

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний гірничий університет



Кафедра електропривода

**МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
дисциплін «Системи керування електроприводами» та
«Моделювання електромеханічних систем»
Модуль №2**

для студентів напряму підготовки 0922 «Електромеханіка»

**Дніпропетровськ
2005**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний гірничий університет

Кафедра електропривода

МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
дисциплін «Системи керування електроприводами» та
«Моделювання електромеханічних систем»
Модуль №2

для студентів напряму підготовки 0922 «Електромеханіка»

Дніпропетровськ
2005

Матеріали методичного забезпечення дисциплін «Системи керування електроприводами» та «Моделювання електромеханічних систем». Модуль №2 для студентів напряму підготовки 0922 «Електромеханіка» / Упорядн.: С.М. Довгань, О.О. Азюковський, А.А. Самойленко. – Дніпропетровськ, Національний гірничий університет, 2005. – 26 с.

Упорядники:

С.М. Довгань, канд. техн. наук, професор;
О.О. Азюковський, канд. техн. наук, доцент;
А.А. Самойленко, канд. техн. наук, асистент.

Затверджено методичною комісією з напряму 0922 «Електромеханіка» (протокол № 5 від 23.05.05) за поданням кафедри електропривода (протокол № 5 від 28.04.05).

Подано методичні рекомендації до навчальної діяльності студента з усіх видів навчальних занять, лекцій, лабораторної та самостійної роботи за модулем №2 з дисциплін «Системи керування електроприводами» та «Моделювання електромеханічних систем» освітньо-кваліфікаційної програми підготовки фахівців напряму 0922 «Електромеханіка».

Рекомендовано до видання Навчально-методичним управлінням НГУ 15.06.05.

Моделювання асинхронного двигуна з фазним ротором

Мета – вивчення особливостей розрахунку параметрів асинхронних двигунів (АД) та моделювання реостатного пуску АД з фазним ротором.

I. ЛЕКЦІЙНИЙ МОДУЛЬ

Задача – оволодіти методологією:

- складання диференційних рівнянь, що описують динаміку руху асинхронного двигуна;
- складання структурного представлення асинхронного двигуна;
- розрахунку головних параметрів асинхронного двигуна з фазним ротором;
- розрахунку пускових опорів.

1. Узагальнена електрична машина

При дослідженні перехідних процесів у трифазних асинхронних електродвигунах доцільно прийняти такі припущення:

1. Обмотки фаз статора та ротора симетричні, їх вісі зсунуті на кут 120^0 .
2. Намагнічуючи сили обмоток двигуна розподілені синусоїдально вздовж повітряного зазору.
3. Втрат у сталі статора та ротора на гистерезис та вихрові струми немає.
4. Насичення магнітного кола відсутнє.
5. Параметри обмоток – приведені.

В реальній трифазній системі координат з осями А, В, С для опису динаміки асинхронного двигуна (АД) використовується громіздка система диференційних рівнянь, яка об'єднує рівняння для кожної фазної обмотки статора і ротора. При обертанні ротора взаємне положення обмоток статора та ротора безперервно змінюється, відповідно змінюється і взаємна індуктивність між ними. Це призводить до того, що у диференційних рівняннях з'являються періодичні коефіцієнти, які залежать від миттєвого кутового положення ротора.

Для зменшення кількості рівнянь і виключення гармонійних коефіцієнтів у переважній більшості випадків використовують перетворення координат і розглядають АД як узагальнену двофазну електричну машину з однією парою полюсів (рис. 1).

При математичному описі АД зручно оперувати не миттєвими значеннями координат (струмом, напругою, потокозчепленням), а їх результуючими векторами. Результатуючим є такий вектор, проекції якого на вісі фаз чисельно дорівнюють миттєвим значенням фазних величин.

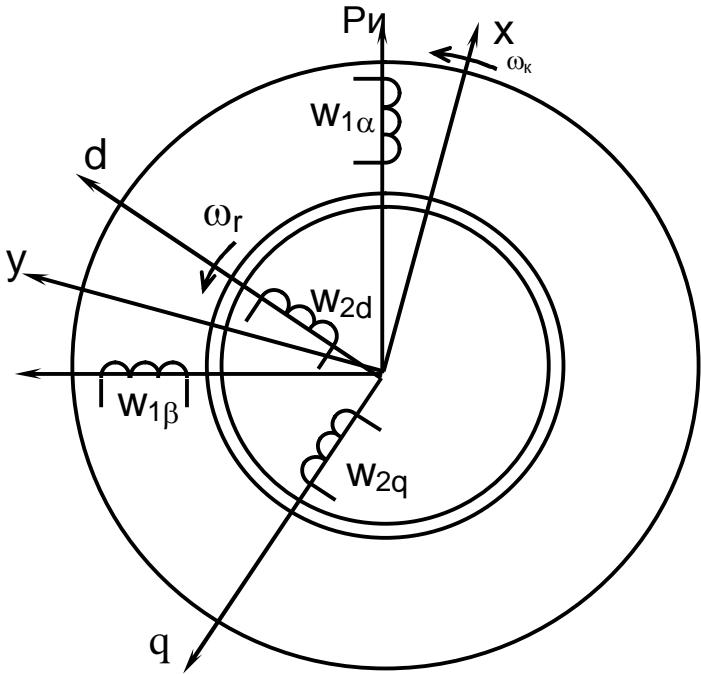


Рис. 1. Узагальнена електрична машина

При переході від трифазної системи координат А, В, С до еквівалентної двофазної “ α - β ” та при зворотному перетворенні величини результуючих векторів залишаються незмінними. У найбільш розповсюдженому випадку змінні трифазної машини задовольняють умові:

$$X_A + X_B + X_C = 0. \quad (1)$$

Тоді пряме перетворення координат 3→2 виглядає так:

$$\begin{cases} X_\alpha = X_A; \\ X_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(X_B - X_C), \end{cases} \quad (2)$$

а зворотне перетворення 2→3:

$$\begin{cases} X_A = X_\alpha; \\ X_B = -\frac{1}{2}X_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}X_\beta; \\ X_C = -\frac{1}{2}X_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}X_\beta. \end{cases} \quad (3)$$

Якщо умова (1) не виконується, то у рівняннях (2), (3) з'являються змінні нульової послідовності. У наведених виразах не зберігається баланс миттєвої потужності у трифазній та двофазній машинах. Незмінність потужності АД при перетвореннях координат $3 \rightarrow 2$ та $2 \rightarrow 3$ забезпечується введенням коефіцієнта $3/2$ у рівняння для обчислення електромагнітного моменту двофазної машини.

На рис.1 індексом “1” позначені величини статора, а індексом “2” – ротора. У прямокутній системі координат $x-y$, що обертається з довільною швидкістю ω_K , узагальнений асинхронний двигун описується рівняннями Парка – Горєва у векторній формі:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_K \bar{\Psi}_1; \\ \bar{u}_2 = R'_2 \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j\bar{\Psi}_2 (\omega_K - \omega_r p_n), \end{cases} \quad (4)$$

де $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2$ – відповідно результиуючі вектори напруг, струмів і потокозчеплень; R_1, R'_2 – відповідно активний опір обмотки статора та приведений активний опір обмотки ротора; p_n – кількість пар полюсів двигуна; ω_r – кутова швидкість ротора.

Електромагнітний момент АД визначається як векторний добуток потокозчеплення та струму:

$$M = \frac{3}{2} p_n (\bar{\Psi}_1 \times \bar{i}_1). \quad (5)$$

Вектори потокозчеплень можна записати через результиуючі вектори струмів статора і ротора:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = L_1 \bar{i}_1 + L_m \bar{i}_2; \\ \bar{\Psi}_2 = L_2 \bar{i}_2 + L_m \bar{i}_1, \end{cases} \quad (6)$$

де $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$; $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$ – повні індуктивності обмоток статора та ротора; L_m – максимальна взаємна індуктивність між цими обмотками; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора.

Враховуючи (6), крім рівняння (5) для визначення електромагнітного моменту можна отримати ще декілька еквівалентних виразів, до яких входитимуть комбінації інших координат АД.

Для повного опису перехідних процесів в АД до рівнянь напруг та моменту слід додати рівняння руху електропривода

$$M - M_C = J \frac{d\omega_r}{dt},$$

де M_C – момент опору на валу АД; J – момент інерції електропривода, приведений до вала АД.

