

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

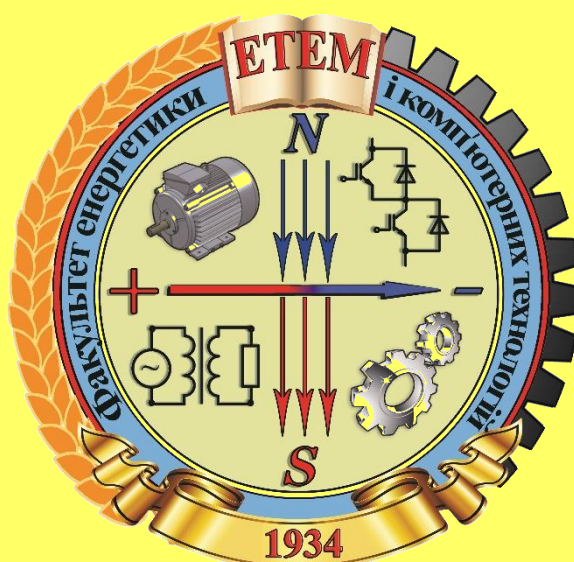
Кафедра «Електротехніка і електромеханіка  
імені професора В.В. Овчарова»

## ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

### РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ГАЛЬМУВАННІ

для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр»  
зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»



Мелітополь, 2020

УДК 621.3(075)

**Основи електропривода:** Методичні вказівки до практичної роботи «Розрахунок механічної характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при динамічному гальмуванні» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М.В. Постнікова, С.О. Квітка. – Мелітополь: ТДАТУ, 2020. – 32 с.

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

**Рецензент:** д.т.н., професор Діордієв Володимир Трифонович  
Таврійський державний агротехнологічний університет

Розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електротехніки і електромеханіки імені професора В.В. Овчарова  
Протокол №11 від 29 квітня 2020 р.

Затверджено методичною комісією факультету енергетики і комп'ютерних технологій ТДАТУ  
Протокол №10 від 27 травня 2020 р.

© Постнікова М.В.  
Квітка С.О.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
Розрахунок механічної характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при динамічному гальмуванні .....	5
1 Мета роботи .....	5
2 Завдання для самостійної роботи .....	5
3 Програма роботи .....	5
4 Основні теоретичні положення .....	6
5 Вихідні дані .....	21
6 Приклад розрахунку .....	21
7 Вказівки щодо оформлення звіту .....	28
8 Контрольні питання .....	28
9 Список літератури .....	29
10 Критерії оцінювання практичної роботи .....	29
ДОДАТОК А Зразок оформлення титульного аркушу звіту з практичної роботи .....	31
ДОДАТОК Б Паспортні дані і параметри схеми заміщення Г-подібної схеми заміщення АД з короткозамкненим ротором .....	32

## ВСТУП

Навчальна дисципліна «Основи електропривода» є профілюючою навчальною дисципліною за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» у закладах вищої освіти III - IV рівнів акредитації при підготовці фахівців ступеня вищої освіти «Бакалавр».

На практичному занятті студент повинен закріпити одержані теоретичні знання і набути практичних навичок з розрахунку електроприводів.

При виконанні практичних робіт з основ електропривода студент повинен самостійно вирішувати практичні інженерні задачі, вміти розраховувати механічну характеристику асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при динамічному гальмуванні.

Одержавши графік виконання практичних робіт з дисципліни, студент самостійно готується до кожної з них, вивчаючи відповідні розділи теоретичного матеріалу.

Перед виконанням практичної роботи викладач перевіряє готовність студента за темою практичного заняття, використовуючи контрольні питання, які приводяться в практичній роботі. Лише після перевірки викладачем ступеня підготовки студента до заняття, студент може виконувати практичну роботу.

Для роботи студент отримує варіант індивідуального завдання і необхідну нормативно-довідкову літературу. Студент самостійно виконує розрахунки відповідно до теми практичного заняття.

Після виконання необхідних розрахунків студент складає звіт по роботі, який вміщує всі фактичні дані (схеми, таблиці, графіки) та аналіз результатів розрахунку.

В кінці заняття студент повинен представити викладачу результати індивідуальної роботи за темою практичного заняття, при необхідності внести необхідні виправлення та одержати бали від викладача за свою роботу.

*Практична робота*  
**РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО  
ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ  
ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ГАЛЬМУВАННІ**

### **1 Мета роботи**

Засвоєння студентами методики розрахунку механічної характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при динамічному гальмуванні.

### **2 Завдання для самостійної роботи**

2.1 Опрацювати теоретичний матеріал: природні та штучні механічні характеристики асинхронного двигуна, їх розрахунок і побудова [1, с. 87-94; 2, с. 38-44; 4, с. 82-98].

2.2 Опрацювати теоретичний матеріал: гальмівні режими трифазних асинхронних двигунів [1, с. 94-98; 2, 44-47; 3, с. 82-88; 5, с. 54-60; 6, с. 96-104].

2.3 Відповісти на контрольні питання.

### **3 Програма роботи**

3.1 Накреслити схему підключення постійного струму до обмотки статора електродвигуна і діаграму магніторушійних сил (МРС).

3.2 Визначити струм холостого ходу електродвигуна в іменованих і відносних одиницях, якщо відомі параметри Г-подібної схеми заміщення електродвигуна.

3.3 Визначити величину еквівалентного струму і постійного струму від випрямляча при динамічному гальмуванні.

3.4 Визначити значення максимального моменту і максимального ковзання при динамічному гальмуванні.

3.5 Визначити значення моментів динамічного гальмування для різних значень ковзання і побудувати графік механічної характеристики при динамічному гальмуванні.

#### 4 Основні теоретичні положення

Для асинхронних двигунів застосовують такі способи гальмування: рекуперативне, противмиканням та динамічне гальмування із збудженням постійним або змінним струмом.

Щоб створити режим динамічного гальмування асинхронного двигуна із збудженням постійним струмом, необхідно вимкнути двигун із мережі змінного струму і увімкнути його в мережу постійного струму за однією із схем, зображених на рисунку 1, обмеживши постійний струм до значення  $I_{\text{пост}} = (3-4)I_{\text{х.х.}}$ , де  $I_{\text{х.х.}}$  – струм холостого ходу двигуна, А.

Найпростішою є схема фрагмента *а*), де для перемикання на постійний струм необхідна найменша кількість комутаційних апаратів, недолік – навантаження окремих фаз нерівномірне. Схема фрагмента *б*) має більшу кількість контакторів, але навантаження більш рівномірне. Рівномірним симетричним навантаженням буде за схемою фрагмента *в*), але вона потребує найбільшу кількість контакторів. У реальних умовах найчастіше використовується схема *а*) із-за її простоти.

При динамічному гальмуванні постійний струм, що проходить в обмотці статора, створює нерухоме в просторі магнітне поле, в якому обертається ротор двигуна. В обмотці ротора наводиться електрорушійна сила (ЕРС), під дією якої в замкненому колі цієї обмотки виникає змінний струм. При взаємодії струму ротора з нерухомим магнітним полем статора створюється гальмівний момент. Коли кутова швидкість ротора знижується до нуля, ЕРС, струм в обмотці ротора і гальмівний момент також зменшуються до нуля. Після зупинки ротора двигун вимикають.

В таблицях 1-5 представлені різні схеми вмикання обмоток статора при живленні їх від джерела постійного струму, а також відповідні до цієї схеми:

– векторна діаграма просторового додавання намагнічуючих сил фаз статора. При цьому припущено, що число послідовно з'єднаних витків в фазі складає  $W_1$ ;

