

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи “ Розрахунок та аналіз трифазних
асинхронних двигунів з фазним ротором ”
з дисципліни “ Електричні машини ”
для студентів усіх форм навчання за напрямом 6.050702

Затверджено методичною
радою університету,
Протокол № від . .2013

Харків
ХНАДУ
2013

Укладачі: В.Г. Кубата
В.Я. Двадненко

Кафедра автомобільної електроніки

Асинхронні машини є найбільш розповсюдженими електричними машинами. В основному вони використовуються як електродвигуни і складають базу електропривода більшості механізмів, перетворюючи електричну енергію в механічну.

Асинхронні двигуни (АД) споживають до 70% всієї виробляємої електроенергії та складають до 90% електродвигунів за кількістю і 35% - за потужність, а затрати на експлуатацію досягають не більш 5% затрат на обслуговування всього встановленого обладнання.

Це обумовлено їх конструктивною простотою, низкою вартістю та високою експлуатаційною надійністю при мінімальному обслуговуванні.

Крім того, вони мають високий ККД та здатність автоматично змінювати обертовий момент у відповідності до змінення моменту навантаження на валу.

Асинхронні двигуни загального призначення випускаються у вигляді серій, що охоплюють певний діапазон потужностей, частот обертання та напруг.

Зараз основною серією АД є серія 4А і нова серія – АІ, що за своїми показниками перевищує серію 4А, а саме має менші масогабаритні розміри, більші коефіцієнти потужності та корисної дії.

Серії електричних машин обновлюються кожні 8 – 10 років. Так сьогодні вже випускаються двигуни серії 6А, а також серії 2АІ з низкою переваг у порівнянні з базовою АІ. В подальшому було прийнято рішення про перехід до виробництва оновленої серії АІР із збереженням технічного рівня серії 2АІ.

1. МЕТА КУРСОВОЇ РОБОТИ

Метою курсової роботи є закріплення теоретичних знань, отриманих при вивченні дисципліни «Електричні машини» та освоєння розрахунково-аналітичних способів визначення основних характеристик (робочих і механічних) трифазних АД з фазним ротором, а також опору пускових резисторів у колі ротора.

2. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Трифазний асинхронний двигун перетворює електричну енергію змінного струму в механічну енергію, що віддається на вал, яку використовують для привода робочих машин. Він має нерухому частину – статор та обертову частину – ротор.

Статор складається із чавунного, сталюого або алюмінієвого корпусу, всередині якого знаходиться порожнистий циліндр із тонких ізолюваних один від одного листів електромеханічної сталі. По внутрішній поверхні цього циліндра паралельно вісі валу є пази, в яких розміщено трифазну обмотку із трьох однакових частин, що звуться фазами, що можуть з'єднуватися як за схемою «зірка», так і за схемою «трикутник». Початок та кінець однієї фази зсунуті у просторі відносно аналогічних виводів іншої фази на 120 електричних градусів. Кожна фаза складається з послідовно або з паралельно поєднаних обмоток, число яких дорівнює числу пар полюсів машини.

Ротор двигуна – це циліндр із тонких ізолюваних один від одного листів електромеханічної сталі, який надійно закріплює на валу машини і який має у пазах, що розміщено поблизу його поверхні, відповідну обмотку. В залежності від засобу виконання останньої АД підрозділяються на дві великі групи: двигуни з короткозамкненою обмоткою на роторі та двигуни з фазною обмоткою на роторі або двигуни з контактними кільцями.

Короткозамкнена обмотка виконується литою з алюмінієвого сплаву. При цьому в процесі заливки утворюються як стрижні (провідники) обмотки, що розміщені в пазах, так і кільця, які замикають їх накоротко і які розміщені за межами осередді ротора. Така обмотка повністю ізолювана від зовнішнього електричного кола.

Фазна обмотка являє собою попередньо ізолювані стрижні, що заводять у пази осередді із торцевої сторони ротора. При цьому фази цієї обмотки з'єднуються за схемою «зірка» і підводять до трьох контактних кілець, що розміщені на валу двигуна та ізолювані одне від одного. У коло обмотки фазного ротора за допомогою контактних кілець і нерухомих щіток можна підключати додаткові опори або вводити додаткову ЕРС, що значно підвищує функціональні

можливості цих двигунів. Але конструкція ротора в них істотно складніша, що веде до подорожання двигунів в цілому.

Асинхронні двигуни відносять до класу індукційних електричних машин, дія яких заснована на явищі електромагнітної індукції.

Включення обмотки статора до трифазної мережі викликає виникнення в ній відповідних струмів, що збуджують обертове магнітне поле (ОМП) з частотою обертання

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (2.1)$$

де f_1 – частота струмів в обмотці статора;

p – число пар полюсів обмотки статора.

Це поле наводить в обмотці ротора ЕРС, під впливом якої в ній виникають індуковані струми, що взаємодіють з ОМП статора. Внаслідок цього створюється електромагнітний момент

$$M = k_M \cdot \Phi \cdot I_2 \cos \psi_2, \quad (2.2)$$

де k_M – конструктивний коефіцієнт моменту;

Φ – магнітний потік ОМП;

I_2 – струм ротора;

ψ_2 – кут зсуву за фазою ЕРС і струму обмотки ротора, під дією якого ротор починає обертатися з частотою $n_2 < n_1$ у бік обертання ОМП. Це й було основою для назви двигунів – асинхронні.

Різниця швидкості $n_1 - n_2 = n_s$ називається швидкістю ковзання, а її відносне значення

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n_s}{n_1} \quad (2.3)$$

ковзанням ротора двигуна. Цей важливий параметр є величиною змінною і збільшується з ростом навантажувального моменту на валу ротора. При нерухомому роторі $s = 1$ ($n_2 = 0$), у режимі ідеального неробочого ходу $s = 0$ ($n_2 = n_1$), а у режимі номінального навантаження ($n_2 = n_{2N}$) ковзання складає 0,03-0,08 відносних одиниць.

Зміна напрямку обертання ротора досягається зміною чергувань

фаз напруги трифазної мережі переключенням будь-яких двох провідників, що підведені до затискачів обмотки статора.

При обертанні ротора асинхронного двигуна в процесі роботи у ньому буде індукуватися змінна ЕРС

$$E_2 = k_{E_2} \cdot \Phi \cdot n_1 \cdot s = E_{20} \cdot s, \quad (2.4)$$

де k_{E_2} – конструктивний коефіцієнт;

n_1 – частота обертання ОМП;

s – ковзання;

E_{20} – ЕРС ротора в момент пуску двигуна, періодична частота якої буде дорівнювати

$$f_2 = f_{20} \cdot s = f_1 \cdot s, \quad (2.5)$$

де f_{20} – періодична частота ЕРС ротора в момент пуску двигуна, тобто $f_{20} = f_1$, так як $s = 1$;

f_1 – періодична частота ЕРС статора.

Тоді струм ротора згідно з законом Ома буде

$$I_2 = \frac{E_{20} \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + (X_{20} \cdot s)^2}}, \quad (2.6)$$

де R_2 – активний опір обмотки ротора;

X_{20} – індукований опір обмотки ротора в момент пуску двигуна.