На практиці користуються не векторними виразами (4)-(6), а записують їх в проекціях на дійсну та уявну вісі системи координат. Крім того, завдяки певному вибору швидкості системи координат ω_K вдається дещо спростити рівняння АД.

Найбільш поширені такі варіанти вибору швидкості ω_K [1, 2]:

1. $\omega_K = 0$. У цьому випадку всі величини АД приводяться до нерухомої системи координат “ α - β ”, дійсна вісь “ α ” якої жорстко зв’язана з віссю фази А обмотки статора, а уявна вісь “ β ” випереджає її на кут 90 електричних градусів. В такій системі напруги і струми обмоток АД залишаються змінними, але мають однакову частоту, яка дорівнює кутовій частоті мережі живлення $\omega_0 = 2\pi f_H$.
2. $\omega_K = \omega_r p_n$. Реальні змінні АД перетворюються до системи координат “ d - q ”, швидкість обертання якої дорівнює електричній швидкості ротора $\omega_r p_n$. Тут також напруги та струми виявляються змінними, але мають як в роторі, так і в статорі частоту ($\omega_0 - \omega_r p_n$), тобто частоту струму ротора.
3. $\omega_K = \omega_0$. Такий вибір ω_K є найбільш доцільним при дослідженні перехідних процесів в АД, керування яким здійснюється шляхом зміни частоти та напруги обмотки статора (так зване “частотне керування”). У системі координат “ x - y ”, яка обертається із синхронною швидкістю поля АД ω_0 , прикладені до обмоток статора реальні змінні напруги при застосуванні формул (2) перетворюються у постійну напругу $U_x = const$, напрям якої співпадає з напрямом дійсної вісі “ x ”.
4. При синтезі та дослідженні систем векторного керування швидкістю електропривода з АД не встановлюють якесь фіксоване значення ω_K , а пов’язують дійсну вісь “ x ” системи координат “ x - y ” з результатуючим просторовим вектором струму, напруги, або потокозчеплення статора або ротора. Усього можливо скласти 6 головних структурних схем АД, в залежності від того, який вектор буде використовуватись як опорний: $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2$. Орієнтація системи “ x - y ” відносно результуючого вектора потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_2$ забезпечує максимальне

спрощення рівняння моменту двигуна і зумовлює відносно просте регулювання швидкості АД.

2. Асинхронний двигун у системі координат “ α - β ”

У нерухомій системі координат $\omega_K = 0$ рівняння АД (4), (5) в проекціях на дійсну та уявну вісі системи координат “ α - β ”, набирають відповідно наступного вигляду:

$$\begin{cases} u_{1\alpha} = R_1 i_{1\alpha} + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} = R_1 i_{1\beta} + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}; \\ u_{2\alpha} = R'_2 i_{2\alpha} + \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} + \omega_r p_n \Psi_{2\beta}; \\ u_{2\beta} = R'_2 i_{2\beta} + \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} - \omega_r p_n \Psi_{2\alpha}; \end{cases} \quad (7)$$

$$M = \frac{3}{2} p_n L_m k_\sigma (\Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}), \quad (8)$$

де $k_\sigma = \frac{1}{L_1 L_2 - L_m^2}$.

Враховуючи рівняння електропривода, систему рівнянь (7) в нормальній формі Коши можна представити наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt} = u_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt} = u_{1\beta} - R_1 i_{1\beta}; \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = u_{2\alpha} - R'_2 i_{2\alpha} - \omega_r p_n \Psi_{2\beta}; \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = u_{2\beta} - R'_2 i_{2\beta} + \omega_r p_n \Psi_{2\alpha}; \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M - M_C}{J}. \end{cases} \quad (9)$$

Момент двигуна в рівняннях (8) або (9) знаходитьться через проекції векторів потокозчеплення статора та ротора. Запис диференційних рівнянь через потокозчеплення забезпечує найкомпактніший їхній

вигляд. Але при цьому із системи рівнянь (6) додатково необхідно записати алгебраїчні вирази, що зв'язують струми з потокозчепленнями:

$$\begin{aligned} i_{1\alpha} &= k_\sigma(L_2\Psi_{1\alpha} - L_m\Psi_{2\alpha}); & i_{2\alpha} &= k_\sigma(L_1\Psi_{2\alpha} - L_m\Psi_{1\alpha}); \\ i_{1\beta} &= k_\sigma(L_2\Psi_{1\beta} - L_m\Psi_{2\beta}); & i_{2\beta} &= k_\sigma(L_1\Psi_{2\beta} - L_m\Psi_{1\beta}). \end{aligned} \quad (10)$$

Рівняння (7)-(9) записані для загального випадку живлення двигуна як з боку статора, так і з боку ротора. Структурна схема АД у системі координат “ α - β ” зображена на рис. 2.

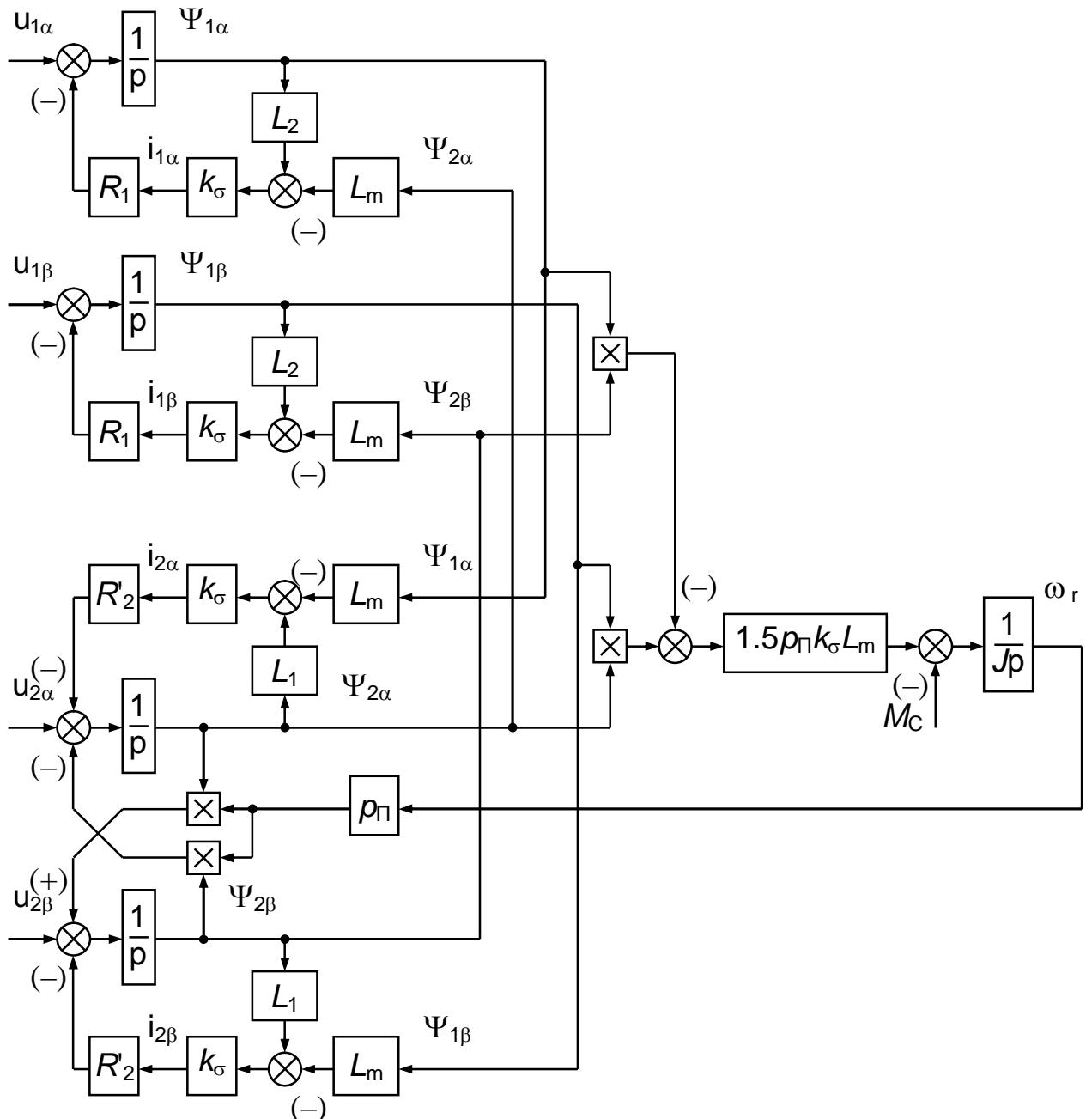


Рис. 2. Структурна схема АД у системі координат “ α - β ”

Параметри L_1, L_2, L_m двофазної моделі АД можна розрахувати через параметри трифазного двигуна, що вказуються в каталогах або довідниках за допомогою співвідношень:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{\omega_0}; \quad L_2 = \frac{X'_2 + X_\mu}{\omega_0}; \quad L_m = \frac{X_\mu}{\omega_0}, \quad (11)$$

де X_1 – індуктивний опір розсіювання обмотки статора; X'_2 – індуктивний опір обмотки ротора приведений до обмотки статора; X_μ – головний індуктивний опір.