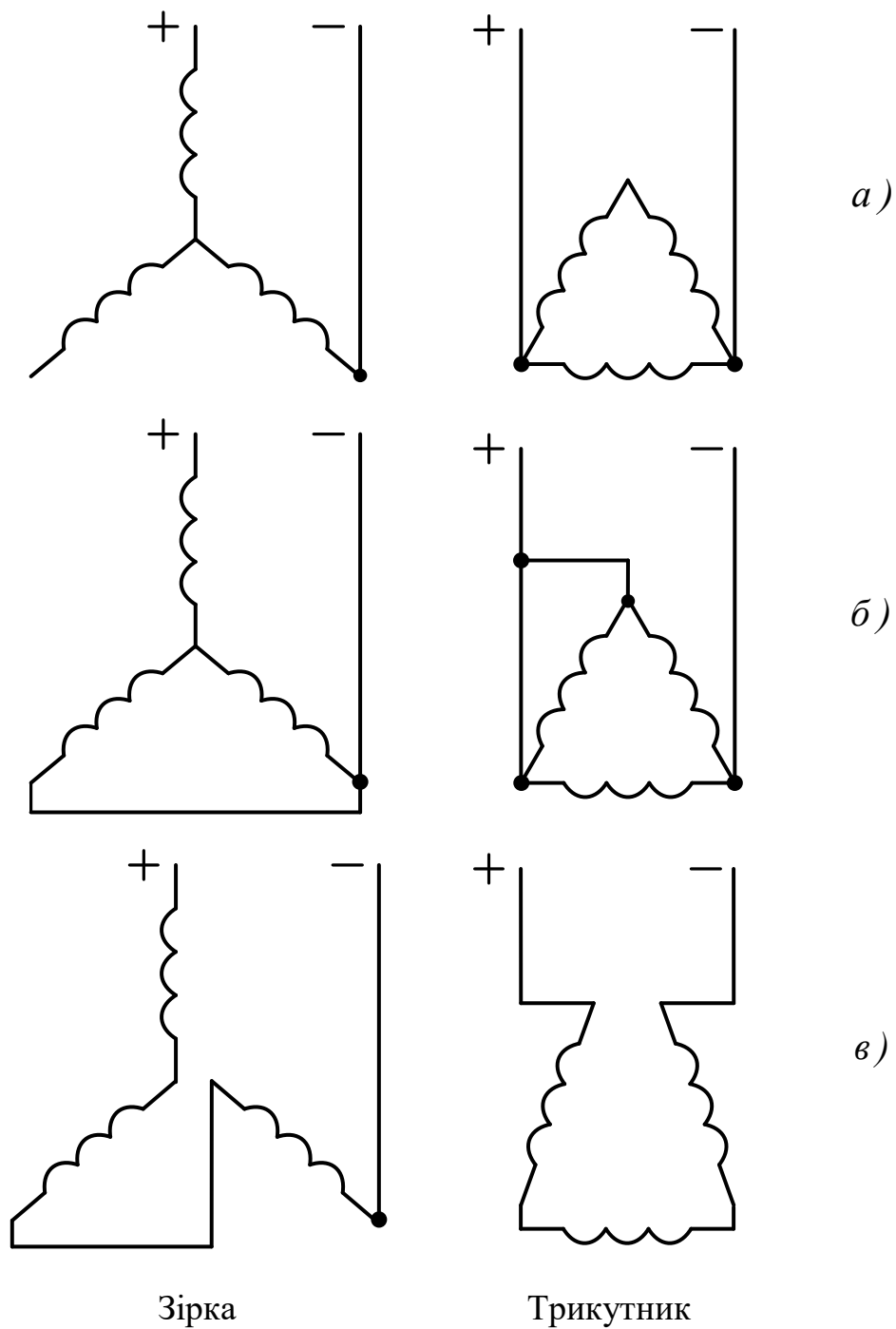
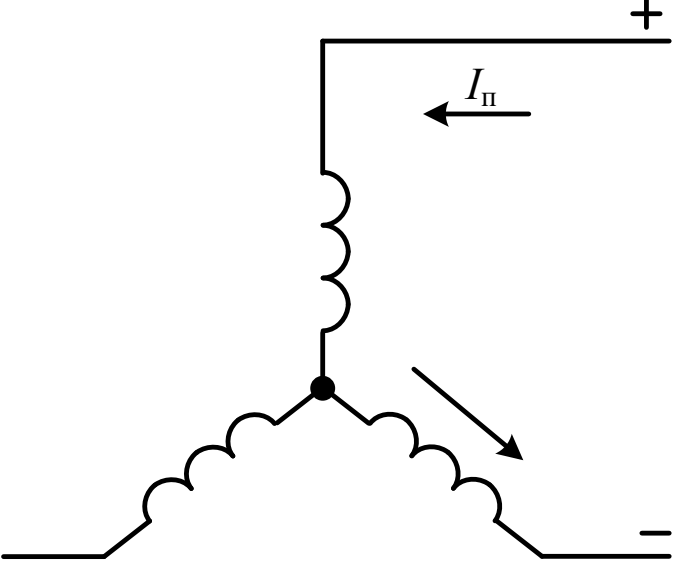
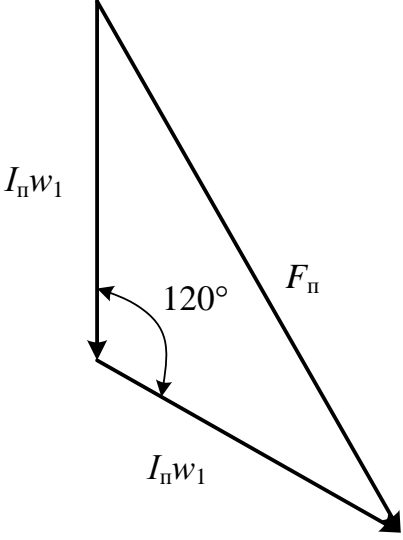


Рисунок 1 – Схеми вмикання обмотки статора АД на постійну напругу:  
*a)* – несиметрична схема, *б)* – напівсиметрична схема, *в)* – симетрична схема

– значення магніторушійної сили  $F_{\Pi}$ , яка створюється обмоткою статора при живленні постійним струмом, пропорційна постійному струму  $I_{\Pi}$ , числу витків фази статора  $w_1$  і залежить від схеми з'єднання;

Таблиця 1

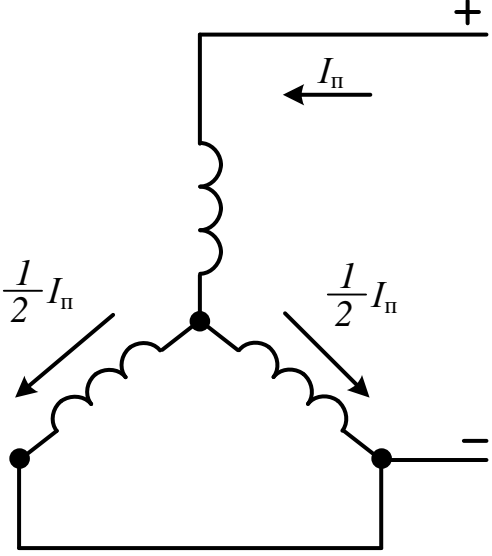
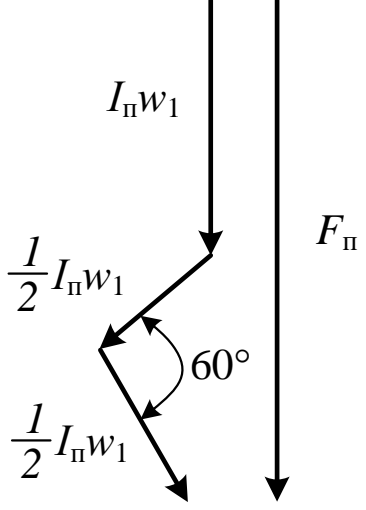
Схема 1	Векторна діаграма схеми 1
	
Магніторухійна сила обмотки статора	$F_{II} = I_{II} \cdot w_1 \cdot \sqrt{3}$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{II}$	$I_{екв} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_{II}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{II}$	$I_{II} = 1,22 \cdot I_{екв}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{II} = 2R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{екв}$	$U_{II} = 2,44 \cdot I_{екв} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{екв}$	$P_{II} = 3 \cdot I_{екв}^2 \cdot R_1$

– значення діючого еквівалентного трифазного змінного струму  $I_{екв}$ , необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора  $F_{II}$  ;

– значення постійного струму  $I_{II}$ , необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора  $F_{II}$  ;



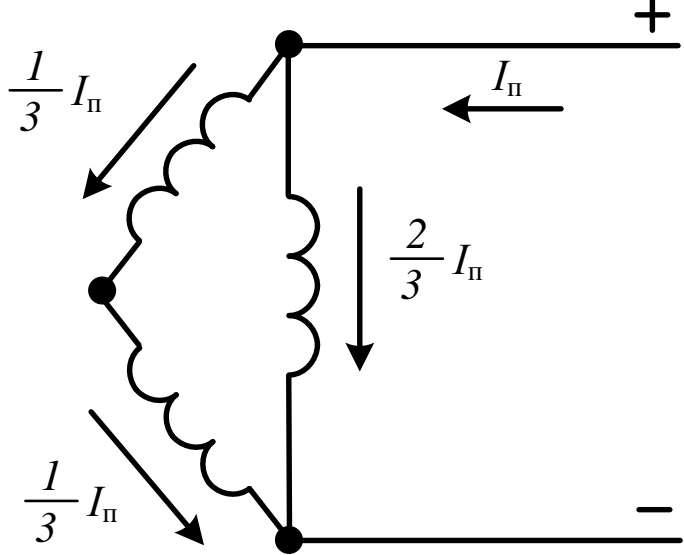
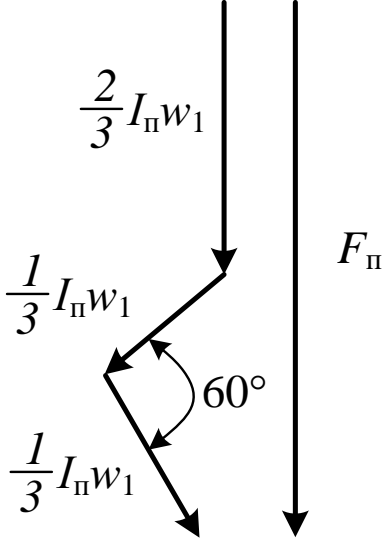
Таблиця 2