При пуску двигуна та протягом першого етапу процесу його розгону має місце нерівність

$$X_{20} \cdot s \gg R_2, \quad (2.7)$$

а пусковий струм ротора при цьому буде

$$I_{20} = \frac{E_{20}}{X_{20}}, \quad (2.8)$$

і залишається приблизно постійним. На другому етапі процесу розгону, коли настає зворотна нерівність

$$X_{20} \cdot s \ll R_2, \quad (2.9)$$

струм обмотки зменшується пропорційно ковзанню

$$I_2 \approx \frac{E_{20} \cdot s}{R_2}. \quad (2.10)$$

За таким приблизно законом відповідно до рівняння ампервитків змінюється і струм обмотки статора.

При цьому кількісні співвідношення в асинхронному двигуні такі, що його пусковий струм у 4-7 разів перевищує номінальний.

Як витікає з рівняння (2.2), обертовий момент двигуна пропорційний активній складовій струму обмотки ротора - $I_2 \cdot \cos \psi_2$.

Під час пуску, коли ковзання $s=1$ та індуктивний опір обмотки ротора максимальний $X_2=X_{20}$, кут зсуву за фазою $\psi_2 = \psi_{20}$ має максимальне значення, а $\cos \psi_2 = \cos \psi_{20}$ - дуже мале. Тому пусковий момент двигуна

$$M_0 = k_M \cdot \Phi \cdot I_{20} \cdot \cos \psi_{20}. \quad (2.11)$$

відносно малий і складає 0,9 – 1,8 від номінального значення моменту.

При подальшому розгоні двигуна $\cos \psi_2$ збільшується дуже незначно, що обумовлює зростання моменту двигуна до деякого максимального значення. Нарешті, в кінці розгону момент зменшується до номінального внаслідок зменшення струму обмотки ротора.

Характер змінювання моменту двигуна в процесі його розгону, тобто залежність моменту від ковзання приведено на рис. 2.1.

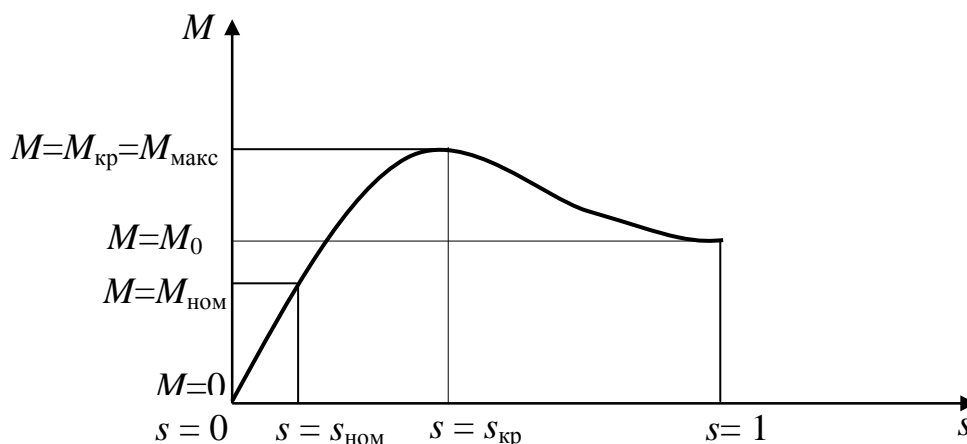


Рисунок 2.1 – Графік залежності моменту двигуна від ковзання

Для одержання аналітичного виразу зазначеної залежності скористаємось енергетичною діаграмою та Г-подібною схемою заміщення асинхронного двигуна.

Розподіл потоку енергії, яку потребує двигун із мережі, відповідає енергетичній діаграмі, яка являє собою повну структуру всіх складових та втрат потужності, які виникають при роботі в двигуні, а саме: $P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi_1$ – активна потужність, що підводиться до двигуна із мережі; $\Delta P_{e1} = 3I_1^2 R_1$ – електричні втрати потужності у статорі; $\Delta P_{\Gamma 1}$ – втрати потужності в магнітопроводі статора; $P_{eM} = \Omega_1 \cdot M = P_1 - \Delta P_{e1} - \Delta P_{\Gamma 1}$ – електромагнітна потужність, що передається ротору ОМП, кутова частота обертання якого $\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{\omega_1}{p}$; $\Delta P_{e2} = 3 \cdot I_2^2 R_2$ – електричні втрати потужності у роторі; $P_{\text{мех.}} = \Omega_2 \cdot M = P_{eM} - \Delta P_{e2}$ – механічна потужність що передається ротору, кутова частота обертання якого $\Omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{p}$; $\Delta P_{\text{мех}}$ – механічні втрати потужності; $\Delta P_{\text{дод}}$ – додаткові втрати потужності; $P_2 = \frac{M \cdot n_2}{9,55} = P_{\text{мех.}} - \Delta P_{\text{мех.}} - \Delta P_{\text{дод}}$ – корисна механічна потужність на валу двигуна.*

Енергетичну діаграму асинхронного двигуна приведено на рис. 2.2.

Відповідно до енергетичної діаграми момент двигуна зв'язаний з його основними параметрами такою формулою

$$M = \frac{\Delta P_{e2}}{\Omega_1 \cdot s} = \frac{3I_2^2 R_2}{\Omega_1 \cdot s} = \frac{3(I_2')^2 R_2'}{\Omega_1 \cdot s}, \quad (2.12)$$

де ΔP_{e2} – електричні втрати потужності у роторі;

* У каталогах та паспортах асинхронних двигунів приводиться номінальна потужність на валу $P_{\text{ном}}$, частота обертання ротора $n_{\text{ном}}$, струм $I_{\text{ном}}$, що споживаються. У розрахункових формулах ці величини мають індекси $P_{2\text{ном}}$, $n_{2\text{ном}}$, $I_{1\text{ном}}$ відповідно.

$$\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot n_1}{60} \text{ – кутлова частота обертання ОМП;}$$

s – ковзання ротора;

I_2', R_2' – приведені значення струму та активного опору обмотки ротора відповідно.

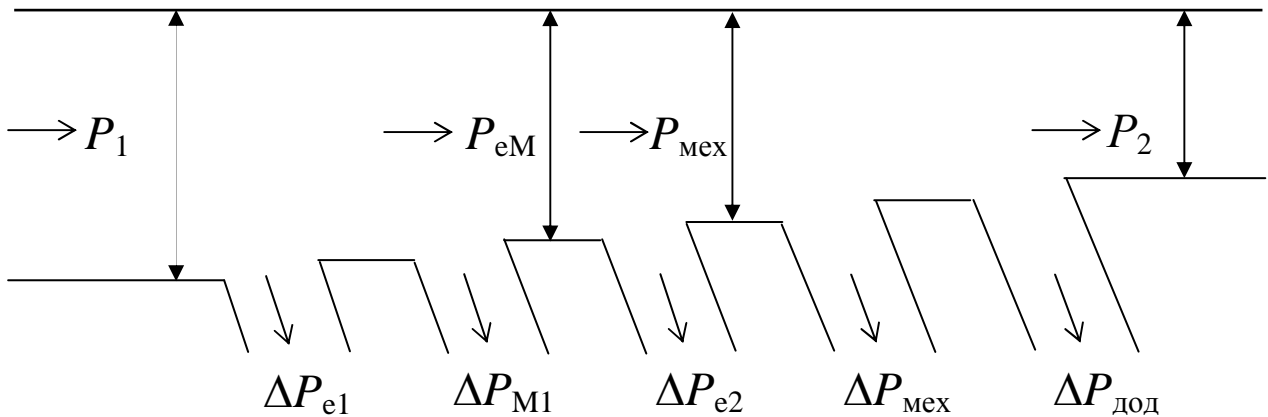


Рисунок 2.2 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Підставляючи в рівняння (2.12) приведені значення струму ротора з Г-подібної схеми заміщення двигуна, приведені на рис. 2.3, одержуємо формулу для моменту асинхронного двигуна.

