. Що таке тривалість вмикання і як вона впливає на нагрів?
12. Що таке постійна часу нагрівання, охолодження двигуна і що вона характеризує?
13. Як проводиться експериментальне дослідження теплових режимів двигуна? Які прилади використовують?

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. \*Колб Ант. А. Теорія електроприводу: [навчальний посібник] / Ант. А. Колб, А.А. Колб – [2-е вид. перероб. і допов.]. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – 540с.

2. \*Теорія електропривода: Підручник / [Попович М.Г., Борисюк М.Г., Гаврилюк В.А. та ін.]; за ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993. – 494с.

\* - остання редакція базового видання

Навчально-методичне видання

**Устименко Дмитро Володимирович**  
**Балійчук Олексій Юрійович**

## **ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

Навчально-методичні рекомендації  
до виконання лабораторних робіт  
Частина 2

Електронне видання

Експертний висновок склав кандидат техн. наук, доцент  
Оксана МАРЕНИЧ

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 1.844 від 04.11.2025)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка О. Ю. Балійчук

Формат 60x84 <sup>1/16</sup>. Ум. друк. арк. 1,91. Обл.-вид. арк. 1,94.  
Зам. № 131

Видавець: Український державний університет науки і технологій  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 1201, м. Дніпро, 49010.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010