Схема 2	Векторна діаграма схеми 2
	
Магніторушійна сила обмотки статора	$F_{II} = I_{II} \cdot w_1 \cdot \frac{3}{2}$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{II}$	$I_{екв} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot I_{II}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{II}$	$I_{II} = 1,41 \cdot I_{екв}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{II} = 1,5R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{екв}$	$U_{II} = 2,12 \cdot I_{екв} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{екв}$	$P_{II} = 3 \cdot I_{екв}^2 \cdot R_1$

– величина опору  $R_{II}$  постійному струму обмотки статора;

– величина напруги  $U_{II}$  постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму  $I_{екв}$ ;

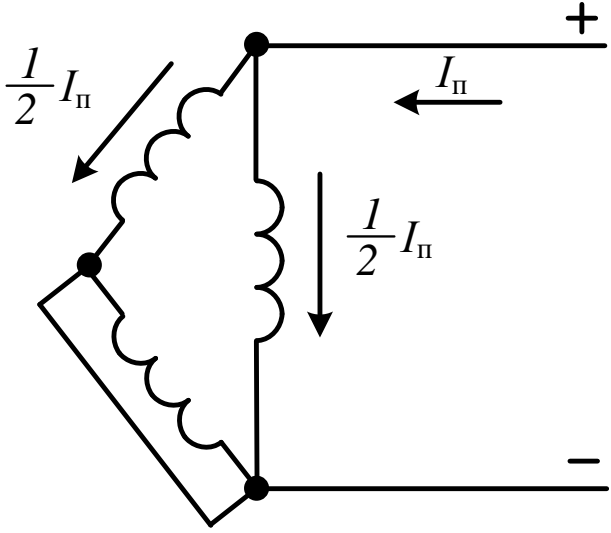
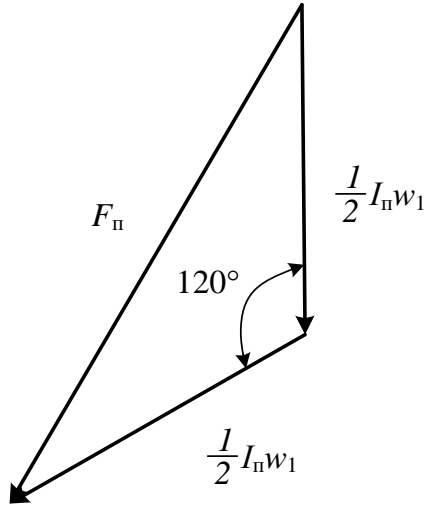
Таблиця 3

Схема 3	Векторна діаграма схеми 3
	
Магніторухійна сила обмотки статора	$F_{II} = I_{II} \cdot w_1$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{II}$	$I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot I_{II}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{II}$	$I_{II} = 2,12 \cdot I_{\text{екв}}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{II} = \frac{2}{3} R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$U_{II} = 1,41 \cdot I_{\text{екв}} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$P_{II} = 3 \cdot I_{\text{екв}}^2 \cdot R_1$

– величина потужності  $P_{II}$  постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму  $I_{\text{екв}}$ .

Для всіх схем, крім схеми 5, струм  $I_{\text{екв}}$  еквівалентний постійному не тільки за величиною намагнічуючої сили, але і за потужністю, що втрачається в опорах обмотки статора. Для схеми 5 ця потужність більша, ніж у схемах 1-4, і

Таблиця 4

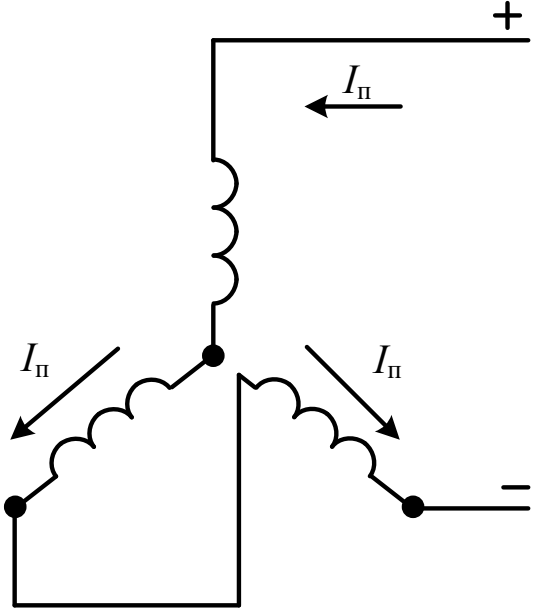
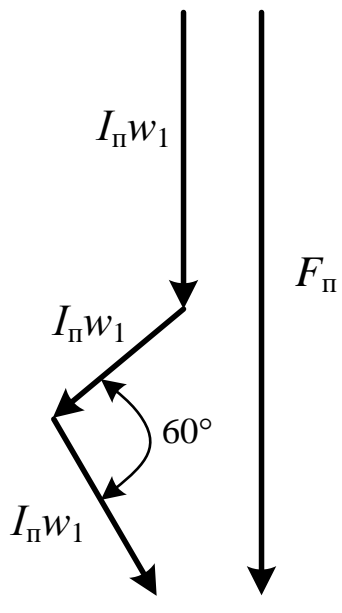
Схема 4	Векторна діаграма схеми 4
	
Магніторухійна сила обмотки статора	$F_{II} = I_{II} \cdot w_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{II}$	$I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{2\sqrt{3}} \cdot I_{II}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{II}$	$I_{II} = 2,45 \cdot I_{\text{екв}}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{II} = \frac{1}{2} R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$U_{II} = 1,22 \cdot I_{\text{екв}} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$P_{II} = 3 \cdot I_{\text{екв}}^2 \cdot R_1$

тому вона, з точки зору втрат потужності, є найбільш не вигідною, тоді як схеми 1-4 з цієї точки зору є рівноцінними і більш вигідними.

Динамічне гальмування АД може здійснюватися двома способами:

- динамічне гальмування при незалежному збудженні;
- динамічне гальмування при самозбудженні.

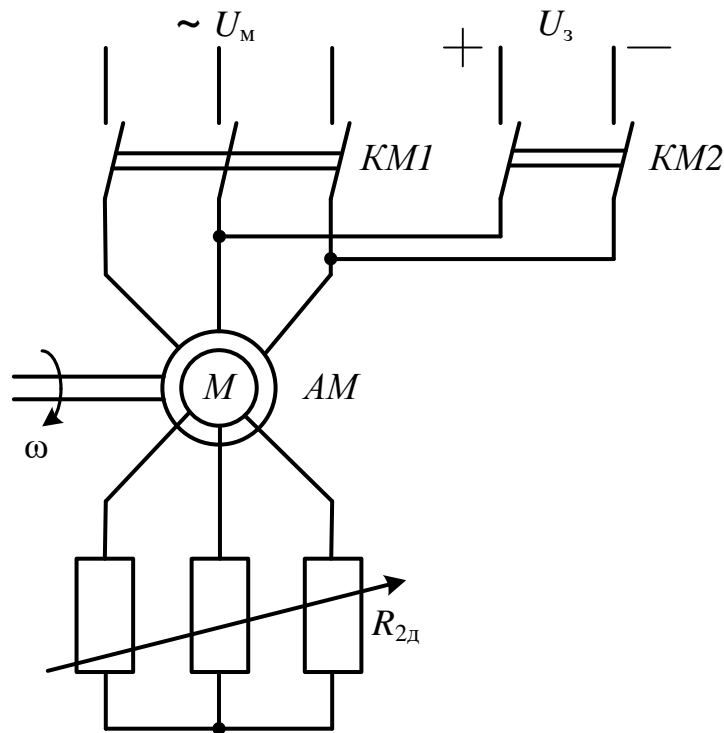
Таблиця 5

Схема 5	Векторна діаграма схеми 5
	
Магніторухійна сила обмотки статора	$F_{\Pi} = I_{\Pi} \cdot w_1 \cdot 2$
Діюче значення еквівалентного трифазного змінного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{\Pi}$	$I_{\text{екв}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot I_{\Pi}$
Значення постійного струму, необхідного для забезпечення заданої величини намагнічуючої сили обмотки статора $F_{\Pi}$	$I_{\Pi} = 1,05 \cdot I_{\text{екв}}$
Величина опору обмотки статора постійному струму	$R_{\Pi} = 3R_1$
Величина напруги постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$U_{\Pi} = 3,18 \cdot I_{\text{екв}} \cdot R_1$
Величина потужності постійного струму, необхідна для забезпечення заданої величини еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$	$P_{\Pi} = 3,37 \cdot I_{\text{екв}}^2 \cdot R_1$

Якщо динамічне гальмування АД здійснювати за класичною схемою, то при відмиканні АД від мережі і замиканні кола статора, двигун буде розвивати дуже малий гальмівний момент (малою буде ЕРС, оскільки вона буде викликана тільки залишковим намагнічуванням, бо основний магнітний потік

АД створюється реактивним струмом статора при живленні його від мережі, а статор знеструмлений).