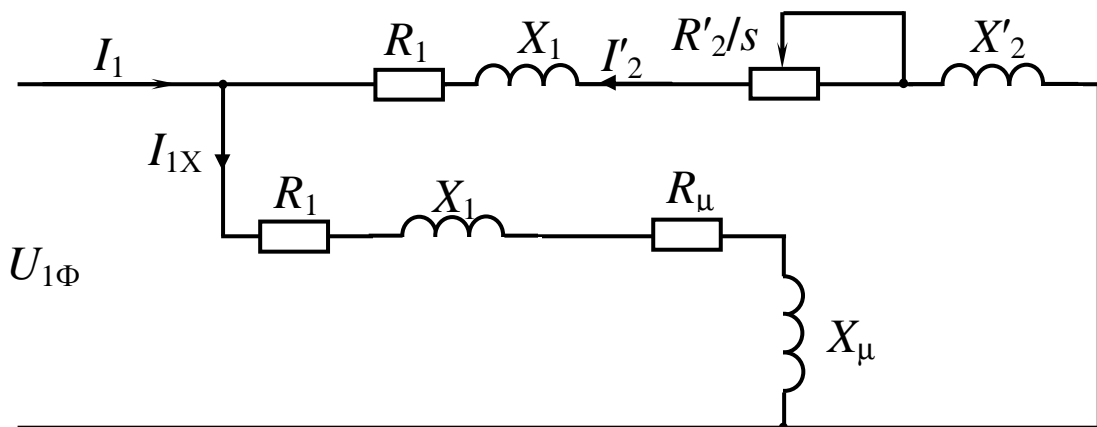


Рисунок 2.3 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

На рис. 2.1 позначено: $U_{1\Phi}$, I_1 , R_1 , X_1 – фазна напруга, струм, активний та індуктивний опори статора; X_2' – приведені значення

індуктивного опору ротора; I_{1X} – струм неробочого ходу; R_μ , X_μ – активний та індуктивний опори гілки намагнічування.

$$M = \frac{3 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot R_2'}{\Omega_1 \cdot s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} = \frac{3 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot R_2' \cdot p}{2\pi f_1 \cdot s \cdot (Z_k')^2}, \quad (2.13)$$

де Z_k' – приведені значення повного опору робочої гілки схеми заміщення.

Аналіз виразу (2.13) на екстремум показав, що момент двигуна має максимальне або критичне значення при критичному ковзанні

$$s_{кр} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (2.14)$$

яке дорівнює

$$M_{кр} = M_{\max} = \frac{3 \cdot U_{1\Phi}^2 \cdot p}{4\pi f_1 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (2.15)$$

За залежністю (2.13) можна розрахувати механічну характеристику двигуна $s = f(M)$, яка представлена на рис. 2.4.

При цьому перевантажувальна здатність двигуна визначається коефіцієнтом перевантаження

$$k_{п} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}, \quad (2.16)$$

який змінюється у діапазоні 1,5 – 2,5, а критичне ковзання $s_{кр}$ не перебільшує 0,3.

На практиці для побудови механічної характеристики часто користуються наближеною формулою Клоса

$$M = \frac{2M_{\text{макс}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (2.17)$$

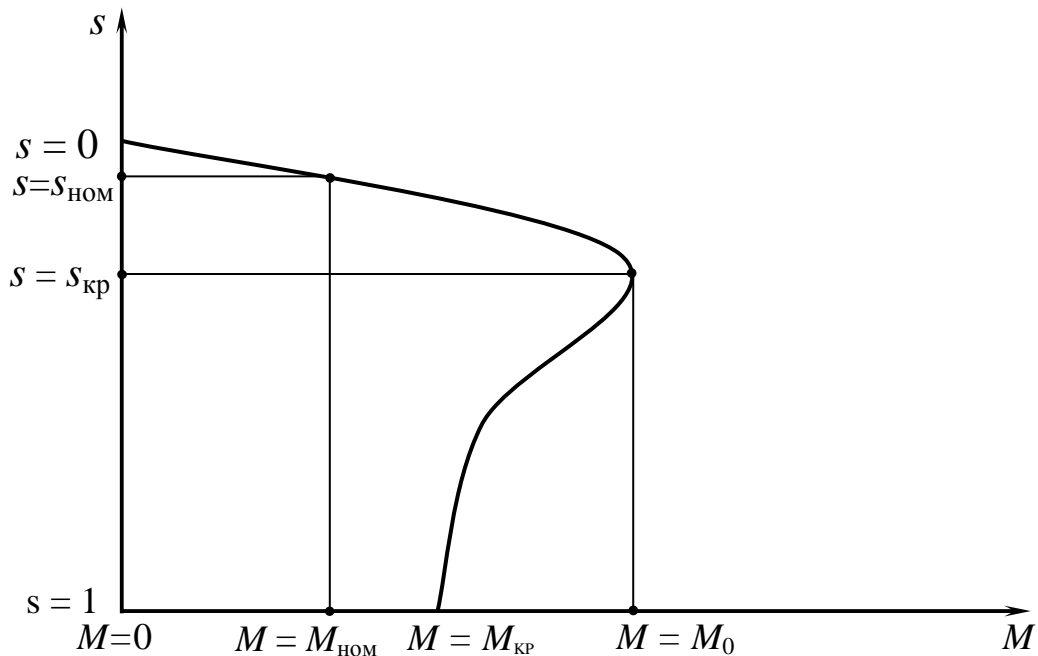


Рисунок 2.4 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Механічні характеристики двигуна, що розраховані при номінальних значеннях параметрів двигуна і відсутності додаткових резисторів у колі обмотки фазного ротора, називаються природними, а при інших умовах – штучними.

При цьому формули для розрахунку штучних характеристик відрізняються від відповідних формул для природних тим, що в них замість активного опору обмотки ротора R_2 вводиться новий активний опір $R_{\text{п}}$, що являє собою суму останнього з додатковими резисторами $R_{\text{д}}$

$$R_{\text{п}} = R_2 + R_{\text{д}}. \quad (2.18)$$

Додаткові резистори визначають пускові властивості асинхронних двигунів з фазним ротором та значно поліпшують умови їх пуску.

Для більш повного виявлення функціональних можливостей двигуна використовують його робочі характеристики, які визначають залежності обертового моменту M , частоти обертання n_2 або його ковзання s , струму статора I_1 , коефіцієнта корисної дії η , коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ і потужності, що споживається, P_1 від корисної потужності на валу двигуна P_2 , тобто $M = f(P_2)$, $n_2 = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$, $s = f(P_2)$, $I_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$ при постійних значеннях напруги та частоти мережі.

Ці характеристики приведені на рис. 2.4 і можуть бути отримані, як і механічні характеристики, або методом безпосереднього навантаження двигуна, або розраховані за його каталожними даними.

