

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем»
та виконання самостійних та практичних завдань
для студентів спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(освітня програма «Електричні машини і апарати»)
усіх форм навчання

Методичні вказівки з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» та виконання самостійних та практичних завдань для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання. / Укл. : Т. П. Солодовнікова, С. О. Лапкіна . – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 34 с.

Укладачі: Т. П. Солодовнікова, старш. викл.,
С. О. Лапкіна, асист.

Рецензент Д.С. Яримбаш, проф., докт. техн. наук.

Відповідальний за випуск С. О. Лапкіна, асист.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні машини»
Протокол №1
від 14.08.23 р.

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол №1
від 21.09.2023 р.

ЗМІСТ

1 Вступ	4
2 Загальні методичні вказівки до виконання робіт	6
2.1 Теоретичні відомості.	6
2.2 Загальні відомості.	6
3 Самостійна робота до розділу «Асинхронні машини».	8
3.1 Варіанти завдань	8
3.2 Зміст роботи.	8
3.3 Методичні вказівки до виконання роботи.	9
4 Практичне завдання до розділу «Синхронні машини».	20
4.1 Варіанти завдань	20
4.2 Зміст роботи.	20
4.3 Методичні вказівки до виконання роботи.	20
5 Практична робота до розділу «Машини постійного струму».	26
5.1 Варіанти роботи	26
5.2 Зміст роботи.	26
5.3 Методичні вказівки до виконання роботи	27
6 Теоретичні питання самостійної роботи	28
6.1 Теми до самостійного вивчення.	28
6.2 Задачі до самостійної проробки.	29
Перелік джерел посилань	32
Додаток А. Зразок оформлення титульної сторінки	34

1 ВСТУП

Відповідно до навчального плану для заочної форми навчання зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») дисципліна «Моделювання електромеханічних систем» складається з лекцій, практичних та лабораторних занять, самостійних робіт та екзамену.

Індивідуальні завдання (реферати, індивідуальні завдання) та самостійні роботи студентами виконуються самостійно за рахунок бюджету часу на самостійну роботу, при консультуванні викладачем.

Метою вивчення дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» є вивчення та засвоєння методів розрахунків перехідних процесів та сталих режимів роботи електричних машин з використанням сучасних програм розрахунків для ЕОМ. Ці розрахунки виконуються з метою засвоєння різноманітних методів одержання результатів, їх порівняння та подальшого аналізу, що необхідно враховувати при проектуванні та оптимізації конструкцій різних електричних машин.

Дисципліна «Моделювання електромеханічних систем» є одною з основних в теоретичній підготовці студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати»). Її вивчення необхідно для заключного етапу підготовки спеціалістів з електричних машин – виконання дипломного проекту – та застосування знань в інженерній діяльності.

Задачі вивчення дисципліни

Для досягнення вказаної мети в процесі вивчення дисципліни необхідно, щоб студенти знали:

- методи складання математичних моделей електричних машин;
- методи використання сучасних ЕОМ для реалізації різних математичних моделей електричних машин;
- методи розрахунку параметрів електричних машин.

В результаті вивчення дисципліни студенти повинні вміти:

- обирати найбільш доцільний метод математичного опису процесів перетворювання енергії при розрахунку різних режимів роботи;

- складати алгоритми та програми розрахунків різних режимів роботи електричних машин на ЕОМ;

- проводити розрахунки перехідних процесів і сталих режимів з використанням ЕОМ;

- знаходити аналітичні рішення систем рівнянь, які описують перехідні процеси в електричних машинах для ряду часткових випадків, проводити аналіз отриманих результатів.

Рекомендації до вивчення дисципліни

Перелік дисциплін, засвоєння яких студентами необхідне для вивчення даної дисципліни:

- вища математика;

- теоретичні основи електротехніки;

- електричні машини.

2 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОБІТ

Самостійні і практичні завдання призначені для поглибленого вивчення студентами моделювання електромеханічних перехідних процесів в електричних машинах. Завдання виконуються до розділів «Асинхронні машини», «Синхронні машини» та «Машини постійного струму» дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» за допомогою математичних програм SMath Studio, MathCAD, MATLAB, тощо.

2.1 Теоретичні відомості

Швидкодіючі електромагнітні або електромеханічні перехідні процеси, неминуче присутні в експлуатації машин, виникають при зміні напруг, прикладених до обмоток асинхронних, синхронних та машин постійного струму, або зміні моменту на валу. Швидкодіючі перехідні процеси виникають також і при аварійних режимах роботи машин.