Для створення належного гальмівного моменту слід створити при цьому магнітний потік, подавши у коло статора на період гальмування, постійний струм, тобто штучно створити на час гальмування незалежне збудження. У загальному вигляді схема гальмування при незалежному збудженні показана на рисунку 2.



*KM1* замкнений, *KM2* розімкнений – режим двигуна АД;

*KM1* розімкнений, *KM2* замкнений – режим динамічного гальмування АД

Рисунок 2 – Схема динамічного гальмування АД при незалежному збудженні:

Якщо при цьому АД буде не короткозамкнений, а фазний, то у коло ротора вмикається додатковий активний опір  $R_{2д}$ , при регулюванні якого можна обмежувати струм ротора і змінювати параметри гальмування. Таким вмиканням АД перетворюється у синхронний генератор з неявно вираженими полюсами, що працює при змінній частоті, навантаженням для якого є струм ротора.

При живленні постійним струмом обмотка статора буде мати значно менший опір ніж при живленні змінним струмом, оскільки опір при живленні постійним струмом має тільки активну складову (а змінним – активну та індуктивну складові). За цих умов напруга збудження  $U_3$  суттєво менша напруги живлення  $U_1$  змінним струмом. Джерелом незалежного збудження при динамічному гальмуванні АД найчастіше використовується статичний випрямляч  $VD$ , що живиться від знижувального трансформатора  $TH$ , в основному  $VD$  і  $TH$  нерегульовані (рисунок 3).

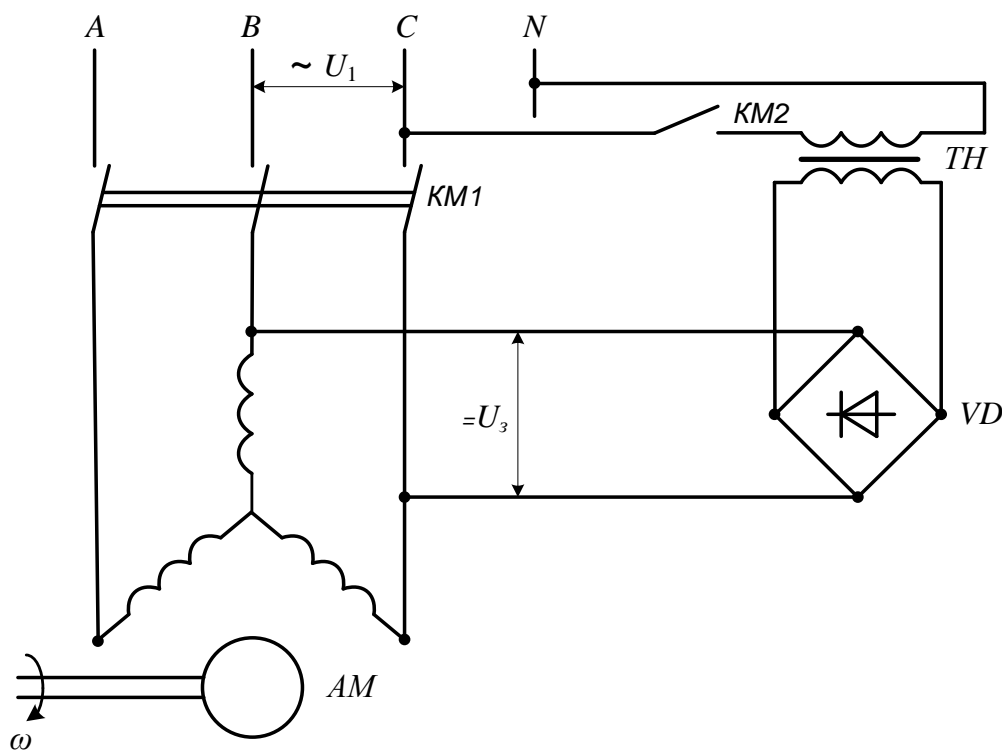


Рисунок 3 – Схема живлення обмотки статора АД при динамічному гальмуванні з незалежним збудженням

Механічні характеристики цього гальмівного режиму розташовані у 2-му квадранті, за формою нагадують механічні характеристики режиму двигуна (рисунок 4).

Усі характеристики виходять з однієї точки 0 ( $\omega = 0, S = 1$ ) оскільки при швидкості рівній нулю і  $M = 0$ .

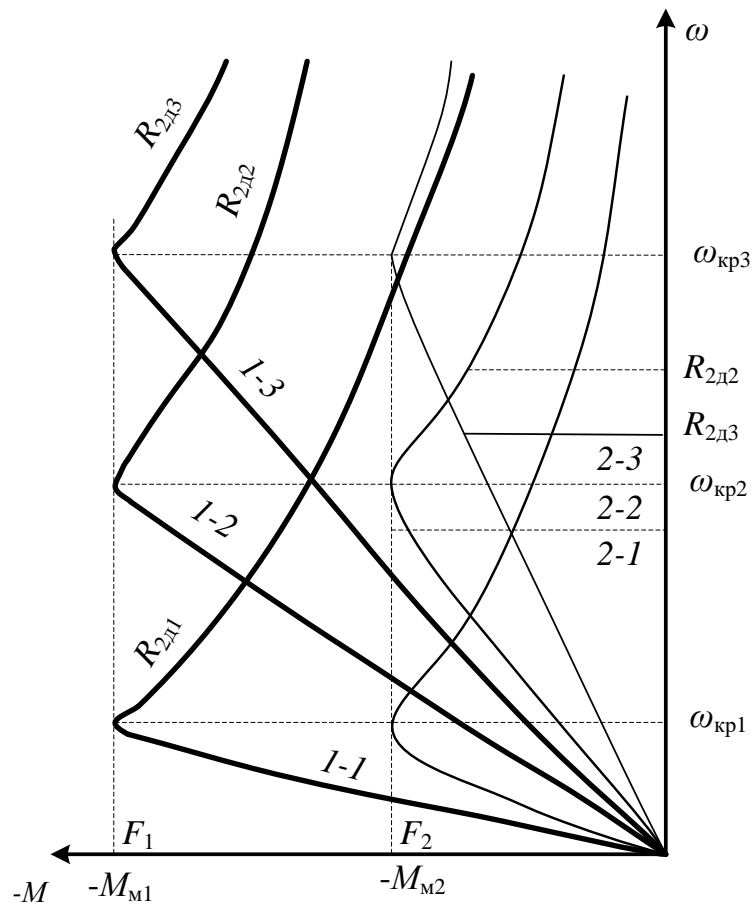


Рисунок 4 – Механічні характеристики динамічного гальмування АД при незалежному збудженні

Характеристики зображені для двох значень магніторушійної сили (МРС) статора  $F_1$  та  $F_2$  і для трьох значень активного опору в колі ротора, відповідно для  $R_{2д1}(\omega_{к1})$ ,  $R_{2д2}(\omega_{к2})$  та  $R_{2д3}(\omega_{к3})$ .

Величина максимального моменту гальмування  $M_m$  не залежить від величини опору якірного кола, а залежить від величини МРС статора ( $M_{м1}$  для  $F_1$  і  $M_{м2}$  для  $F_2$ ). Величина критичної швидкості (критичного ковзання), навпаки, однакова для одного й того ж значення активного опору ротора незалежно від величини МРС статора.

Схожість механічних характеристик гальмівного та двигунного режимів є тільки зовнішньою. Кількісні ж розбіжності їх суттєві. Так при одному і тому ж активному опорі ротора критичне ковзання у режимі двигуна значно більше

критичного ковзання динамічного гальмування, оскільки у режимі динамічного гальмування змінний струм обмотки статора відсутній, значить відсутній і індуктивний опір  $X_1$ , а є тільки індуктивний опір намагнічування  $X_\mu$ , який  $X_1 \gg X_\mu$ . Тоді

$$S_{\text{к(двиг)}} = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2}, \text{ а } S_{\text{м(д.г.)}} = \frac{R'_2}{X_\mu + X'_2}, S_{\text{к(двиг)}} > S_{\text{м(д.г.)}}.$$

Друга відмінність: у режимі двигуна МРС АД оберտальна, а в гальмівному – МРС нерухома.

Третя відмінність: струм статора у режимі двигуна змінний, він є функцією ковзання, а при динамічному гальмуванні при незалежному збудженні струм статора постійний.

Четверта відмінність: у режимі двигуна всі характеристики починаються з точки максимальної швидкості режиму двигуна – синхронної ( $\omega = \omega_0, S = 0$ ), а у гальмівному – з точки мінімальної швидкості ( $\omega = 0, S = 1$ ).

Динамічне гальмування з незалежним збудженням широко використовується в електроприводах (особливо у вантажопідйомних машинах).

#### *Динамічне гальмування при самозбудженні*

Це гальмування реалізується наступним чином: до кола статора підключається конденсатор, рисунок 5. Тому це гальмування ще називають конденсаторним. Використовується таке гальмування головним чином для АД з короткозамкненим ротором.