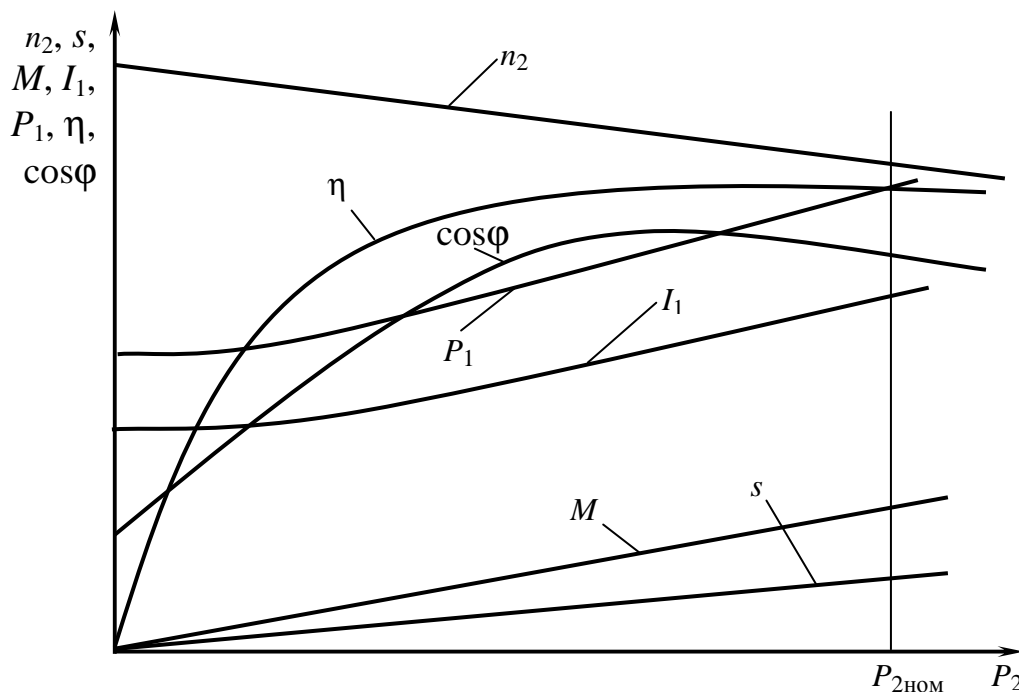


Рисунок 2.4 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

Наглядне уявлення про взаємозв'язок між параметрами двигуна дає також векторна діаграма, яка будується на підставі схеми заміщення згідно з наступним рівнянням, а саме:

- рівняння електричного стану статора

$$\overline{U}_1 = -\overline{E}_1 + \overline{I}_1 \cdot R_1 + \overline{I}_1 \cdot X_1; \quad (2.19)$$

- рівняння електричного стану ротора

$$\bar{E}'_{20} = \bar{I}'_2 \cdot R'_2 / s + \bar{I}'_2 \cdot X'_2; \quad (2.20)$$

- рівняння ампервитків

$$\bar{I}'_{1X} = \bar{I}'_1 + \bar{I}'_2; \quad (2.21)$$

- рівняння струму неробочого ходу

$$\bar{I}'_{1X} = \bar{I}'_{1XA} + \bar{I}'_{1Xp} = \bar{I}'_{1XA} + \bar{I}'_{\mu}, \quad (2.22)$$

де I'_{1XA} – активна складова струму неробочого ходу;

$I'_{1Xp} = I'_{\mu}$ – реактивна складова струму неробочого ходу або струм намагнічування.

Слід зазначити, що у рівняння (2.20) проведене не тільки зведення ЕРС, струму і опорів ротора до обмотки статора, а і зведення режиму асинхронного двигуна, що працює при деякому ковзанні s під навантаженням, до еквівалентного режиму асинхронної машини при нерухомому роторі. Тому це рівняння має не тільки інший вигляд, а й інший фізичний зміст, тобто все відбувається так, немов би ротор був нерухомий з підведеною ЕРС E'_{20} і опорами R'_2/s та X'_2 .

Векторна діаграма такого зведеного асинхронного двигуна наведена на рис. 2.6.

3. ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ

Кожний студент відповідно до індивідуального завдання, вихідні дані якого наведено в таблиці 3.1, повинен самостійно вирішити та відбити у пояснювальній записці такі питання щодо трифазних асинхронних двигунів з фазним ротором:

- основні положення щодо побудови, принципу дії, властивостей і можливостей застосування;
- способи визначення основних характеристик;
- розрахунок робочих та механічних характеристик, а також їх графічне зображення;
- визначення основних номінальних параметрів;

- розрахунок параметрів електричної принципової схеми заміщення та її графічне зображення;
- побудову у відповідному масштабі векторної та енергетичної діаграм;
- розрахунок опорів додаткових пускових резисторів у колі обмотки ротора та графічне зображення механізму пуску;
- вибір типу двигуна та визначення найбільш близьких до розрахункових його основних номінальних даних;
- загальні висновки;
- список використаної літератури.

Розрахункову частину роботи рекомендується виконувати в середовищі пакета прикладних програм "MathCAD" або Microsoft Office Excel.