Із каталогів беруть також значення активного опору обмотки статора R_1 і приведеного до обмотки статора активного опору обмотки ротора R'_2 .

Досить часто значення параметрів схеми заміщення АД (активні та індуктивні опори статора і ротора) в довідниках приведені у відносних одиницях. При моделюванні АД необхідно використовувати абсолютні значення опорів, що можна обчислити за наступними формулами:

$$x = X^* \cdot \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\text{ном.ф}}}; \quad r = R^* \cdot \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\text{ном.ф}}}, \quad (12)$$

де X^*, R^* – опір у відносних одиницях; x, r – опір, Ом; $I_{1\text{ном.ф}}$ – номінальний фазний струм статора, А; $U_{1\phi H}$ – номінальна фазна напруга, В.

Номінальний фазний струм статора визначається за формулою:

$$I_{1\text{ном.ф}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{3 \cdot U_{1\phi H} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}, \quad (13)$$

де $P_{2\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна, кВт; η – коефіцієнт корисної дії (ККД); $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

Параметри $P_{2\text{ном}}, U_{1\phi H}, \eta$ та $\cos \varphi$ є паспортними даними двигуна та вказуються на заводській таблиці, що розташована на двигуні.

3. Призначення та розрахунок пускових резисторів для асинхронних двигунів з фазним ротором

При запуску АД з фазним ротором (ф.р.) за умови, що контактні кільця закорочено, струм ротора достатньо великий у наслідок значної ЕРС, яка індукується в нерухомому роторі. Причиною значної ЕРС є потік статора, що швидко обертається, та малий активний опір фаз ротора.

Пусковий коефіцієнт потужності настільки малий, що навіть при великому струмі ротора момент двигуна порівняно невеликий. Низький

коєфіцієнт потужності пояснюється величим зсувом фаз між ЕРС та струмом ротора у наслідок збільшеного реактивного опору фаз ротора при збільшенні частоті.

Таким чином, в режимі пуску АД із закороченими контактними кільцями ротора двигун забезпечує момент 0,5–1,5 від номінального, а струм статора та ротора при цьому більше номінального у 5–10 разів. Такий великий струм в статорі та роторі неприпустимий за умовами динамічних зусиль в обмотках і їхнього нагріву, а низький пусковий момент є недостатнім для електропривода.

Введення додаткового (пускового) резистора в коло ротора зменшує пусковий струм і настільки збільшує коефіцієнт потужності, що пусковий момент двигуна збільшується. Таким чином, кратність моменту майже дорівнює кратності струму, але якщо опір кола ротора є відносно великим, тоді струм ротора сильно падає, а пусковий момент знову зменшується.

У процесі розгону двигуна ЕРС ротора спадає, тому струм ротора та момент також спадатиме. Для підтримки темпу розгону електропривода необхідне ступінчасте зменшення опору пускового резистора (поступове замикання контакторів К1.1–К4.1 та К1.2–К4.2), звідси при даній ЕРС тимчасово збільшується струм та момент двигуна. За умови, що додатковий опір виведений, двигун починає працювати на природній характеристиці. Статичні пускові характеристики мають вигляд, як показано на рис. 3, де $R_{пус}$ – значення введеного пускового опору.

Максимальні пускові піки моментів АД бажано приймати не більше 0,85% від максимального (критичного) моменту. Мінімальний момент перемикання приймають не менш 10-30% від моменту опору (навантаження) двигуна.

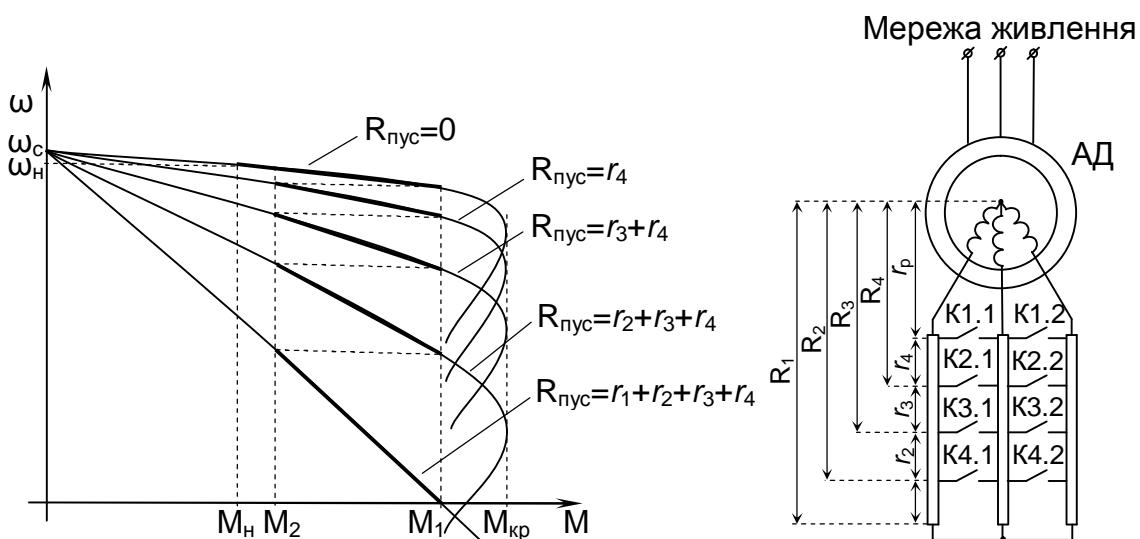


Рис. 3. Пускові характеристики АД з чотирма ступінями прискорення при побудуванні наближеним способом

В залежності від необхідної точності та існуючих даних АД розрахунок пускових резисторів можна виконувати точним або наближеним способом. Найбільш поширеним є наближений аналітичний спосіб, що ґрунтуються на прямолінійності механічних характеристик АД і аналогічний розрахунку пускових резисторів для двигунів постійного струму паралельного або незалежного збудження. Розрахунок пускових резисторів виконується з урахуванням режиму пуску (нормальній або форсований) та кількості ступіней перемикання:

а) Число ступіней задано (m), режим пуску форсований. Задаємося максимальним припустимим (піковим) моментом $M_1 = 0.85M_{kp}$ та визначаємо співвідношення піків моментів до моменту перемикання M_2 :

$$\lambda = m \sqrt{\frac{M_H}{s_H M_1}}. \quad (14)$$

Перевіряємо моменти перемикання:

$$M_2 = \frac{M_1}{\lambda} \geq 1,1 \dots 1,2 \cdot M_C. \quad (15)$$

Визначимо опори ступіней пускових резисторів ($r_p = R'_2$):

$$\left. \begin{array}{l} r_m = r_p \cdot (\lambda - 1); \\ r_{m-1} = r_m \cdot \lambda; \\ \dots \dots \dots \\ r_2 = r_3 \cdot \lambda; \\ r_1 = r_2 \cdot \lambda. \end{array} \right\} \quad (16)$$

Повні активні опори кола ротора, що необхідні при розрахунках опорів ступіней пускових резисторів, визначаються за формулами:

$$\left. \begin{array}{l} R_m = r_p \cdot \lambda; \\ R_{m-1} = R_m \cdot \lambda; \\ \dots \dots \dots \\ R_2 = R_3 \cdot \lambda; \\ R_1 = R_2 \cdot \lambda. \end{array} \right\} \quad (17)$$

б) Число ступіней задано (m), режим пуску нормальній. Задаємося моментами перемикання M_2 на 10-20% вище статичного моменту та визначаємо співвідношення моментів:

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{M_H}{s_H M_2}}. \quad (18)$$

Перевіряємо пікові моменти:

$$M_1 = \lambda M_2 \leq 0,85 M_{kp}.$$

Визначимо опори ступіній пускових резисторів за виразами (16).