Для реалізації конденсаторного гальмування у відповідності до схеми, досить відключити лінійний контактор *КМ*. В цьому випадку машина працює самозбудженим асинхронним генератором. Поштовх для самозбудження дає ЕРС, яка індуктується в обмотках статора за рахунок обертання ротора (під дією накопиченої механізмом потенційної або кінетичної енергії), що має незначну ЕРС залишкового намагнічування. Незначна ЕРС залишкових процесів, що прикладена до конденсатора, обумовлює незначний струм статорного кола.



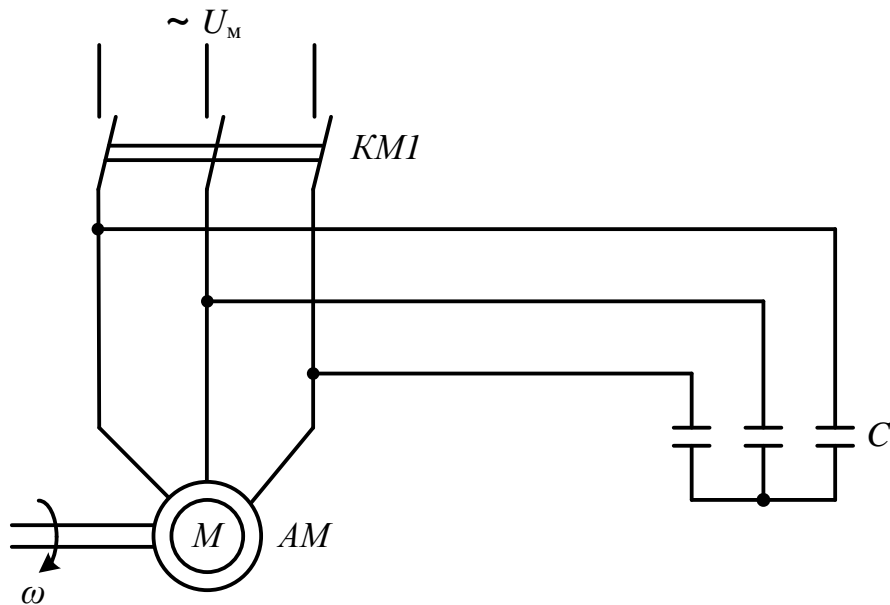


Рисунок 5 – Схема динамічного гальмування АД при самозбудженні

Цей струм створює незначне обертальне магнітне поле, яке збільшує ЕРС статора, збільшується напруга на конденсаторі, збільшується струм, збільшується гальмівний момент. У подальшому цей процес нарощується і йде до тих пір, поки напруга на затискачах двигуна і на затискачах конденсатора не зрівняється.

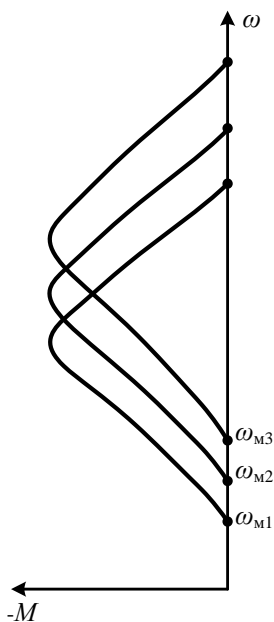


Рисунок 6 – Механічні характеристики динамічного гальмування АД при самозбудженні

Механічні характеристики динамічного гальмування з самозбудженням (рисунок 6) показані для трьох значень ємності конденсатора.

Зі зменшенням ємності максимум гальмівного моменту зміщується у зону більших швидкостей і збільшується його абсолютне значення. Вадами такого гальмування є наявність так званої, мертвої зони у межах якої гальмівний момент не створюється.

Зі зменшенням ємності критична швидкість  $\omega_M$  цієї зони нечутливості збільшується. Величина критичної швидкості досить значна і сягає десь  $\omega_M \approx 0,3\omega_H$ . Крім того, для зменшення зони нечутливості необхідно збільшувати ємність, що призводить до збільшення вартості.

Перевагою динамічного гальмування з самозбудженням є відсутність потреби в джерелі живлення при гальмуванні.

Аналіз роботи асинхронного двигуна в режимі роботи динамічного гальмування доцільно провести, рахуючи, що статор живиться не постійним, а еквівалентним трифазним змінним струмом  $I_{\text{екв}}$ . Ця заміна передбачає рівність магніторушійних сил (МРС), створених постійним струмом і еквівалентним змінним струмом. Амплітуда МРС, створена змінним струмом дорівнює

$$F = \frac{3\sqrt{2}}{2} \cdot I_{\text{екв}} \cdot w_1, \quad (1)$$

де  $w_1$  – число послідовно з'єднаних витків фази статора.

Магніторушійна сила, створена постійним струмом, пропорційна постійному струму, числу витків фази статора і залежить від схеми з'єднання. Наприклад, при з'єднанні статора в «зірку» і проходженні постійного струму тільки по двом фазам (схема 1, таблиця 1) МРС постійного струму, визначена геометричною сумою МРС двох фаз, дорівнює

$$F_{\text{п}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{п}} \cdot w_1. \quad (2)$$

Виходячи з рівності  $F_{\text{п}} = F$ , можна визначити значення еквівалентного змінного струму для даної схеми з'єднання обмоток статора

$$I_{\text{екв}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\text{п}}. \quad (3)$$

Електромагнітний момент, який розвиває електродвигун, визначається за виразом

$$M = \frac{3I_2'^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S} = \frac{3I_{\text{екв}}^2 \cdot X_{\mu}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \left[ \left( \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_{\mu} + X_2')^2 \right] \cdot S}. \quad (4)$$

Якщо припустити в першому наближенні машину ненасиченою, то в (4)  $X_{\mu} = const$  і момент  $M$  буде функцією ковзання  $S$ , так як інші параметри приймаються постійними, тому після диференціювання рівняння (4) можна отримати максимальне значення ковзання

$$S_{\text{м(д.г.)}} = \frac{R'_2}{X_{\mu} + X'_2}, \quad (5)$$

при якому момент має максимум

$$M_{\text{м(д.г.)}} = \frac{3I_{\text{екв}}^2 \cdot X_{\mu}^2}{2\omega_0 \cdot (X_{\mu} + X'_2)}. \quad (6)$$

Так як в реальних умовах двигун при роботі в режимі динамічного гальмування з малими ковзаннями насичена, а при великих не насичена, то зміна постійного струму спричиняє сильні зміни моменту в області великих ковзань і відносно невеликі зміни в області малих ковзань.

З достатньою для інженерних розрахунків точністю для розрахунку максимального моменту і відповідного йому максимального ковзання при динамічному гальмуванні асинхронного двигуна користуються кривими (рисунок 7), для різних значень відносного еквівалентного струму

$$i_{\text{екв}} = \frac{I_{\text{екв}}}{I_0} \quad (7)$$

дані залежності величини  $D_{\text{м}}$

$$D_{\text{м}} = M_{\text{м}} \cdot \frac{\omega_0}{3 \cdot I_0 \cdot U_{1\phi}}, \quad (8)$$

яка пропорційна моменту, від величини  $A_{\text{м}}$

$$A_{\text{м}} = S_{\text{м}} \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_0 \cdot R'_2}, \quad (9)$$

яка пропорційна ковзанню.