Хоча довгота перехідних процесів і достатньо мала та супроводжуються вони великими кидками струмів й електромагнітного моменту. Це значно ускладнює експериментальні дослідження перехідних процесів, тому є доцільним використання методів математичного моделювання та комп'ютерних програм, таких як SMath Studio, MathCAD, MATLAB та ін. для прискорення й полегшення розрахунків та візуального спостереження за змінними величинами у графічних областях цих програм.

2.2 Загальні відомості

При виконанні роботи студент одержує індивідуальний варіант завдання – шестизначне число, яке є комбінацією цифр 1 чи 2. Початкові дані визначаються за таблицями відповідно варіанту. Це показано на прикладі таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Початкові дані за варіантом

Індекс варіанту		1	2	3	4	5	6
Параметр		X_m	X_{σ_s}	X_{σ_r}	R_s	R_r	ω_r
Варіант	1	2.5	0.12	0.16	0.07	0.05	0.92
	2	2.3	0.1	0.14	0.05	0.03	0.94

Вибір початкових даних за таблицею розглянемо на прикладі.

Приклад. Варіанту 122122 відповідають початкові дані:

$$X_m = 2.5, X_{\sigma_s} = 0.1, X_{\sigma_r} = 0.14, R_s = 0.07, R_r = 0.03, \omega_r = 0.94.$$

Практичне завдання повинне бути оформлене відповідно до ДСТУ–3008:2015 та вміщувати наступні складові:

- титульний лист;
- початкові дані;
- розрахункова частина;
- висновки;
- перелік посилань.

Приклад оформлення титульної сторінки контрольної роботи наведено у Додатку А.

Самостійне та практичні завдання виконуються на базі конспекту лекцій з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем», методичних вказівок та літератури (с. 32).

3 САМОСТІЙНА РОБОТА ДО РОЗДІЛУ «АСИНХРОННІ МАШИНИ»

3.1 Варіанти завдань

Початкові дані асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (АД) у відносних одиницях обираються з таблиці 3.1 за своїм варіантом, табл. 3.1.

Перші п'ять цифр шестизначного числа – параметри асинхронного двигуна: x_m – взаємоіндуктивний опір між обмотками статора та ротора; $x_{\delta_s}, x_{\delta_r}$ – індуктивні опори розсіювання статора та ротора; r_s, r_r – активні опори статора та ротора.

Шоста цифра визначає частоту обертання ротора ω_r в сталому режимі асинхронного двигуна.

Таблиця 3.1 – Початкові дані за варіантом

Індекс варіанту	1	2	3	4	5	6	
Параметр	x_m	x_{δ_s}	x_{δ_r}	r_s	r_r	ω_r	
Варіант	1	2.5	0.12	0.16	0.07	0.05	0.92
	2	2.3	0.1	0.14	0.05	0.03	0.94

Загальні початкові дані для всіх варіантів

Момент інерції $J = 20$ в.о.

На обмотку статора подано номінальну напругу.

Миттєві значення величин на початку перехідного процесу розрахувати при $t = 0.011$ с.

3.2 Зміст роботи

3.2.1 При роботі двигуна під напругою з частотою обертання за варіантом визначити усталені значення проєкцій струмів обмоток статора і ротора на осі координат α і β (система координат $\alpha\beta$ нерухома відносно статора) і електромагнітний момент двигуна задано в цьому режимі.

3.2.2 Для заданого моменту часу t (початку перехідного процесу) визначити миттєві значення електромагнітного моменту та струмів в обмотках статора та ротора в системі координат $\alpha\beta$, а також реальні миттєві значення струмів статора та ротора в фазах A, B, C .

3.2.3 В момент часу t , який прийнято за t_i відбулося збільшення навантаження в 1.2 рази. Почався перехідний процес. Числовими методами Ейлера й Рунге-Кутта 2, 3, 4-го порядку розрахувати струми статора та ротора в системі координат $\alpha\beta$ ($i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$) і частоту обертання ротора ω_r в момент часу $t_{i+\Delta t}$. Прийняти $\Delta t = 0.001$ с.

3.2.4 Для моменту часу $t_{i+\Delta t}$ визначити:

- електрорушійну силу (ЕРС) трансформації та ЕРС обертання, котрі виникають у $u_{s\alpha}, u_{s\beta}, u_{r\alpha}, u_{r\beta}$;
- потужність втрат;
- потужність, витрачену на створення поля;
- потужність, яку споживає двигун з мережі.