Повні активні опори кола ротора, що необхідні при розрахунках опорів ступіній пускових резисторів, визначаються за формулами (17).

в) Число ступіній невідоме і його необхідно визначити. В залежності від режиму роботи електропривода момент перемикання та піковий момент повинен становити:

$$M_2 \geq 1,1 \dots 1,2 \cdot M_C;$$

$$M_1 \leq 0,85 \cdot M_{kp}.$$

Кількість ступіній перемикання

$$m = \frac{\lg \frac{M_H}{s_H M_1}}{\lg \frac{M_1}{M_2}}. \quad (19)$$

Якщо m ірраціональне число, тоді змінюють величини моментів M_1 або/та M_2 так, щоб m стало цілим.

Визначимо λ як співвідношення моментів, а за виразом (16) або (17) знаходимо відповідно опори ступіній або повні опори.

4. Приклад дослідження переходних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором

Розглянемо моделювання реостатного пуску АД з фазним ротором типу 4АНК200L4У3.

Номінальні параметри двигуна типу 4АНК200L4У3

Тип	$U_{\phi H}$, В	f , Гц	P_H , кВт	n_C , об/хв	J_D , кгм ²	s_H , %	η_H , %	$\cos \phi_H$	r_1^*	x_1^*	$r_2'^*$	$x_2'^*$	x_μ^*
4АНК200L4У3	220	50	45,0	1500	0,43	3,5	90,0	0,88	0,029	0,067	0,036	0,1	3,4

Примітка*: Параметри активних та індуктивних опорів наведені у відносних одиницях.

Напруга живлення двигуна синусоїдальна, а мережа живлення трифазна та симетрична. У такому разі в системі рівнянь (9) слід

прийняти $u_{2\alpha} = u_{2\beta} = 0$, а симетрична трифазна система синусоїдальних напруг статора з початковою фазою ϕ та амплітудою U_m в системі координат “ α - β ” згідно з (2) матиме вигляд:

$$u_{1\alpha} = U_m \cos(\omega_0 t + \phi);$$

$$u_{1\beta} = U_m \sin(\omega_0 t + \phi).$$

Враховуючи (13), знаходимо номінальний струм:

$$I_{\phi H} = \frac{P_H}{3U_{\phi H}\eta_H \cos \varphi_H} = \frac{45000}{3 \cdot 220 \cdot 0,90 \cdot 0,88} = 86,09 \text{ A.}$$

Відповідно до (12) отримаємо абсолютні значення опорів, що є складовими рівнянь (9) і (10):

$$R_1 = r_1^* \cdot \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\text{ном.ф}}} = 0,029 \frac{220}{86,09} = 0,074 \text{ Ом};$$

$$R'_2 = r'_2^* \cdot \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\text{ном.ф}}} = 0,036 \frac{220}{86,09} = 0,092 \text{ Ом};$$

$$X_1 = x_1^* \cdot \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\text{ном.ф}}} = 0,067 \frac{220}{86,09} = 0,171 \text{ Ом};$$

$$X'_2 = x'_2^* \cdot \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\text{ном.ф}}} = 0,1 \frac{220}{86,09} = 0,256 \text{ Ом};$$

$$X_\mu = x_\mu^* \cdot \frac{U_{1\phi H}}{I_{1\text{ном.ф}}} = 3,4 \frac{220}{86,09} = 8,689 \text{ Ом.}$$

Частота мережі живлення

$$\omega_0 = 2\pi f_H = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314 \text{ Гц.}$$

За формулами (11) знаходимо значення індуктивностей:

$$L_1 = \frac{X_1 + X_\mu}{\omega_0} = \frac{0,171 + 8,689}{314} = 0,0282 \text{ Гн};$$

$$L_2 = \frac{X'_2 + X_\mu}{\omega_0} = \frac{0,256 + 8,689}{314} = 0,0285 \text{ Гн};$$

$$L_m = \frac{X_\mu}{\omega_0} = \frac{8,689}{314} = 0,0277 \text{ Гн.}$$

Номінальний момент

$$M_H = \frac{3R'_2}{s_H \omega_c} \cdot \frac{U_{\phi H}^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2} = 324,55 \text{ H}\cdot\text{m}.$$

Критичний момент

$$M_{kp} = \frac{3}{2 \cdot \omega_c} \cdot \frac{U_{\phi H}^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = 911,13 \text{ H}\cdot\text{m}.$$

Кількість пар полюсів

$$p_P = 3000/n_O = 3000/1500 = 2.$$

Визначимо коефіцієнт k_σ :

$$k_\sigma = \frac{1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} = 26310,0$$

Приймемо число ступіней пускових резисторів $m=5$, режим пуску форсований. Приймемо максимальним піковим моментом $M_1 = 0,85M_{kp}$ та визначимо співвідношення (14) піків моментів до моменту перемикання M_2 :

$$\lambda = m \sqrt{\frac{M_H}{s_H M_1}} = 5 \sqrt{\frac{324,55}{0,035 \cdot 0,85 \cdot 911,13}} = 1,643 .$$

Моменти перемикання M_2 :

$$M_2 = \frac{M_1}{\lambda} = \frac{774,46}{1,643} = 471,36 \text{ H}\cdot\text{m}.$$

Перевіряємо моменти перемикання за формулою (16).

За формулами (17) розраховуємо повні активні опори кола ротора:

$$\begin{aligned} R_1 &= R'_2 \cdot \lambda = 0,092 \cdot 1,643 = 0,151 \text{ Ом}; \\ R_2 &= R_1 \cdot \lambda = 0,151 \cdot 1,643 = 0,248 \text{ Ом}; \\ R_3 &= R_2 \cdot \lambda = 0,248 \cdot 1,643 = 0,408 \text{ Ом}; \\ R_4 &= R_3 \cdot \lambda = 0,408 \cdot 1,643 = 0,67 \text{ Ом}; \\ R_5 &= R_4 \cdot \lambda = 0,67 \cdot 1,643 = 1,102 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Ковзання на природній характеристиці в момент перемикання M_2 :

$$s_1 = s_H \frac{M_1}{M_H \cdot \lambda} = 0,035 \frac{774,46}{324,55 \cdot 1,643} = 0,051.$$

Швидкість двигуна, при якій необхідно виводити відповідний додатковий опір, тобто переходити від однієї штучної характеристики двигуна до іншої (рис. 3):

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_c \cdot \left(1 - s_1 \frac{R_1}{R'_2}\right)}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500 \cdot \left(1 - 0,051 \cdot \frac{0,151}{0,092}\right)}{30} = 143,96 \text{ рад/с};$$

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_c \cdot \left(1 - s_1 \frac{R_2}{R'_2}\right)}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500 \cdot \left(1 - 0,051 \cdot \frac{0,248}{0,092}\right)}{30} = 135,52 \text{ рад/с};$$

$$\omega_3 = \frac{\pi \cdot n_c \cdot \left(1 - s_1 \frac{R_3}{R'_2}\right)}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500 \cdot \left(1 - 0,051 \cdot \frac{0,408}{0,092}\right)}{30} = 121,67 \text{ рад/с};$$

$$\omega_4 = \frac{\pi \cdot n_c \cdot \left(1 - s_1 \frac{R_4}{R'_2}\right)}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500 \cdot \left(1 - 0,051 \cdot \frac{0,67}{0,092}\right)}{30} = 98,89 \text{ рад/с};$$

$$\omega_5 = \frac{\pi \cdot n_c \cdot \left(1 - s_1 \frac{R_5}{R'_2}\right)}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500 \cdot \left(1 - 0,051 \cdot \frac{0,102}{0,092}\right)}{30} = 61,477 \text{ рад/с.}$$

На рис. 4 наведено приклад моделювання реостатного пуску АД у пакеті MathCAD з реактивним моментом опору на валу $M_H = 324,55 \text{ Н}\cdot\text{м}$ та початковою фазовою напругою статора $\phi = \pi/2 \text{ рад}$. У програмі змінна "n" визначає кількість точок для побудови графіків, td – крок розрахунку.