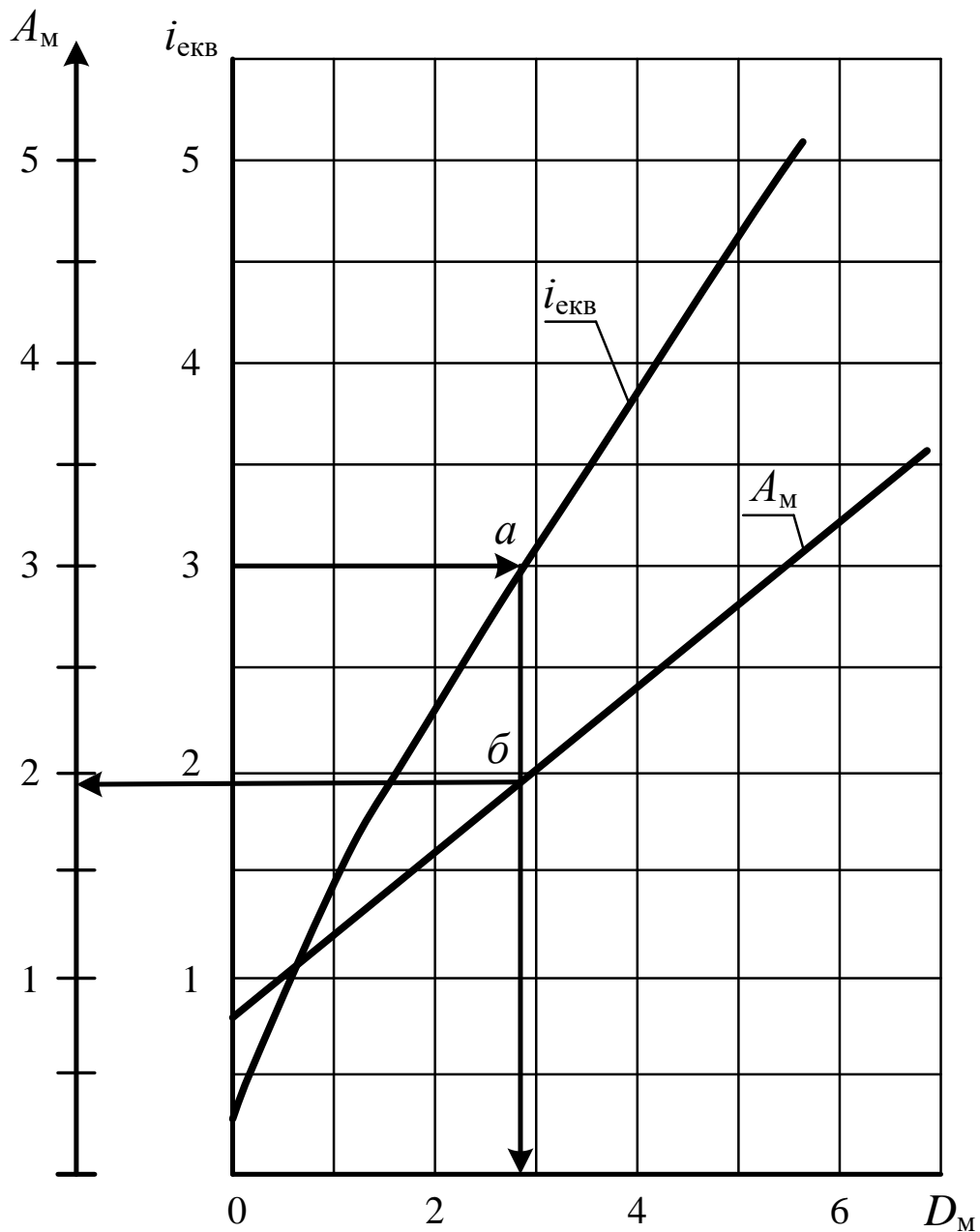


Рисунок 7 – Криві для розрахунку максимального моменту і відповідного ковзання при динамічному гальмуванні асинхронного електродвигуна

Користуючись рисунком 7 визначають величини  $A_M$  та  $D_M$  наступним чином. Значення еквівалентного струму у відносних одиницях слід відкласти по вертикальній осі і провести горизонтальну лінію до перетину з лінією еквівалентного струму в точці  $a$ . З точки  $a$  опустити перпендикуляр на ось  $D_M$ . Записати значення  $D_M$ . Перпендикуляр з точки  $a$  перетинає лінію  $A_M$  в точці  $б$ . З точки  $б$  провести горизонтальну лінію на ось  $A_M$ . Записати значення  $A_M$ .

Механічну характеристику асинхронного двигуна в режимі електродинамічного гальмування розраховують за рівнянням, отриманим після перетворення (4)

$$M = \frac{2M_M}{\frac{S}{S_M} + \frac{S_M}{S}}, \quad (10)$$

де  $M_M$  – максимальний момент при динамічному гальмуванні, Н·м;

$S_M$  – максимальне ковзання при динамічному гальмуванні, в.о.

## 5 Вихідні дані

Вихідні дані для виконання практичного заняття за варіантами наведені в додатку Б.

## 6 Приклад розрахунку

На підприємстві в рамках задачі підвищення продуктивності обладнання вирішено застосувати динамічне гальмування для швидкої зупинки асинхронного електропривода. Визначити необхідний постійний струм для динамічного гальмування та побудувати механічну характеристику при динамічному гальмуванні.

6.1 Для асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором записуємо паспортні дані і параметри схеми заміщення Г-подібної схеми заміщення АД з короткозамкненим ротором (таблиця 6).

Таблиця 6 – Паспортні дані і параметри схеми заміщення Г-подібної схеми заміщення АД з короткозамкненим ротором (додаток Б)

Варіант	Типорозмір електродвигуна	$P_H$ , кВт	$I_H$ , А	$S_H$ , в.о.	$\omega_0$ , рад/с	$X_\mu$ , Ом	$\mu_k$ , в.о.	$S_k$ , в.о.	$R'_2$ , Ом	$i_{\text{екв}}$ , в.о.	$\mu_{\text{п}}$ , в.о.	$\mu_{\text{мін}}$ , в.о.
30	4A180M6У3	18,5	36,6	0,024	104,7	17,4	2,0	0,135	0,156	4,5	1,2	1,0

В таблиці 6 позначено:

$P_H$  – номінальна потужність електродвигуна, кВт;

$I_H$  – номінальний струм електродвигуна, А;

$S_H$  – номінальне ковзання, в.о.;

$\omega_0$  – синхронна кутова швидкість електромагнітного поля, рад/с;

$X_\mu$  – індуктивний опір намагнічування, Ом;

$\mu_k$  – кратність максимального моменту, в.о.;

$S_k$  – критичне ковзання, в.о.;

$R'_2$  – приведений активний опір ротора, Ом;

$i_{\text{екв}}$  – кратність еквівалентного струму, в.о.;

$\mu_{\text{п}}$  – кратність пускового моменту, в.о.;

$\mu_{\text{мін}}$  – кратність мінімального моменту, в.о.

6.2 Накреслити схему підключення постійного струму до обмотки статора електродвигуна при схемі з'єднання «зірка» і діаграму магніторушійних сил (МРС) (рисунок 8).

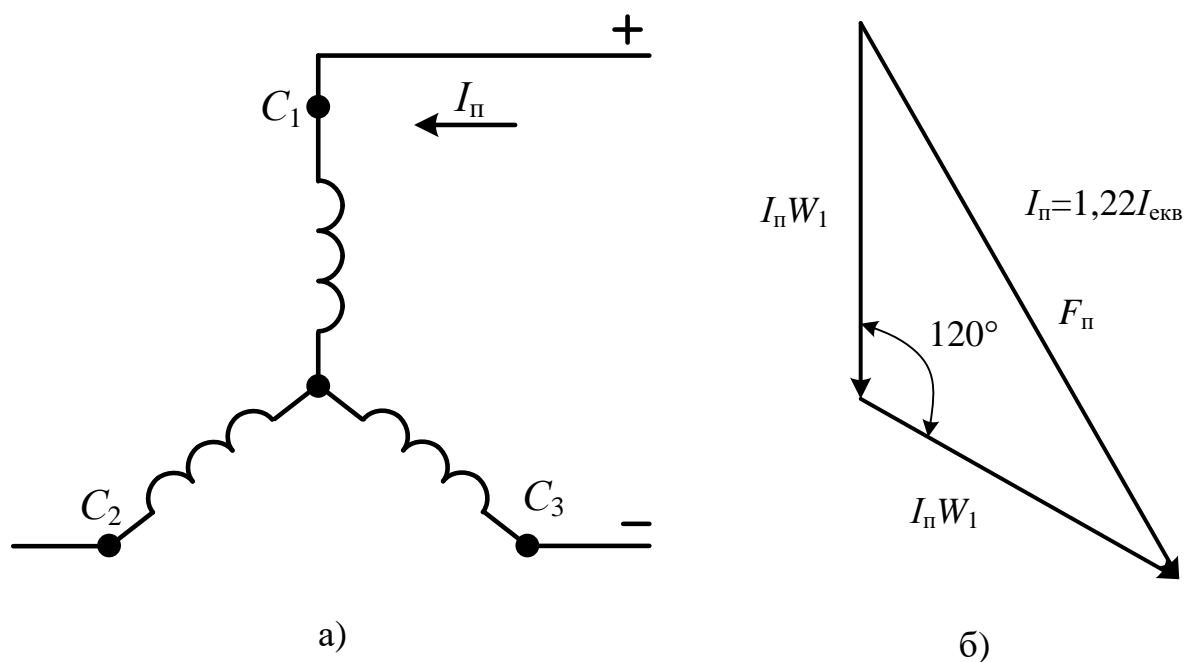


Рисунок 8 – Схема підключення постійного струму до обмотки статора двигуна при схемі з'єднання «зірка» (а) і діаграма магніторушійних сил (МРС) (б)

6.3 Визначити струм холостого ходу електродвигуна в іменованих і відносних одиницях, якщо відомі параметри Г-подібної схеми заміщення електродвигуна.

Визначаємо струм холостого ходу електродвигуна в іменованих одиницях за формулою

$$I_0 = \frac{U_{1\phi}}{X_\mu},$$

де  $U_{1\phi}$  – фазна напруга, В;

$X_\mu$  – індуктивний опір намагнічування, Ом. Згідно завдання  $X_\mu = 17,4$  Ом.

$$I_0 = \frac{220}{17,4} = 12,64 \text{ А.}$$

Визначаємо струм холостого ходу електродвигуна у відносних одиницях за формулою

$$i_0 = \frac{I_0}{I_H},$$

де  $I_H$  – номінальний струм електродвигуна, А. Згідно завдання  $I_H = 36,6$  А.

$$i_0 = \frac{12,64}{36,6} = 0,35 \text{ в.о.}$$

6.4 Визначити величину еквівалентного струму і постійного струму від випрямляча при динамічному гальмуванні.