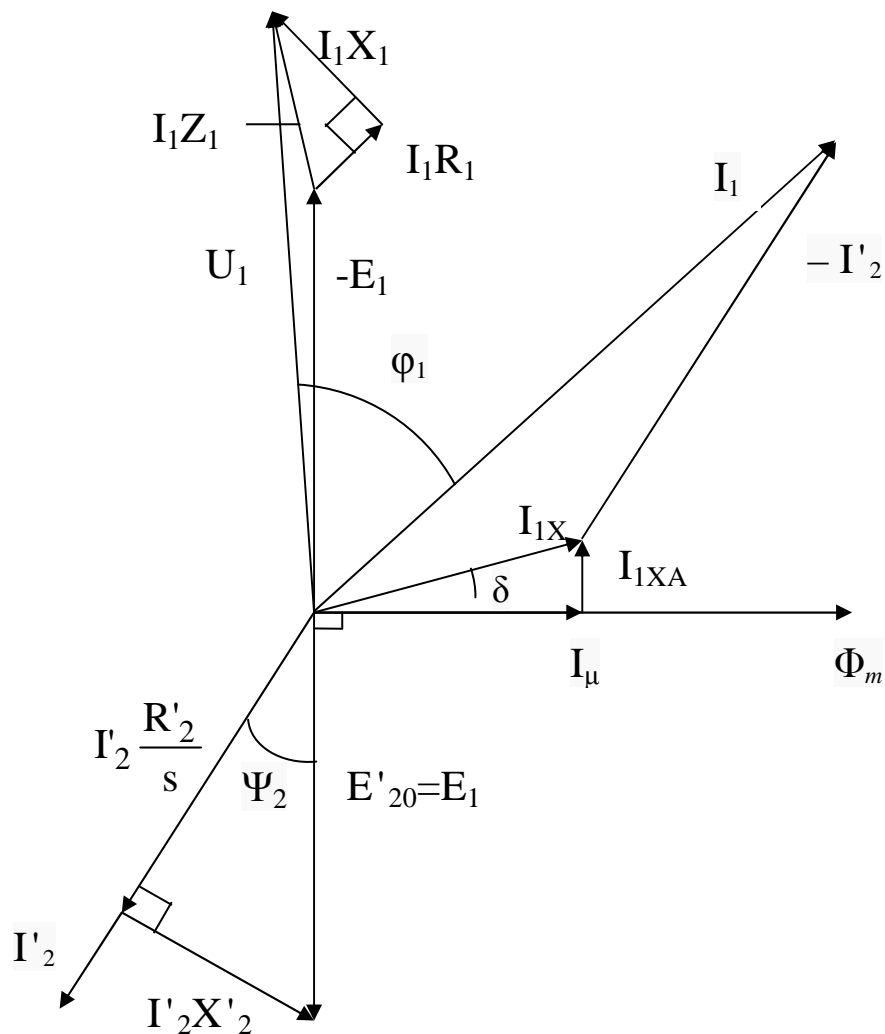


Рисунок 2.6 – Векторна діаграма зведеного асинхронного двигуна

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

№ Варіанта	$U_{1Л}^*$, В	$R_{1х}$, Ом	$R_{2х}$, Ом	X_1 , Ом	X_2 , Ом	W_1	W_2	p	$S_{НОМ}^*$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	220	0,46	0,07	1,52	0,22	190	64	2	3,0
2	220	0,58	0,06	2,32	0,35	260	82	2	3,5
3	380	0,62	0,04	1,84	0,42	362	72	2	3,5
4	380	0,74	0,07	3,52	0,37	216	48	3	2,5
5	380	0,78	0,06	4,12	0,62	424	74	3	2,5
6	220	0,36	0,045	3,62	0,48	358	62	3	4,0
7	220	0,42	0,05	2,82	0,34	184	42	2	4,5
8	220	0,64	0,06	3,12	0,65	412	82	2	5,0
9	220	0,82	0,07	3,82	0,48	362	65	2	5,0
10	380	0,84	0,06	4,24	0,52	254	46	3	3,0
11	380	0,78	0,04	3,64	0,048	228	42	3	3,0
12	380	0,86	0,05	3,48	0,78	316	54	2	2,5
13	380	0,76	0,065	2,24	0,54	272	78	2	2,5
14	220	0,48	0,03	3,48	0,62	458	92	2	2,5
15	220	0,52	0,055	2,94	0,36	162	43	2	3,0
16	220	0,56	0,045	4,42	0,64	288	54	3	3,0
17	380	0,62	0,06	3,54	0,46	204	62	3	3,0
18	380	0,76	0,045	3,72	0,54	356	72	3	5,0
19	380	0,66	0,05	2,92	0,64	384	68	2	5,0
20	220	0,58	0,035	2,56	0,48	452	82	2	2,0
21	220	0,60	0,055	2,64	0,56	412	68	2	2,0
22	220	0,68	0,075	3,48	0,32	282	54	3	4,0
23	380	0,42	0,065	1,82	0,45	368	48	3	4,0
24	380	0,82	0,07	2,52	0,64	180	45	2	4,0
25	220	0,54	0,045	2,38	0,45	254	48	2	3,0
26	220	0,42	0,03	3,68	0,32	322	58	2	3,0
27	220	0,91	0,07	3,91	0,52	380	48	3	4,0
28	220	0,82	0,06	3,84	0,48	380	46	3	5,0
29	220	0,71	0,05	3,62	0,44	376	48	3	5,4
30	220	0,68	0,06	3,78	0,52	388	44	3	5,2
31	380	0,80	0,058	4,20	0,50	260	48	3	3,2

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
32	380	0,82	0,06	4,40	0,52	280	50	3	3,4
33	380	0,58	0,07	1,52	0,22	190	64	2	3,0
34	380	0,71	0,055	4,71	0,72	200	50	2	3,5
35	220	0,78	0,07	3,52	0,42	216	74	2	4,5
36	220	0,57	0,061	2,80	0,32	210	70	2	3,5
37	220	0,48	0,05	1,52	0,30	200	65	2	4,0
38	380	0,74	0,06	4,12	0,48	350	60	2	4,0
39	380	0,41	0,06	2,82	0,52	200	70	3	2,5
40	220	0,60	0,07	1,84	0,37	190	60	3	3,0
41	220	0,48	0,052	1,92	0,41	200	70	2	4,0
42	380	0,31	0,048	2,05	0,47	160	65	3	3,5
43	380	0,71	0,041	1,68	0,51	175	75	2	4,0
44	220	0,48	0,042	1,72	0,61	160	60	3	3,0
45	220	0,58	0,048	1,82	0,60	170	55	2	3,0
46	380	0,62	0,048	1,84	0,42	180	60	3	3,0
47	380	0,72	0,052	1,92	0,38	190	72	2	4,0
48	380	0,58	0,058	1,68	0,42	165	80	3	4,0
49	220	0,48	0,054	1,72	0,36	155	60	2	3,0
50	220	0,51	0,060	1,82	0,48	180	65	3	3,0
51	380	0,80	0,062	1,90	0,52	200	70	2	3,0
52	380	0,75	0,064	1,84	0,44	190	75	2	4,0

Примітка. Якщо двигун розраховано на роботу від мережі струму з напругою 220/380 В, то це означає, що кожен фазу статора розраховано на напругу 220В. Обмотку необхідно включати за схемою «трикутник», якщо в мережі лінійна напруга $U_{\text{л}}=220$ В, і за схемою «зірка», якщо в мережі лінійна напруга $U_{\text{л}}=380$ В.

Пояснювальна записка та графічні матеріали оформлюються згідно з вимогами відповідних стандартів до оформлення подібних документів. Приклад оформлення титульного листа наведено у додатку А.

4.МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК

З достатньої для практики точністю робочі та механічна характеристики двигуна можуть бути визначені розрахунковим способом, якщо відомі параметри машини, які отримані або при її проектуванні, або за даними досвідів неробочого ходу та короткого замикання. Такі вихідні дані наведено у табл.. 3.1.

Необхідні розрахункові формули складаються за допомогою схеми заміщення, що приведено на рис. 2.3.

4.1 ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Розрахункові формули представлено у такому порядку, в якому рекомендується виконувати розрахунки відповідних параметрів двигуна з визначенням, де це необхідно, додаткових його величин.

Активні опори фази обмоток статора та ротора в нагрітому стані

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{1X} \left[1 + a(t_H - 20^0) \right], \\ R_2 &= R_{2X} \left[1 + a(t_H - 20^0) \right], \end{aligned} \tag{4.1}$$

де R_{1X} , R_{2X} – активні опори обмотки статора і ротора у холодному стані;

$\alpha = 0,004$ – температурний коефіцієнт опору міді, $1/^\circ\text{C}$;

$t_H = 75^\circ$ – температура нагрівання обмоток, $^\circ\text{C}$.

Приведені опори обмотки ротора

$$\begin{aligned} R_2' &= R_2 \cdot k^2, \\ X_2' &= X_2 \cdot k^2, \end{aligned} \tag{4.2}$$

де $k = \frac{w_1}{w_2}$ – коефіцієнт трансформації ЕРС двигуна.

Струм неробочого ходу

$$I_{1X} = \frac{U_{1\Phi}}{\sqrt{(R_1 + R_\mu)^2 + (X_1 + X_\mu)^2}}. \quad (4.3)$$

Для найпоширеніших в промисловості АД потужністю 3 – 100 кВт параметри схеми заміщення у відносних одиницях, тобто в долях базового опору обмотки статора $Z_1 = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{I_{1\text{НОМ}}}$ мають такі значення:

ня:

$$X_\mu^* = \frac{X_\mu}{Z_1} = (2,5 - 4); \quad R_\mu^* = \frac{R_\mu}{Z_1} = (0,1 - 0,4);$$

$R_1^* = \frac{R_1}{Z_1} = (0,01 - 0,07); X_1^* = \frac{X_1}{Z_1} = (0,07 - 0,15)$. При чому, менші значення стосуються двигунів меншої потужності, і вони зменшуються також з ростом числа пар полюсів $2p$. За відомими величинами R_1 та X_1 із вказаних відношень можна знайти величини

$$R_\mu = (0,1 - 0,4)Z_1 = \frac{0,1 - 0,4}{0,01 - 0,07} R_1 \text{ та}$$

$$X_\mu = (2,5 - 4)Z_1 = \frac{2,5 - 4}{0,07 - 0,15} X_1.$$

При середніх значеннях відношень отримаємо, що $R_\mu \approx 6,25R_1$, а $X_\mu \approx 29,5X_1$.