Графіки переходних процесів $M(t)$, $\omega(t)$, $i_1(t)$, $\Psi_1(t)$ надані на рис. 5.

На рис. 6 представлена динамічна та статична механічна характеристики АД.

Щоб зупинити АД шляхом вільного вибігу, слід прийняти $u_{1\alpha} = u_{1\beta} = 0$.

Якщо необхідно зупинити двигун противмиканням, необхідно змінити напрям обертання магнітного поля (здійснити перемикання напруги двох фаз статора) і чекати, доки швидкість вала двигуна не наблизиться до нульового значення, до того вибором додаткового резистора можна контролювати максимальний гальмовий момент. Далі слід відключити АД від мережі, приклавши до обмоток статора нульові напруги. Приклад реалізації напруг статора АД у режімі пуску та гальмування противмиканням показаний на рис. 7. Гальмування починається з часу t_1 . У наведеному прикладі при зменшенні швидкості вала ротора до рівня $|\omega_r| < 2 \text{ рад}$ АД відключається від мережі живлення.

На рис. 8 представлено порівняння динамічних механічних характеристик АД при реостатному та прямому пусках.

Вихідні дані

$$P_n = 45000 \text{ Un} = 220 \cos\phi = 0.88 \quad \eta = 0.9 \quad sn = 0.035 \quad r_{1o} = 0.029 \quad x_{1o} = 0.067 \quad x_{\mu o} = 3.4 \quad fn = 50$$

$$r_{2o} = 0.036 \quad x_{2o} = 0.1 \quad no = 1500 \quad Icn = \frac{P_n}{3 \cdot Un \cdot \eta \cdot \cos\phi} \quad Z_b = \frac{Un}{Icn} \quad R_2 = r_{2o} \cdot Z_b \quad x_2 = x_{2o} \cdot Z_b$$

$$r_1 = r_{1o} \cdot Z_b \quad x_1 = x_{1o} \cdot Z_b \quad x_\mu = x_{\mu o} \cdot Z_b \quad J = 0.43 \quad \phi = \frac{\pi}{2} \quad p = \frac{3000}{no} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot fn \quad \omega = 314.159$$

$$Icn = 86.088 \quad Z_b = 2.556 \quad R_2 = 0.092 \quad x_2 = 0.256 \quad r_1 = 0.074 \quad x_1 = 0.171 \quad x_\mu = 8.689 \quad p = 2$$

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot no \cdot (1 - sn)}{30} \quad \omega_0 = \frac{\pi \cdot no}{30} \quad L_1 = \frac{x_1 + x_\mu}{\omega} \quad L_2 = \frac{x_2 + x_\mu}{\omega} \quad L_m = \frac{x_\mu}{\omega} \quad U_m = \sqrt{2} \cdot Un \quad k\sigma = \frac{1}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2}$$

$$\omega_n = 151.582 \quad \omega_0 = 157.08 \quad L_1 = 0.028 \quad L_2 = 0.028 \quad L_m = 0.028 \quad U_m = 311.127 \quad k\sigma = 2.631 \times 10^4$$

$$M_n = \frac{3 \cdot R_2}{sn \cdot \omega_0} \cdot \frac{U_n^2}{\left(r_1 + \frac{R_2}{sn} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad M_{kr} = \frac{3}{\omega_0 \cdot 2} \cdot \frac{U_n^2}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2}} \quad M_n = 324.553 \quad M_{kr} = 911.126$$

$$td = 0.0005 \quad n = 2000$$

$$t_{max} = 0.9 \quad M_r = M_n$$

Розрахунок опорів пускового реостату

$$m = 5 \quad M_1 = 0.85 \cdot M_{kr} \quad M_1 = 774.457 \quad \lambda = \sqrt[m]{\frac{M_n}{sn \cdot M_1}} \quad \lambda = 1.643 \quad M_2 = \frac{M_1}{\lambda} \quad M_2 = 471.361$$

$$R_{r1} = R_2 \cdot \lambda \quad R_{r2} = R_2 \cdot \lambda^2 \quad R_{r3} = R_2 \cdot \lambda^3 \quad R_{r4} = R_2 \cdot \lambda^4 \quad R_{r5} = R_2 \cdot \lambda^5 \quad s_1 = sn \cdot \frac{M_1}{M_n \cdot \lambda}$$

$$R_{r1} = 0.151 \quad R_{r2} = 0.248 \quad R_{r3} = 0.408 \quad R_{r4} = 0.67 \quad R_{r5} = 1.102 \quad s_1 = 0.051$$

Розрахунок швидкостей, за якими виводиться опір ступіні

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot no \cdot \left(1 - s_1 \cdot \frac{R_{r1}}{R_2} \right)}{30} \quad \omega_2 = \frac{\pi \cdot no \cdot \left(1 - \frac{R_{r2}}{R_2} \cdot s_1 \right)}{30} \quad \omega_3 = \frac{\pi \cdot no \cdot \left(1 - \frac{R_{r3}}{R_2} \cdot s_1 \right)}{30}$$

$$\omega_4 = \frac{\pi \cdot no \cdot \left(1 - s_1 \cdot \frac{R_{r4}}{R_2} \right)}{30} \quad \omega_5 = \frac{\pi \cdot no \cdot \left(1 - \frac{R_{r5}}{R_2} \cdot s_1 \right)}{30} \quad \omega_1 = 143.961 \quad \omega_2 = 135.525 \quad \omega_3 = 121.665$$

$$\omega_4 = 98.892 \quad \omega_5 = 61.476$$

Розрахунок напруг, струмів та моментів

$$U_{1\alpha}(u) = U_m \cdot \cos(\omega \cdot u_0 + \phi) \quad U_{2\alpha}(u) = 0 \quad M(u) = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot k\sigma \cdot (u_2 \cdot u_3 - u_1 \cdot u_4)$$

$$U_{1\beta}(u) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot u_0 + \phi) \quad U_{2\beta}(u) = 0$$

$$I_{1\alpha}(u) = k\sigma \cdot (L_2 \cdot u_1 - L_m \cdot u_3) \quad I_{2\alpha}(u) = k\sigma \cdot (L_1 \cdot u_3 - L_m \cdot u_1) \quad M_c(u) = \begin{cases} M_r & \text{if } u_5 > 0 \\ -M_r & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$I_{1\beta}(u) = k\sigma \cdot (L_2 \cdot u_2 - L_m \cdot u_4) \quad I_{2\beta}(u) = k\sigma \cdot (L_1 \cdot u_4 - L_m \cdot u_2)$$

Рис. 4. Програма моделювання реостатного пуску АД у математичному пакеті MathCAD

Розрахунок статичної механічної характеристики $so := 0$

```

statica(so) := | s0,0 ← so
                | for i ∈ 1 .. n
                  |   | si,0 ← i / n
                  |   | Vi,0 ← π · (1 - si,0) · no / 30
                  |   | Rr ← | Rr5 if Vi,0 < ω5
                           | Rr4 if ω5 ≤ Vi,0 < ω4
                           | Rr3 if ω4 ≤ Vi,0 < ω3
                           | Rr2 if ω3 ≤ Vi,0 < ω2
                           | Rr1 if ω2 ≤ Vi,0 < ω1
                           | R2 otherwise
                  |   | Mi,1 ← 3 · Rr · Un2 / (si,0 · ω₀ · (r1 + Rr / si,0)2 + (x1 + x2)2)
                  |   | Vi,1 ← Mi,1
                | V