Визначаємо еквівалентний струм за формулою

$$I_{\text{екв}} = i_{\text{екв}} \cdot I_0,$$

де  $i_{\text{екв}}$  – кратність еквівалентного струму, в.о. Згідно завдання  $i_{\text{екв}} = 4,5$  в.о.

$$I_{\text{екв}} = 4,5 \cdot 12,64 = 56,88 \text{ А.}$$

Постійний струм, що протікає по обмоткам електродвигуна при динамічному гальмуванні дорівнює (таблиця 1)

$$I_{\text{пост}} = 1,22 \cdot I_{\text{екв}};$$

$$I_{\text{пост}} = 1,22 \cdot 56,88 = 69,39 \text{ А.}$$

6.5 Визначити значення максимального моменту і максимального ковзання при динамічному гальмуванні.

Значення максимального моменту та максимального ковзання при динамічному гальмуванні знаходимо за наступними формулами

$$M_{\text{м}} = \frac{3 \cdot I_0 \cdot U_{1\phi}}{\omega_0} \cdot D_{\text{м}};$$

$$S_{\text{м}} = \frac{I_0 \cdot R'_2}{U_{1\phi}} \cdot A_{\text{м}},$$

де  $D_{\text{м}}$  – величина, пропорційна максимальному моменту;

$A_{\text{м}}$  – величина, пропорційна максимальному ковзанню;

$\omega_0$  – синхронна кутова швидкість електромагнітного поля, рад/с. Згідно

завдання  $\omega_0 = 104,7$  рад/с;

$R'_2$  – приведений активний опір ротора, Ом. Згідно завдання  $R'_2 = 0,156$  Ом.

Користуючись рисунком 7 визначаємо величини  $A_{\text{м}}$  та  $D_{\text{м}}$ :

$$D_{\text{м}} = 4,8; \quad A_{\text{м}} = 2,75.$$

Отже,

$$M_{\text{м}} = \frac{3 \cdot 12,64 \cdot 220}{104,7} \cdot 4,8 = 382,46 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$S_{\text{м}} = \frac{12,64 \cdot 0,156}{220} \cdot 2,75 = 0,025 \text{ в.о.}$$

6.6 Визначити значення моментів динамічного гальмування для різних



значень ковзання і побудувати графік механічної характеристики при динамічному гальмуванні.

Задаючи значення ковзання  $S_{д.г.}$  від 0 до 1, визначаємо момент при динамічному гальмуванні за спрощеною формулою Клосса

$$M_{д.г.} = \frac{2M_M}{\frac{S_i}{S_M} + \frac{S_M}{S_i}}$$

Результати розрахунків зводимо в таблицю 7.

Таблиця 7 – Результати розрахунків механічної характеристики асинхронного електродвигуна при динамічному гальмуванні

Розрахункова формула	Параметри при ковзанні						
	$0,5S_M$	$S_M$	$2S_M$	$4S_M$	$8S_M$	$16S_M$	1
$S_i / S_M$	0,5	1	2	4	8	16	40
$S_M / S_i$	2	1	0,5	0,25	0,125	0,0625	0,025
$\frac{S_i}{S_M} + \frac{S_M}{S_i}$	2,5	2	2,5	4,25	8,125	16,0625	40,025
$M = \frac{2M_M}{\frac{S_i}{S_M} + \frac{S_M}{S_i}}$	305,97	382,46	305,97	179,98	94,14	47,62	19,11

За результатами таблиці 7 будуємо залежність  $\omega_{д.г.}(S_{д.г.}) = f(M_{д.г.})$  (рисунок 9). На цьому ж рисунку 9 зображуємо механічну характеристику електродвигуна в двигунному режимі  $\omega_d(S_d) = f(M_d)$ . Перехід від ковзання  $S$  до кутової швидкості  $\omega$  для будь-якої точки МХ розраховуємо за формулою

$$\omega_i = \omega_0 \cdot (1 - S_i)$$

Побудову графіка механічної характеристики електродвигуна в двигунному режимі виконуємо за п'ятьма точками.

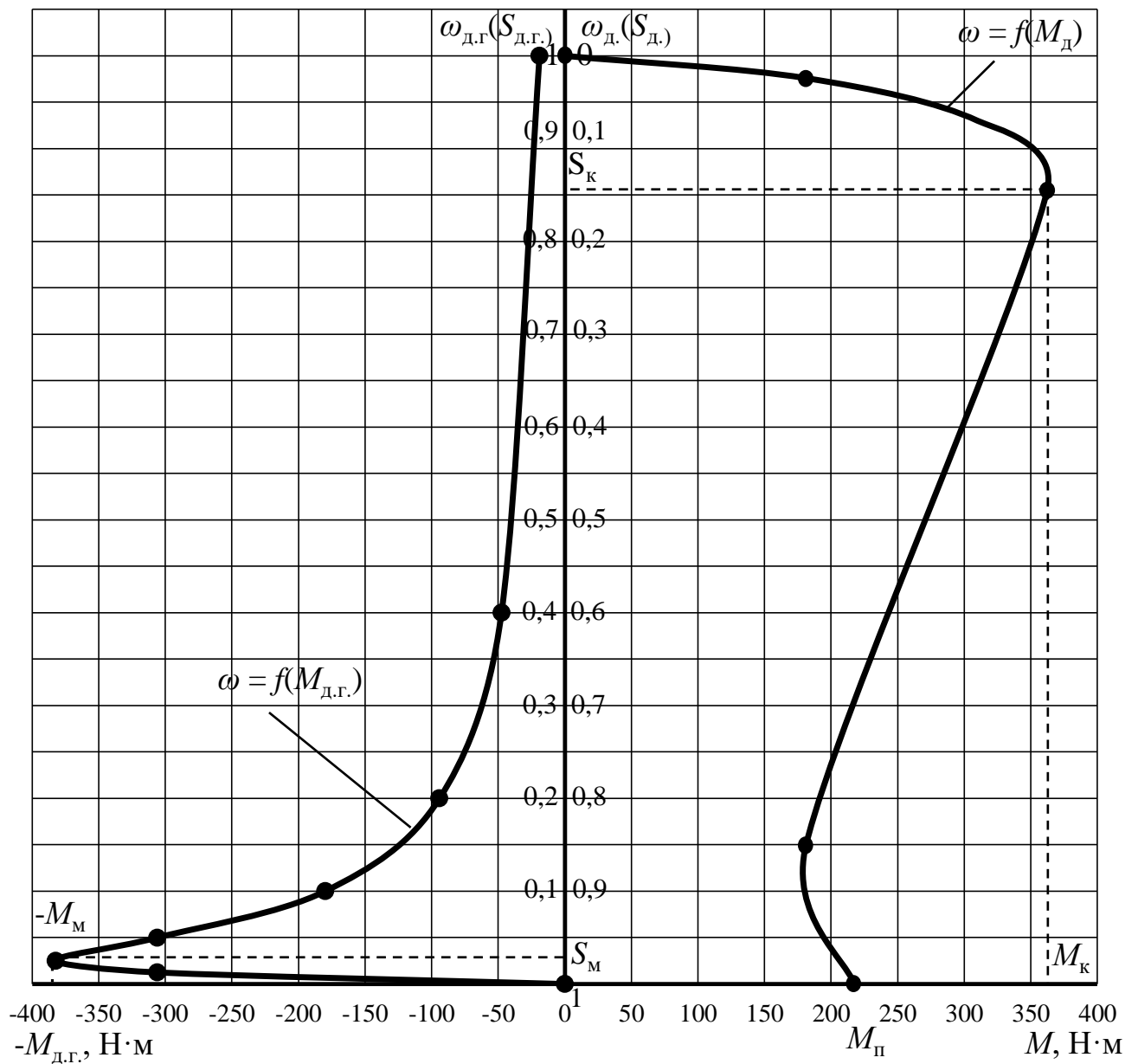


Рисунок 9 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна в режимі двигуна і в режимі динамічного гальмування

Перша точка – точка ідеального холостого ходу (синхронний режим) з координатами  $M_{д.} = 0$ ;  $S = 0$ ;  $\omega = \omega_0$ .

Друга точка – точка номінального режиму з координатами:  $M_{дв.} = M_{н.}$ ,  $S = S_{н.}$ ;  $\omega = \omega_{н.}$ .

Визначаємо номінальний момент електродвигуна

$$M_{н.} = \frac{P_{н.}}{\omega_{н.}},$$

де  $P_H$  – номінальна потужність двигуна, Вт;

$\omega_H$  – номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H),$$

де  $S_H$  – номінальне ковзання, в.о. Згідно паспортних даних  $S_H = 0,024$  в.о.

$$\omega_H = 104,7 \cdot (1 - 0,024) = 102,19 \text{ рад/с};$$

$$M_H = \frac{18,5 \cdot 10^3}{102,19} = 181,04 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Третя точка – точка максимального моменту (критичний режим) з координатами  $M_{дв} = M_K$ ,  $S = S_K$ . Згідно паспортних даних  $S_K = 0,135$  в.о.