Струм неробочого ходу асинхронних двигунів не перевищує $I_{1X} \leq (20 - 40)\% I_{1\text{НОМ}}$ і збільшується з ростом числа пар полюсів $2p$.

Коефіцієнт потужності неробочого ходу

$$\tilde{\eta} \cos \varphi_{1\tilde{\delta}} = \frac{R_1 + R_\mu}{\sqrt{(R_1 + R_\mu)^2 + (X_1 + X_\mu)^2}}. \quad (4.4)$$

Активна складова струму неробочого ходу

$$I_{1\tilde{\delta}\lambda} = I_{1\tilde{\delta}} \cdot \cos \varphi_{1\tilde{\delta}}. \quad (4.5)$$

Реактивна складова струму неробочого ходу

$$I_{1\tilde{\delta}} = I_{\mu} = I_{1X} \cdot \sin \varphi_{1X}. \quad (4.6)$$

Активна складова струму статора

$$I_{1A} = I_{1XA} + \frac{U_{1\Phi} \cdot (R_1 + R'_2/s)}{\left[(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}. \quad (4.7)$$

Реактивна складова струму статора

$$I_{1P} = I_{\mu} + \frac{U_{1\Phi} \cdot (X_1 + X'_2)}{\left[(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]}. \quad (4.8)$$

Повний струм статора

$$I_1 = \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1P}^2}. \quad (4.9)$$

Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1A}}{I_1}. \quad (4.10)$$

Споживаюча активна потужність

$$P_1 = 3U_{1\tilde{\delta}} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1. \quad (4.11)$$

Втрати потужності на двигуні при навантаженні

$$\sum \Delta P = \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} + \Delta P_{M1} + \Delta P_{M1} + \Delta P_{\text{мех1}} + \Delta P_{\text{дод}}, \quad (4.12)$$

де $\Delta P_{e1} = 3R_1 I_1^2$ – електричні втрати в статорі;

$$\Delta P_{e2} = 3R'_2 (I'_2)^2 = \frac{3R'_2 U_{1\Phi}^2}{(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2} - \text{електричні}$$

втрати в роторі;

$\Delta P_{M1} + \Delta P_{M2} + \Delta P_{i \text{ äö}} = P_{1X} - 3R_1 I_{1X}^2 = 3U_{1\phi} I_{1X} \cos \varphi_{1X} - 3R_1 I_{1X}^2 -$
 втрати неробочого ходу без електричних втрат;

$\Delta P_{\text{дод}} = 0,005 P_1 -$ додаткові втрати.

Корисна потужність

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P. \quad (4.13)$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (4.14)$$

Електромагнітний момент

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2' \cdot p}{2\pi f_1 \cdot s \left[\left(R_1 + R_2' / s \right)^2 + \left(X_1 + X_2' \right)^2 \right]}. \quad (4.15)$$

При визначенні робочих характеристик за приведеними формулами треба задаватися значеннями ковзання у межах $(0,1-1,3) \cdot s_{\text{ном}}$, а отримані розрахункові дані занести до таблиці 4.1 та побудувати за ними в одній системі координат відповідні характеристики.

Після побудови за розрахунковими даними робочих характеристик, треба визначити за ними номінальні параметри асинхронного двигуна, які відповідають його номінальній потужності.

Таблиця 4.1 – Розрахункові дані робочих характеристик

$s/s_{\text{ном}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$I_1, \text{А}$													
$\cos \varphi_1$													
$P_1, \text{Вт}$													
$P_2, \text{Вт}$													
η													
$M, \text{Нм}$													
$n_2, \text{об/хв}$													

4.2. ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для розрахунку залежності $M=f(s)$ у всьому діапазоні ковзання рухового режиму ($s = 0 \dots 1$) спочатку розрахувати згідно з формулою (4.15) значення моменту для ковзань, що вибрані при розрахунку робочих характеристик (табл. 4.1), а потім продовжити розрахунок з кроком змінення ковзання $\Delta s = 0,1$ та обов'язковим розрахунком пускового моменту M_0 при ковзанні $s = 1$.

Крім того, треба визначити значення максимального або критичного моменту

$$M_{\text{макс}} = \frac{3U_{1\phi}^2 \cdot p}{4\pi f_1 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}. \quad (4.16)$$

та відповідному йому критичну ковзність

$$s_{\text{кр}} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (4.17)$$

Наряду з цим, використовуючи $s_{\text{кр}}$ та $M_{\text{кр}}$ з формул (4.16, 4.17), треба також розрахувати механічну характеристику за допомогою формули Клоса, більш зручної для практичного застосування

$$M_{\text{Кл}} = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (4.18)$$

Отримані розрахункові дані занести в таблицю 4.2 та побудувати за ними в одній системі координат відповідні механічні характеристики, а також зробити при цьому необхідні висновки.

Таблиця 4.2 – Розрахункові дані механічних характеристик

s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$M, \text{Нм}$										
$M_{\text{Кл}}, \text{Нм}$										

Після побудови механічних характеристик визначити кратність пускового моменту

$$k_M = \frac{M_0}{M_{\text{НОМ}}}, \quad (4.19)$$

та перевантажувальну здатність двигуна

$$k_{\text{П}} = \frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{НОМ}}}. \quad (4.20)$$

4.3. РОЗРАХУНОК ПУСКОВИХ ОПОРІВ

Очевидно, що великі пускові струми в колі статора і ротора недопустимі за умов динамічних зусиль в обмотках та їх нагріву, а малий пусковий момент є недостатнім для розгону двигуна під навантаженням. Тому для обмеження пускового струму при одночасному збільшенні пускового моменту в коло фазового ротора включають пускові активні опори. Вони, як правило, мають декілька ступенів (від 2 до 6), що з'єднуються за схемою «зірка». При розгоні двигуна до виходу на природну механічну характеристику ступені пускових опорів послідовно закорочуються з такою витримкою часу, яка забезпечує потрібну ефективність прискорення.

Графоаналітичний метод розрахунку пускових опорів, який базується на прямолінійності механічних характеристик двигуна, достатньо простий при застосуванні та має таку послідовність виконання.

1. Число ступенів прискорення

$$m = \frac{\lg \frac{1}{s_{\text{НОМ}} \cdot M_{1*}}}{\lg \frac{M_{1*}}{M_{2*}}}, \quad (4.21)$$

де $M_{1*} = \frac{M_1}{M_{\text{НОМ}}}$ – відносне значення максимального пика пускового

моменту, яке на практиці може знаходитися в межах 1.8...2,5;

$$M_{2*} = \frac{M_2}{M_{\text{НОМ}}} - \text{відносне значення перемикаючого моменту, яке}$$

на практиці може знаходитися в межах 1,1...1,2.