```

Моделювання виправленим методом Ейлера другого порядку

$un_5 \equiv 0$ $F(u) = \begin{pmatrix} 1 \\ U1\alpha(u) - I1\alpha(u) \cdot r_1 \\ U1\beta(u) - I1\beta(u) \cdot r_1 \\ U2\alpha(u) - Rr(u) \cdot I2\alpha(u) - u_5 \cdot p \cdot u_4 \\ U2\beta(u) - Rr(u) \cdot I2\beta(u) + u_5 \cdot p \cdot u_3 \\ \frac{M(u) - Mc(u)}{J} \end{pmatrix}$	$Eil(un) :=$	$Z^{(0)} \leftarrow un$ $\text{for } i \in 1 .. n$ $X^{(0)} \leftarrow Z^{(i-1)}$ $F1 \leftarrow F(X^{(i-1)})$ $X^{(i)} \leftarrow F1 \cdot td + X^{(i-1)}$ $F2 \leftarrow F(X^{(i)})$ $X^{(i)} \leftarrow \frac{F1 + F2}{2} \cdot td + X^{(i-1)}$ $Z^{(i)} \leftarrow X^{(i)}$ Z^T
---	--------------	---

res := Eil(un) Результати розрахунку перехідних процесів

$t := res^{(0)}$ $\Psi 1\alpha := res^{(1)}$ $\Psi 1\beta := res^{(2)}$ $\Psi 2\alpha := res^{(3)}$ $\Psi 2\beta := res^{(4)}$ $\omega := res^{(5)}$
 $i := 1 .. n$ $M_i := 1.5 \cdot p \cdot Lm \cdot kσ \cdot (\Psi 1\beta_i \cdot \Psi 2\alpha_i - \Psi 1\alpha_i \cdot \Psi 2\beta_i)$ $\Psi 1_i := \sqrt{(\Psi 1\alpha_i)^2 + (\Psi 1\beta_i)^2}$
 $I1\beta_i := kσ \cdot (L2 \cdot \Psi 1\beta_i - Lm \cdot \Psi 2\beta_i)$ $I1\alpha_i := kσ \cdot (L2 \cdot \Psi 1\alpha_i - Lm \cdot \Psi 2\alpha_i)$ $I1_i := \sqrt{(I1\alpha_i)^2 + (I1\beta_i)^2}$
 $static := static(so)$ $Md := static^{(1)}$ $ωst := static^{(0)}$

Рис. 4. Програма моделювання реостатного пуску АД у математичному пакеті MathCAD (продовження)

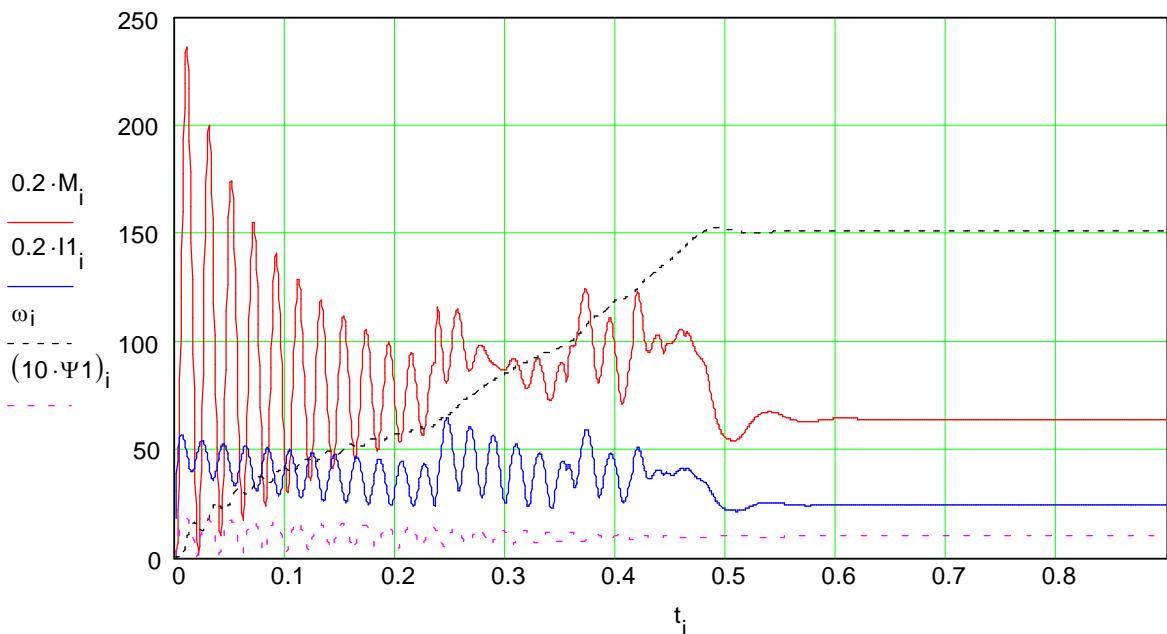


Рис. 5. Графіки переходних процесів реостатного пуску АД

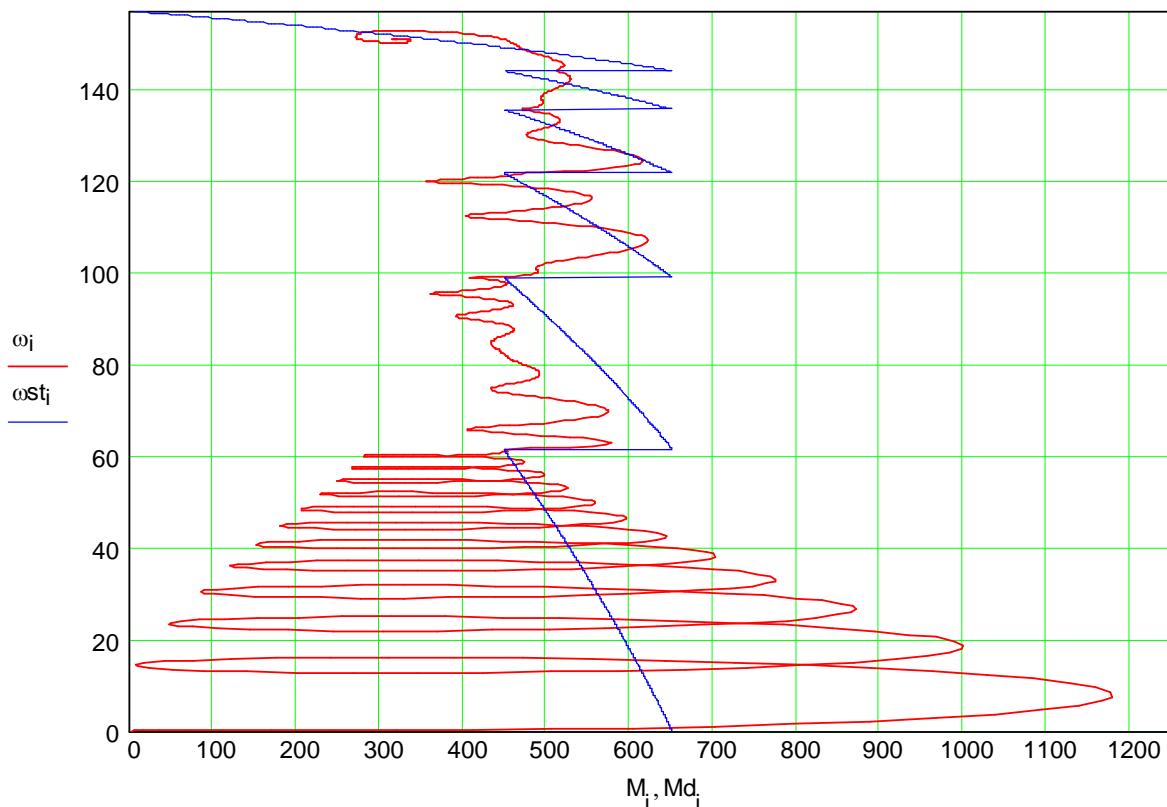


Рис. 6. Статична та динамічна механічні характеристики АД

$$U1\alpha(u) \equiv \begin{cases} Um \cdot \cos(\omega \cdot u_0 + \phi) & \text{if } u_0 < t1 \\ \text{otherwise} \\ \quad \left| \begin{array}{l} Um \cdot \sin(\omega \cdot u_0 + \phi) \quad \text{if } |u_5| > 2 \\ 0 \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \end{cases} \quad U1\beta(u) \equiv \begin{cases} Um \cdot \sin(\omega \cdot u_0 + \phi) & \text{if } u_0 < t1 \\ \text{otherwise} \\ \quad \left| \begin{array}{l} Um \cdot \cos(\omega \cdot u_0 + \phi) \quad \text{if } |u_5| > 2 \\ 0 \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \end{cases}$$