Визначаємо критичний (максимальний) момент електродвигуна

$$M_K = M_H \cdot \mu_K;$$

$$M_K = 181,04 \cdot 2,0 = 362,08 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Четверта точка – точка мінімального моменту з координатами:

$$M_{дв} = M_{мін}, S_{мін} = 0,8 \dots 0,85. \text{ Приймаємо } S_{мін} = 0,85.$$

Визначаємо мінімальний момент електродвигуна

$$M_{мін} = M_H \cdot \mu_{мін},$$

де  $\mu_{мін}$  – кратність мінімального моменту двигуна, в.о. Згідно паспортних даних  $\mu_{мін} = 1,0$ .

$$M_{мін} = 181,04 \cdot 1,0 = 181,04 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

П'ята точка – точка короткого замикання (режим початкового пуску) з координатами:  $M_{дв} = M_{п}$ ,  $S_{п} = 1$ .

Визначаємо пусковий момент електродвигуна

$$M_{\Pi} = M_{H} \cdot \mu_{\Pi},$$

де  $\mu_{\Pi}$  – кратність пускового моменту двигуна, в.о. Згідно паспортних даних

$$\mu_{\Pi} = 1,2.$$

$$M_{\Pi} = 181,04 \cdot 1,2 = 217,25 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

## **7 Вказівки щодо оформлення звіту**

Звіт з практичної роботи повинен мати:

1 Варіант індивідуального завдання.

2 Розрахункові формули для виконання практичної роботи.

3 Схему підключення постійного струму до обмотки статора електродвигуна та діаграму магніторушійних сил.

4 Механічні характеристики електродвигуна в двигунному режимі і в режимі динамічного гальмування.

5 Аналіз отриманих результатів.

## **8 Контрольні питання**

1 В яких гальмівних режимах може працювати АД?

2 Що таке ковзання асинхронного електродвигуна?

3 Як визначається ковзання АД в загальному вигляді?

4 Яким чином виконується режим динамічного гальмування?

5 Як визначається струм холостого ходу асинхронного електродвигуна при динамічному гальмуванні?

6 Яке значення постійного струму протікає по обмоткам електродвигуна при динамічному гальмуванні?

7 Як визначити максимальний момент при динамічному гальмуванні?

8 За якими точками будується механічна характеристика асинхронного електродвигуна?

9 Як залежить момент асинхронного електродвигуна від підведеної до нього напруги?

## **9 Список літератури**

- 1 Електропривод: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко [та інш.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: «Ліра-К», 2009. – 504 с.
- 2 Електропривод: ч.1 / О.С. Марченко, Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, Є.Л. Жулай; За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 208 с.
- 3 Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.
- 4 Електропривод: Навчальний посібник / О.Ю. Синявський, П.І. Савченко, В.В. Савченко, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Ю.М. Хандола, Ільїчов; За ред. О.Ю. Синявського. – К.: Аграр Медіа Груп, 2013. – 586 с.
- 5 Электропривод: практикум / сост.: В. В. Гурин, Е. В. Бабаева. – Минск: БГАТУ, 2011. – 200 с.
- 6 Голован А.Т. Основы электропривода: учебник / А.Т. Голован. – Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1959. – 344 с.
- 7 Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

## **10 Критерії оцінювання практичної роботи**

Кількісна оцінка за виконання практичної роботи визначається за наступними показниками:

- 1 вхідний контроль за темою практичного заняття, за який максимально можна отримати 20 % від загальної кількості балів за практичну роботу;
- 2 підготовка та оформлення звіту з практичної роботи, за який максимально можна отримати 30 % від загальної кількості балів;
- 3 вихідний контроль з практичної роботи (захист практичної роботи), за який максимально можна отримати 50 % від загальної кількості балів.

Вхідний контроль за темою практичного заняття здійснюється шляхом усного опитування студента на початку заняття. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно наданим відповідям.

Підготовка та оформлення звіту з практичної роботи здійснюється студентом безпосередньо на практичному занятті. Отримана кількість балів за нього визначається пропорційно вірно виконаним пунктам звіту.

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

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

У разі пропуску практичного заняття студент повинен його відпрацювати у відведений термін під час консультації викладача, який його проводив. Якщо практичне заняття пропущене з поважної причини, то студент може отримати за результатами відпрацювання максимальну кількість балів. Якщо практичне заняття пропущене без поважної причини, то студент може отримати за результатами відпрацювання максимум 60 % балів.

# ДОДАТОК А

(Обов'язковий)

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО АРКУШУ ЗВІТУ

З ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

**ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ І КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

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

## ПРАКТИЧНА РОБОТА

з дисципліни «Основи електропривода»

**РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО  
ЕЛЕКТРОДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ  
ПРИ ДИНАМІЧНОМУ ГАЛЬМУВАННІ**

## ЗВІТ

Студент \_\_\_\_\_ групи

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

П.І.Б.

Службові примітки

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Роботу захищено з оцінкою \_\_\_\_\_

Викладач \_\_\_\_\_

(підпис)

П.І.Б.

Мелітополь, 20\_\_

## ДОДАТОК Б

Паспортні дані і параметри схеми заміщення Г-подібної схеми заміщення АД з короткозамкненим ротором

Варіант	Типорозмір двигуна	$P_H$ , кВт	$I_H$ , А	$S_H$ , в.о.	$\omega_0$ , рад/с	$X_\mu$ , Ом	$\mu_K$ , в.о.	$S_K$ , в.о.	$R'_2$ , Ом	$i_{\text{екв}}$ , в.о.	$\mu_{\text{П}}$ , в.о.	$\mu_{\text{мін}}$ , в.о.
1	4A71B2Y3	1,1	2,5	0,063	314	249	2,2	0,390	6,41	2,0	2,0	1,5
2	4A80A2Y3	1,5	3,3	0,042	314	167	2,6	0,355	3,27	2,5	2,1	1,4
3	4A80B2Y3	2,2	4,6	0,043	314	129	2,6	0,380	2,34	3,0	2,1	1,4
4	4A90L2Y3	3,0	6,1	0,043	314	122	2,5	0,325	2,05	3,5	2,1	1,6
5	4A100S2Y3	4,0	7,9	0,033	314	95	2,5	0,280	1,01	4,0	2,0	1,6
6	4A100L2Y3	5,5	10,5	0,034	314	79,9	2,5	0,170	0,757	4,5	2,0	1,6
7	4A112M2Y3	7,5	14,8	0,025	314	55,2	2,8	0,190	0,417	2,0	2,0	1,8
8	4A132M2Y3	11,0	21,0	0,023	314	43,9	2,8	0,120	0,241	2,5	1,7	1,5
9	4A160S2Y3	15,0	28,4	0,021	314	31,0	2,2	0,125	0,171	3,0	1,4	1,0
10	4A160M2Y3	18,5	34,4	0,021	314	28,8	2,2	0,125	0,141	3,5	1,4	1,0
11	4A80A4Y3	1,1	2,74	0,054	157	136	2,2	0,340	5,45	4,0	2,0	1,6
12	4A80B4Y3	1,5	3,56	0,058	157	118	2,2	0,345	4,26	4,5	2,0	1,6
13	4A90L4Y3	2,2	5,0	0,051	157	92	2,4	0,330	2,63	2,0	2,1	1,6
14	4A100S4Y3	3,0	6,68	0,044	157	72,5	2,4	0,310	1,75	2,5	2,0	1,6
15	4A100L4Y3	4,0	8,60	0,046	157	61,5	2,4	0,315	1,36	3,0	2,0	1,6
16	4A112M4Y3	5,5	11,5	0,036	157	53,7	2,0	0,25	0,787	3,5	2,0	1,6
17	4A132S4Y3	7,5	15,1	0,029	157	43,7	3,0	0,195	0,481	4,0	2,2	1,7
18	4A132M4Y3	11,0	21,9	0,028	157	32,1	3,0	0,195	0,321	4,5	2,2	1,7
19	4A160S4Y3	15,0	29,2	0,023	157	30,2	2,3	0,16	0,188	2,0	1,4	1,0
20	4A160M4Y3	18,5	35,6	0,022	157	26,6	2,3	0,16	0,148	2,5	1,4	1,0
21	4A80B6Y3	1,1	3,0	0,080	104,7	116	2,2	0,38	7,95	3,0	2,0	1,6
22	4A90L6Y3	1,5	4,0	0,064	104,7	96,7	2,2	0,31	4,73	3,5	2,0	1,7
23	4A100L6Y3	2,2	5,6	0,051	104,7	74,1	2,2	0,25	2,61	4,0	2,0	1,6
24	4A112MA6Y3	3,0	7,4	0,047	104,7	56,6	2,5	0,37	1,88	4,5	2,0	1,8
25	4A112MB6Y3	4,0	9,1	0,051	104,7	48,2	2,5	0,38	1,49	2,0	2,0	1,8