При цьому в залежності від потрібного режиму пуску (форсований або нормальний) максимальний пик пускового моменту M_1 приймається не більше 70-80% від максимального моменту двигуна $M_{\text{макс}}$, а перемикаючий момент M_2 повинен бути на 10-20% більше, ніж статичний момент двигуна навантаження, який не повинен перевищувати номінальний момент двигуна $M_{\text{НОМ}}$. Якщо число ступенів t виходить дробовим, то необхідно змінювати M_{1*} або M_{2*} , або обидві ці моменти одночасно, щоб значення t було цілим числом.

2. Відношення максимального піка пускового моменту до перемикаючого моменту

$$\lambda = \frac{M_{1*}}{M_{2*}}. \quad (4.22)$$

3. Опори ступенів у випадку триступеневого пускового реостату

$$\begin{aligned} r_{3\text{ї}} &= R_2(\lambda - 1), \\ r_{2\text{ї}} &= r_{3\text{ї}} \cdot \lambda, \\ r_{1\text{ї}} &= r_{2\text{ї}} \cdot \lambda, \\ r_{\Sigma\Pi} &= r_{1\Pi} + r_{2\Pi} + r_{3\Pi}. \end{aligned} \quad (4.23)$$

де R_2 – активний опір обмотки ротора.

4. Повні активні опори кола ротора

$$\begin{aligned} R_{3\text{р}} &= R_2 \cdot \lambda, \\ R_{2\text{р}} &= R_{3\delta} \cdot \lambda, \\ R_{1\text{р}} &= R_{2\delta} \cdot \lambda. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Як приклад, на рис. 4.1 приведено пускову діаграму та схему силового кола асинхронного двигуна з трьома ступенями прискорення.

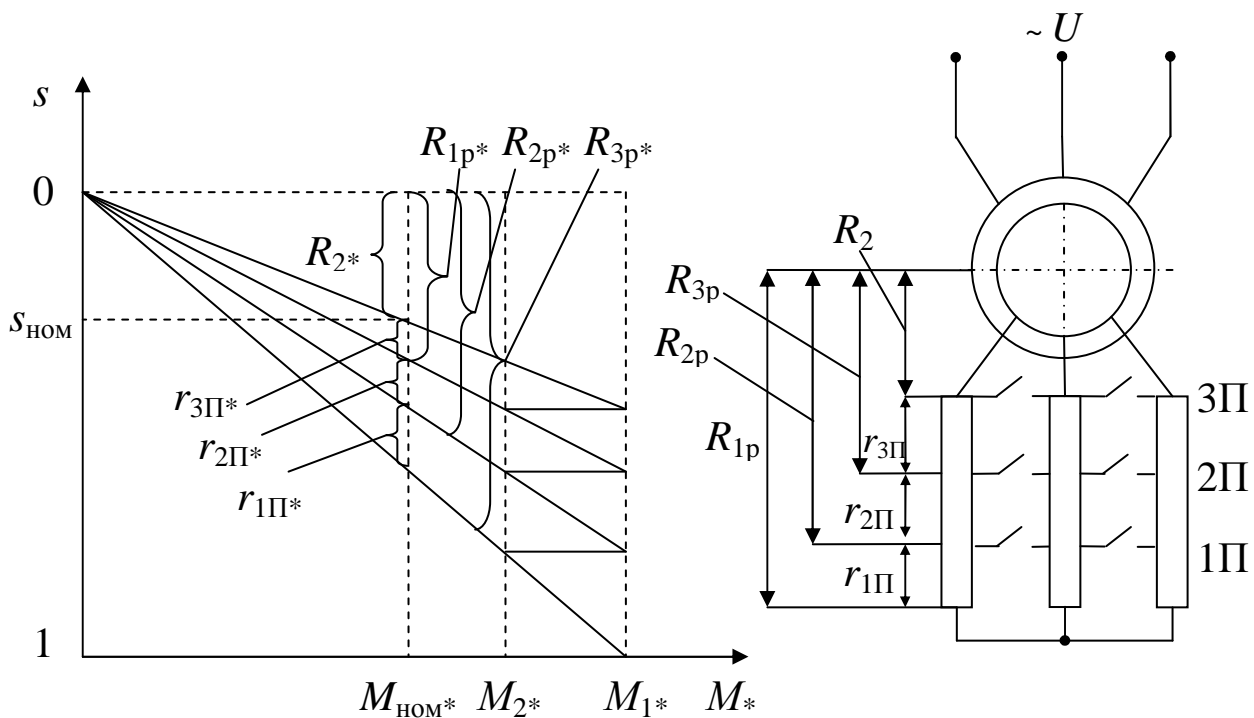


Рисунок 4.1 – Пускова діаграма та схема силового кола АД

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Ретельно проаналізувати отримані розрахункові результати та характеристики, зробити відповідні висновки і за каталожними даними підібрати трифазний АД змінного струму з фазним ротором, який найбільш підходить за своїми технічними характеристиками.

Каталожні дані на двигуни наведені у додатку Б.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. М.: Высшая школа, 1990. – 528 с.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
3. Яцун М.А. Електричні машини. Львів: Львівська політехніка, 2001. – 428 с.

Додаткова

1. Кацман М.М. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2001. – 464 с.
2. Архипцев Ю.Ф., Котеленец Н.Ф. Асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 106 с.
3. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1997. – 432 с.

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра автомобільної електроніки

Курсова робота

“Розрахунок та аналіз характеристик трифазних асинхронних
двигунів з фазним ротором”
З дисципліни “Електричні машини”

Варіант №

Виконав: студент гр.

(Прізвище, ім'я, п/б виконавця)

“ ___ “ _____ 201__р.

Прийняв:

(Прізвище, ім'я, п/б викладача)

“ ___ “ _____ 201__р.

Харків 2013

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Технічні дані деяких типів асинхронних двигунів з фазним ротором

Тип двигуна	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos \varphi$	$M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$
Серія 4А					
4АПА80-06У2	0,37	940	0,65	0,65	2,2
4АПА80А6У2	0,55	930	0,66	0,62	2,2
4АПА90L6У2	1,1	930	0,71	0,74	2,2
4А80А4У3	1,1	1420	0,75	0,81	2,2
4А90L6У3	1,5	935	0,75	0,81	2,2
4А100L6У3	2,2	950	0,75	0,81	2,2
4А100S4У3	3,0	1435	0,82	0,83	2,4
4АК160S4У3	11	1425	0,87	0,86	3
4АК160S6У3	7,5	950	0,83	0,77	3,5
4АК160S8У3	5,5	700	0,8	0,7	2,5
4АК160M4У3	14	1440	0,89	0,87	3,5
4АК160M6У3	10	955	0,85	0,76	3,8
4АК160M8У3	7,5	705	0,82	0,7	3
4АК180M4У3	18	1450	0,89	0,88	4
4АК180M6У3	13	955	0,86	0,8	4
4АК180M8У3	11	720	0,86	0,72	3,5
4АК200L4У3	30	1460	0,91	0,87	4
4АК200L8У3	18,5	725	0,86	0,73	3
4АК200L6У3	22	965	0,88	0,8	3,5
4АК200M4У3	22	1460	0,9	0,87	4
4АК200M6У3	18,5	965	0,88	0,81	3,5
4АК200M8У3	15	725	0,86	0,7	3
4АК225M4У3	37	1450	0,9	0,87	3
4АК225M6У3	30	965	0,89	0,85	2,5
4АК225M8У3	22	715	0,87	0,82	2,2
4АК250S4У3	55	1455	0,91	0,9	3
4АК250S6У3	37	965	0,89	0,84	2,5
4АК250S8У3	30	720	0,89	0,81	2,2
4АК250SA4У3	45	1455	0,91	0,88	3
4АК250M4У3	71	1460	0,92	0,86	3
4АК250M6У3	45	970	0,91	0,87	2,5
4АК250M8У3	37	725	0,89	0,8	2,2
4АНК200L8У3	22	715	0,87	0,79	2,5
4АНК160S4У3	14	1425	0,87	0,85	3
4АНК160M4У3	17	1425	0,88	0,87	3,5
4АНК180S4У3	22	1420	0,87	0,86	3,2
4АНК180S6У3	13	930	0,84	0,81	3
Інші серії					
АІР160S4	15,0	1500	0,89	0,87	2,9
АІР160M4	18,5	1500	0,90	0,89	2,9
АІР160S6	11,0	1000	0,87	0,82	2,9