Рис. 7. Приклад зміни напруги АД при гальмуванні противмиканням

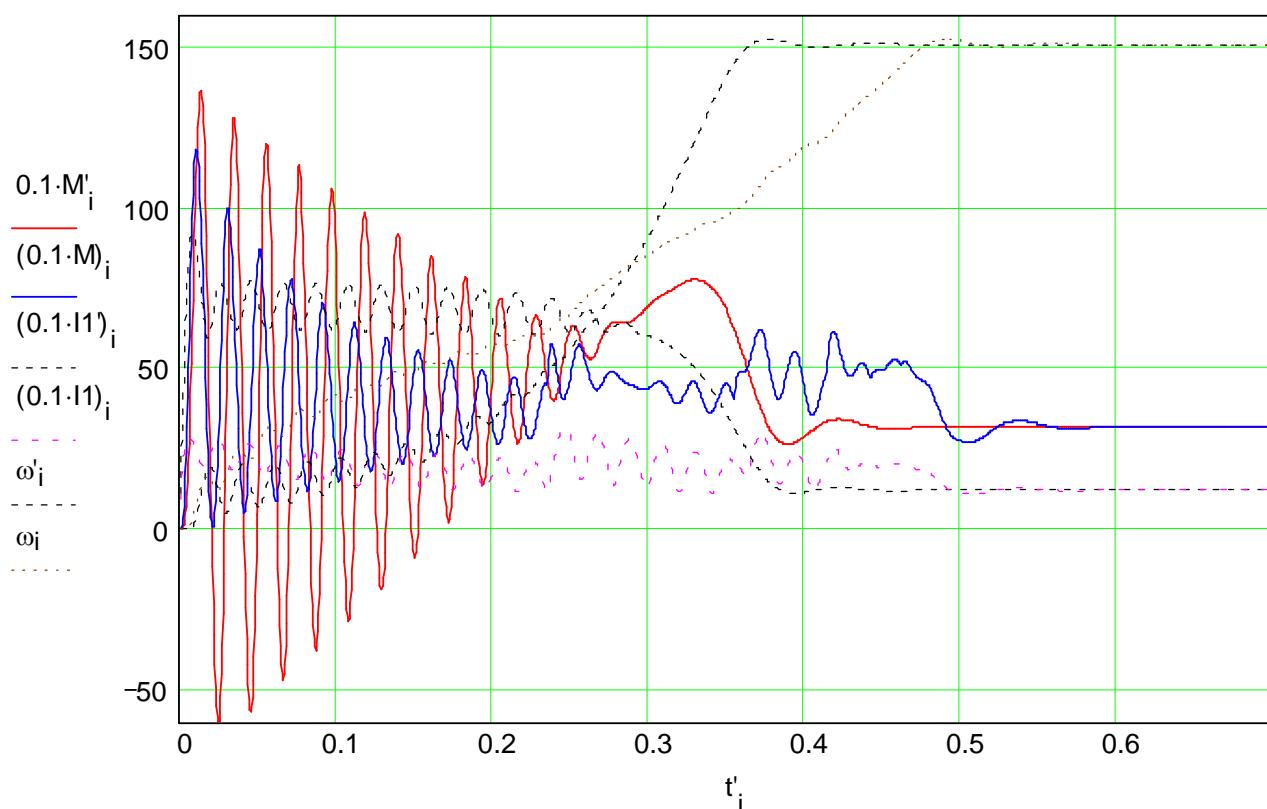


Рис. 8. Перехідні процеси при прямому (позначка «'») та реостатному пусках АД

5. Глосарій

Коефіцієнт потужності – відношення активної споживаної електричної потужності до повної електричної потужності, що споживається електричною машиною.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) – відношення корисної (що віддається) потужності до затраченої (що підводиться). Для двигунів – відношення корисної механічної потужності на валу до активної електричної потужності, що підводиться.

Початковий пусковий струм – струм, що встановлюється в обмотках електродвигуна при нерухомому роторі, номінальній напрузі живлення та номінальній частоті.

Початковий пусковий момент – момент обертання двигуна, що розвивається при нерухомому роторі, усталеному струмі, номінальній напрузі живлення та частоті.

Максимальний момент обертання – найбільший момент обертання, що має двигун в усталеному режимі при номінальній напрузі живлення та частоті.

Мінімальний момент обертання – найменший момент обертання, що має двигун у процесі розгону від нерухомого стану до частоти

обертання, яка відповідає максимальному моменту при номінальній напрузі живлення та частоті.

Статизм механічної характеристики (ковзання) – відношення зміни швидкості двигуна до швидкості холостого ходу за заданою характеристикою.

Критичне ковзання – ковзання, при якому асинхронна машина має максимальний момент обертання.

Пусковий опір – опір, що поступово вводиться (виводиться) в колі ротора під час пуску (гальмування) асинхронного двигуна.

6. Питання для самоперевірки

1. Які припущення приймають при складанні диференційних рівнянь узагальненої електричної машини?
2. Чому при дослідженнях перехідних процесів в трифазному АД останній доцільно представити двофазною машиною?
3. Якими рівняннями описують узагальнену електричну машину?
4. Як визначається електромагнітний момент АД?
5. Які системи координат використовуються для спрощення математичного описання АД?
6. Які параметри АД вказуються на заводській таблиці двигуна?
7. Чим відрізняється природна зміна швидкості від регульованої?
8. Яке призначення пускових резисторів?
9. Необхідні дії для підтримки темпу розгону електропривода.
10. Як впливає статичний момент навантаження на вибір значень реостатних опорів?
11. Чому розраховані статичні механічні характеристики при реостатному пуску АД не співпадають з теоретичними?
12. Які режими реостатного пуску АД ви знаєте?

7. Теми рефератів

1. Системи керування асинхронним двигуном з впливом на додатковий опір в роторному колі.
2. Система керування з введенням додаткової ЕРС в роторне коло.
3. Регулювання швидкості асинхронного двигуна тиристорним регулятором напруги.
4. Системи частотного керування.
5. Частотно-струмові системи керування.
6. Система векторного керування асинхронним двигуном.
7. Система прямого керування моментом асинхронного двигуна.

ІІ. ЛАБОРАТОРНИЙ МОДУЛЬ

Задача – оволодіти навичками:

- розрахунку параметрів АД з фазним ротором для моделювання різних режимів його роботи;
- розрахунку опорів пускових реостатів;
- налагодження систем реостатного керування АД з фазним ротором;
- моделювання фізичних процесів АД з фазним ротором у математичних пакетах MatLab та MathCAD.

Завдання на моделювання

Здійснити розрахунок головних параметрів АД з фазним ротором (значення активних та індуктивних опорів обмоток двигуна представлени у відносних одиницях) та пускових опорів згідно з індивідуальним завданням (додаток А, табл. 1, 2) – 1 бал.

Розробити програму моделювання різних режимів роботи двигуна у математичному пакеті MathCAD – 2 бали.

Виконати моделювання різних режимів роботи АД за допомогою бібліотек Simulink у математичному пакеті MatLab – 1 бал.

Виконати одночасне моделювання електричної машини згідно з індивідуальним завданням за умови реостатного та прямого пусків АД. Порівняти результати моделювання – 1 бал.

Зміст звіту

Необхідні розрахунки головних параметрів АД та пускових опорів.

Графіки переходних процесів координат $M(t)$, $\omega_r(t)$, $i_1(t)$, $\Psi_1(t)$ у математичному пакеті MathCAD

Графіки переходних процесів координат АД в математичному пакеті MatLab.

Графіки головних координат регулювання при реостатному та прямому пусках АД.

Додаток А
A.1. Варіанти індивідуальних завдань

Таблиця 1

Варіанти індивідуальних завдань

№	*Режими роботи	φ, рад	Δ, %	$\frac{Mr_1}{M_H}$	$\frac{Mr_2}{M_H}$	$\frac{t_1}{t_p}$	$\frac{t_2}{t_p}$	№ АД (табл.2)
1	1, 3, 5	0	10	0,1	—	1,1	1,2	25
2	2, 4, 6	$\pi/6$	—	0,2	0,6	1,2	1,3	24
3	1, 3, 7	$\pi/3$	15	0,3	—	1,1	1,2	23
4	2, 4, 5	$\pi/2$	—	0,4	0	1,3	1,4	22
5	1, 3, 6	$2\pi/3$	5	0,5	—	1,15	1,2	21
6	2, 4, 7	$5\pi/6$	—	0,6	1	1,1	1,2	20
7	1, 4, 5	π	—	0,1	0,7	1,05	1,1	19
8	2, 3, 6	$7\pi/6$	10	0,2	—	1,2	1,3	18
9	1, 4, 7	$4\pi/3$	—	0,3	0,9	1,1	1,2	17
10	2, 3, 5	$3\pi/2$	15	0,4	—	1,15	1,25	16
11	1, 4, 6	$5\pi/3$	—	0,5	0,2	1,1	1,2	15
12	2, 3, 7	$11\pi/6$	10	0,6	—	1,1	1,2	14
13	1, 3, 5	$11\pi/6$	5	0,2	—	1,2	1,3	13
14	2, 4, 6	$5\pi/3$	—	0,3	0,8	1,15	1,25	12
15	1, 3, 7	$3\pi/2$	10	0,4	—	1,1	1,2	11
16	2, 4, 5	$4\pi/3$	—	0,5	0,9	1,2	1,3	10
17	1, 3, 6	$7\pi/6$	5	0,6	—	1,3	1,4	9
18	2, 4, 7	π	—	0,1	0,8	1,25	1,35	8
19	1, 4, 5	$5\pi/6$	—	0,2	0,5	1,05	1,15	7
20	2, 3, 6	$2\pi/3$	15	0,3	—	1,1	1,2	6
21	1, 4, 7	$\pi/2$	—	0,4	0,7	1,2	1,3	5
22	2, 3, 5	$\pi/3$	10	0,5	—	1,15	1,25	4
23	1, 4, 6	$\pi/6$	—	0,6	0,1	1,1	1,2	3
24	2, 3, 7	0	5	0,5	—	1,05	1,15	2
25	1, 4, 5	$\pi/2$	—	0,3	0,6	1,15	1,25	1

*Примітки:

t_p – час досягнення номінальної швидкості (визначити експериментально).

Режими роботи:

1. Пуск "Вперед" з реактивним моментом опору Mr_1 .
2. Пуск "Назад" з реактивним моментом опору Mr_1 .
3. Зниження напруги мережі живлення на $\Delta\%$ у час t_1 .
4. Зміна реактивного моменту опору на валу з рівня Mr_1 на Mr_2 у час t_1 .
5. Реверс двигуна, початок в момент часу t_2 .
6. Зупинка АД противмиканням, початок в момент часу t_2 .
7. Зупинка АД вільним вибігом, початок в момент часу t_2 .

А.2. Параметри АД

Таблиця 2

Параметри АД з фазним ротором

№	Тип	P_H , кВт	n_C , об/хв	J_D , кг·м ²	s_H , %	η_H , %	$\cos \varphi_H$	r_1^*	x_1^*	r_2^*	x_2^*	x_μ^*
1	4АНК160S4У3	14	1500	0,1	5,3	86,5	0,85	0,047	0,081	0,061	0,10	3,1
2	4АНК160M4У3	17	1500	0,13	4,1	88,0	0,87	0,035	0,067	0,047	0,087	2,7
3	4АНК180S4У3	22	1500	0,19	5,2	87,0	0,86	0,033	0,061	0,054	0,089	2,4
4	4АНК180M4У3	30	1500	0,23	4,1	88,0	0,81	0,028	0,055	0,044	0,083	2,4
5	4АНК200M4У3	37	1500	0,36	3,0	90,0	0,88	0,029	0,065	0,035	0,099	3,2
6	4АНК225M4У3	55	1500	0,61	3,6	89,5	0,87	0,031	0,084	0,035	0,10	4,2
7	4АНК250SA4У3	75	1500	0,89	4,5	90,0	0,88	0,028	0,091	0,039	0,11	4,2
8	4АНК250SB4У3	90	1500	0,89	4,0	91,5	0,87	0,021	0,075	0,031	0,10	3,8
9	4АНК250M4У3	110	1500	0,97	3,5	92,0	0,90	0,022	0,078	0,031	0,10	4,3
10	4АНК280S4У3	132	1500	1,81	2,9	92,0	0,88	0,028	0,13	0,031	0,14	3,7
11	4АНК280M4У3	160	1500	2,11	2,6	92,5	0,88	0,024	0,12	0,028	0,14	3,3
12	4АНК315S4У3	200	1500	3,21	2,5	93,0	0,89	0,022	0,14	0,026	0,14	3,4
13	4АНК280M4У3	250	1500	3,72	2,5	93,0	0,90	0,022	0,15	0,025	0,14	4,1
14	4АНК355S4У3	315	1500	5,82	2,2	93,5	0,90	0,020	0,12	0,022	0,15	3,9
15	4АНК355M4У3	400	1500	7,09	2,0	94,0	0,90	0,019	0,12	0,020	0,14	4,8
16	4АНК180S6У3	13	1000	0,19	6,4	83,5	0,81	0,048	0,084	0,079	0,11	2,2
17	4АНК200M6У3	22	1000	0,38	3,5	88,0	0,81	0,032	0,071	0,043	0,11	2,6
18	4АНК200L6У3	30	1000	0,43	4,0	88,5	0,82	0,032	0,073	0,042	0,12	2,8
19	4АНК225M6У3	37	1000	0,7	4,0	89,0	0,86	0,032	0,079	0,038	0,10	2,9
20	4АНК250SA6У3	45	1000	1,1	4,0	89,5	0,86	0,028	0,069	0,032	0,09	2,8
21	4АНК250SB6У3	55	1000	1,1	3,5	91,0	0,88	0,024	0,060	0,027	0,088	3,0
22	4АНК250M6У3	75	1000	1,4	3,0	91,5	0,85	0,022	0,059	0,025	0,087	2,7
23	4АНК280S6У3	90	1000	2,5	3,6	91,0	0,88	0,033	0,12	0,038	0,14	3,0
24	4АНК280M6У3	110	1000	2,9	3,6	91,5	0,87	0,034	0,13	0,038	0,14	3,5
25	4АНК315S6У3	132	1000	4,9	3,0	92,0	0,88	0,026	0,12	0,029	0,14	3,6

Для всіх двигунів:

- напруга мережі живлення $U_{\Phi H}=220V$;
- частота мережі живлення $f=50$ Гц.

Перелік літературних джерел

1. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисик, В.А. Гаврилюк та ін. – К.: Вищ. Шк., 1993. – 494 с.
2. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи МЕМС-8 з дисципліни "Моделювання електромеханічних систем" для студентів спеціальності 7.092203 / Упорядн. В.І. Кириченко, С.Б. Савченко. – Дніпропетровськ: НГА України, 2001. – 17 с.
3. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
4. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання: Навч. посібник / С.М. Довгань. – Дніпропетровськ: НГА України, 2001. – 137 с.
5. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO. – М.: СК Пресс, 1998. – 352 с.

Зміст

	стор.
I. Лекційний модуль	3
1. Узагальнена електрична машина	3
2. Асинхронний двигун у системі координат “ α - β ”	7
3. Призначення та розрахунок пускових резисторів для асинхронних двигунів з фазним ротором	9
4. Приклад дослідження переходних процесів у асинхронному двигуні з фазним ротором	12
5. Глосарій	19
6. Питання для самоперевірки	20
7. Теми рефератів	20
II. Лабораторний модуль	21
Завдання на моделювання	21
Зміст звіту	21
Додаток А	22
A.1. Варіанти індивідуальних завдань	22
A.2. Параметри АД	23
Перелік літературних джерел	24
Зміст	25

Упорядники:
Довгань Сергій Михайлович
Азюковський Олександр Олександрович
Самойленко Андрій Анатолійович

МАТЕРІАЛИ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
дисциплін «Системи керування електроприводами» та
«Моделювання електромеханічних систем»
Модуль №2

для студентів напряму підготовки 0922 «Електромеханіка»

За редакцією авторів

Підписано до друку Формат 30x42/4
Папір Pollux. Ризографія. Умовн. Друк. арк.
Обліково-видавн. арк. Тираж 50 прим. Зам. №
Ціна договірна

Підготовлено до друку та видруковано у
Національному гірничому університеті

49027, м. Дніпропетровськ-27, просп. К. Маркса, 19