Продовження таблиці Б.1

Тип двигуна	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos \varphi$	$M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$
АИР160М6	15,0	1000	0,89	0,82	3,0
АИР80-06У2	0,25	850	0,66	0,76	1,6
АИР80-06У2	0,37	850	0,675	0,78	1,6
АИР160S8	7,5	750	0,86	0,73	2,4
АИР160М8	11,0	750	0,87	0,75	2,4
АИР160М12	5,5	500	0,75	0,58	2,1
АИР 56 А2	0,18	2730	0,65	0,78	2,2
АИР 56 А4	0,12	1350	0,58	0,66	2,2
АИР 56 В2	0,25	2730	0,66	0,79	2,2
АИР 56 В4	0,18	1350	0,60	0,68	2,2
АИР 63 А2	0,37	2730	0,72	0,86	2,2
АИР 63 А4	0,25	1320	0,65	0,67	2,2
АИР 63 А6	0,18	860	0,56	0,62	2,2
АИР 63 В2	0,55	2730	0,75	0,85	2,2
АИР 63 В4	0,37	1320	0,68	0,7	2,2
АИР 63 В6	0,25	860	0,59	0,62	2,2
АИР 71 А2	0,75	2815	0,74	0,83	2,7
АИР 71 А4	0,55	1410	0,70	0,78	2,0
АИР 71 А6	0,37	920	0,65	0,63	2,3
АИР 71 В2	1,1	2800	0,77	0,86	2,8
АИР 71 В4	0,75	1415	0,73	0,74	2,5
АИР 71 В6	0,55	920	0,69	0,68	2,2
АИР 71 В8	0,25	690	0,58	0,6	1,9
АИР 80 А2	1,5	2835	0,79	0,87	3,0
АИР 80 А4	1,1	1420	0,77	0,8	2,6
АИР 80 А6	0,75	930	0,71	0,7	2,4
АИР 80 А8	0,37	700	0,59	0,62	2,2
АИР 80 В2	2,2	2820	0,82	0,87	3,2
АИР 80 В4	1,5	1420	0,78	0,8	2,8
АИР 80 В6	1,1	930	0,72	0,72	2,4
АИР 80 В8	0,55	700	0,60	0,62	2,4
АИР 90 L2	3,0	2835	0,82	0,86	3,2
АИР 90 L4	2,2	1390	0,78	0,82	2,6
АИР 90 L6	1,5	925	0,76	0,71	2,8
АИР 90 LA8	0,75	705	0,67	0,6	2,3
АИР 90 LB8	1,1	705	0,72	0,68	2,4
АИР 100 S2	4,0	2820	0,82	0,84	3,2
АИР 100 S4	3,0	1395	0,78	0,8	3,0
АИР 100 L2	5,5	2860	0,84	0,86	2,2
АИР 100 L4	4,0	1425	0,84	0,82	3,0
АИР 100 L6	2,2	925	0,76	0,71	3,1
АИР 100 L8	1,5	705	0,75	0,71	2,5
АИРМ 112 М2	7,5	2895	0,87	0,89	3,2
АИРМ 112 М4	5,5	1450	0,87	0,85	3,0
АИРМ112МА6	3,0	960	0,83	0,79	2,6
АИРМ112МВ6	4,0	960	0,84	0,8	2,6

Закінчення таблиці Б.1

Тип двигуна	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos \varphi$	$M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$
АИРМ 112 МА8	2,2	705	0,75	0,75	2,3
АИРМ 112 МВ8	3,0	700	0,78	0,73	2,3
АИР 160 S2	15,0	2940	0,88	0,86	3,2
АИР 160 S4	15,0	1460	0,89	0,87	2,9
АИР 160 S6	11,0	970	0,87	0,82	2,9
АИР 160 S8	7,5	730	0,86	0,73	2,4
АИР 160 М2	18,5	2940	0,90	0,88	3,2
АИР 160 М4	18,5	1460	0,90	0,89	2,9
АИР 160 М6	15,0	970	0,89	0,82	3,0
АИР 160 М8	11,0	730	0,87	0,75	2,4
МТФ 311-6	11	945	0,80	0,71	3,0
МТН 311-6	11	940	0,80	0,71	3,0
МТФ 311-8	7,5	715	0,76	0,65	3,0
МТН 311-8	7,5	715	0,76	0,65	3,0
МТФ 312-6	15	955	0,82	0,74	3,0
МТН 312-6	15	955	0,82	0,74	3,0
МТФ312-8	11	705	0,785	0,74	3,0
МТН 312-8	11	705	0,785	0,65	3,0
МТФ 411-6	22	965	0,86	0,76	2,8
МТН 411-6	22	965	0,86	0,76	2,8
МТФ 411-8	15	710	0,83	0,62	3,2
МТН 411-8	15	710	0,83	0,62	3,2
МТФ 412-6	30	970	0,87	0,79	2,8
МТН 412-6	30	970	0,87	0,79	2,8
МТФ 412-8	22	720	0,83	0,7	3,0
МТН 412-8	22	720	0,83	0,7	3,0
4МТМ 200 LA6	22,0	960	0,86	0,76	2,8
4МТМ 200 LA8	15,0	720	0,83	0,62	3,2
4МТМ 200 LB6	30,0	960	0,87	0,79	2,8
4МТМ 200 LB8	22,0	720	0,83	0,7	3,0
4МТМ 225 М6	37,0	955	0,87	0,81	3,0
4МТМ 225 М8	30,0	715	0,85	0,72	2,9
4МТМ 225 L6	55,0	955	0,88	0,81	2,9
МКАФ 225 L6	55,0	970	0,88	0,81	2,9
4МТМ 225 L8	37,0	720	0,86	0,74	2,9
МТН 511-6	37,0	955	0,87	0,81	3,0
МТН 511-8	30,0	715	0,85	0,72	2,9
МТН 512-6	55,0	955	0,88	0,81	2,9
МТН 512-8	37,0	715	0,86	0,74	2,9
4МТМ 280 S6	75,0	955	0,89	0,86	3,2
4МТМ 280 L6	110,0	970	0,91	0,85	3,5
4МТМ 280 М8	55,0	720	0,89	0,81	3,2
4МТМ 280 L8	75,0	725	0,91	0,80	3,5

Примітка: Всі двигуни мають схему з'єднання фаз статора Y/Δ , а ротора – Y .