3.2.5 Задаючись значенням ω_r в діапазоні від 0 до 1 з кроком 0.1, визначити коефіцієнт затухання і кутові швидкості обертання векторів перехідних струмів. Побудувати графік залежності вказаних параметрів в функції ω_r . Визначити з графіка й аналітично критичну частоту обертання.

3.2.6 Проаналізувати отримані результати розрахунків та зробити висновки до кожного пункту виконаного контрольного завдання.

3.3 Методичні вказівки до виконання роботи

3.3.1 Вказівки до виконання пункту 3.2.1.

При виконанні цього пункту використовувати завдання. За початковими даними скласти систему рівнянь в матричній формі для сталого режиму в системі координат $\alpha\beta$

$${}_4\boxed{U}^1 = {}_4\boxed{Z}^4 {}_4\boxed{I}^1,$$

або

$$\begin{pmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s + jx_s & 0 & jx_m & 0 \\ 0 & r_s + jx_s & 0 & jx_m \\ jx_m & \omega_r \cdot x_m & r_r + jx_r & \omega_r \cdot x_m \\ -\omega_r \cdot x_m & jx_m & -\omega_r \cdot x_m & r_r + jx_r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

де x_s, x_r – індуктивні опори обмоток статора та ротора;

$$x_s = x_m + x_{\sigma s}; \quad x_r = x_m + x_{\sigma r}.$$

Для визначення струмів визначити зворотну матрицю ${}_4\boxed{Z}^{-1}$.
 Прийняти, що на обмотку статора подається номінальна напруга, тобто по осях $\alpha\beta$ $u_{s\alpha} = 1$; $u_{s\beta} = -j$. Для короткозамкненої обмотки ротора напруги ротора по осях α та β дорівнюють нулю - $u_{r\alpha} = 0$; $u_{r\beta} = 0$.

Розкласти систему рівнянь (3.1) на дві системи, кожна з яких складається з двох рівнянь

$$\left. \begin{aligned} {}_2\boxed{U}_s^1 &= {}_2\boxed{Z}_s^2 \cdot {}_2\boxed{I}_s^1 + {}_2\boxed{Z}_{sr}^2 \cdot {}_2\boxed{I}_r^1 \\ 0 &= {}_2\boxed{Z}_r^2 \cdot {}_2\boxed{I}_r^1 + {}_2\boxed{Z}_{rs}^2 \cdot {}_2\boxed{I}_s^1 \end{aligned} \right\}. \quad (3.2)$$

Рішення системи (5.2) дає

$$\left. \begin{aligned} {}_2\boxed{I}_s^1 &= {}_2\boxed{K}^{-1} \cdot {}_2\boxed{U}_s^1 \\ {}_2\boxed{I}_r^1 &= -{}_2\boxed{Z}_r^{-1} \cdot {}_2\boxed{Z}_{rs}^2 \cdot {}_2\boxed{I}_s^1 \end{aligned} \right\},$$

де

$${}_2\boxed{K}^2 = {}_2\boxed{Z}_s^2 - {}_2\boxed{Z}_{sr}^2 \cdot {}_2\boxed{Z}_r^{-1} \cdot {}_2\boxed{Z}_{rs}^2.$$

Таким чином, обернену матрицю 4-ого порядку ми замінили перетворенням двох матриць другого порядку, що значно простіше.

Задаючись струмами, визначити електромагнітний момент, який відповідає заданій частоті обертання

$$M_{EM} = x_m \operatorname{Re} \left(j \left(I_{s\beta} \cdot I_{r\alpha}^* - I_{s\alpha} \cdot I_{r\beta}^* \right) \right), \quad (3.3)$$

де $I_{r\alpha}^*, I_{r\beta}^*$ - сполучені вектори струмів ротора по осях α та β .

3.3.2 Вказівки до виконання пункту 3.2.2.

При виконанні цього завдання слід користуватися. Момент часу t (початок перехідного процесу) визначити у відносних одиницях

$$t = \frac{t}{\omega} = \frac{t}{2 \cdot \pi \cdot f},$$

де ω – базисна кутова синхронна швидкість обертання поля статора;
 f – частота мережі, $f = 50$ Гц.

Прийняти миттєві значення напруги статора

$$u_{s\alpha} = U_m \cdot \cos(\omega_s t)$$

$$u_{s\beta} = U_m \cdot \sin(\omega_s t),$$

де ω – синхронна частота обертання поля статора, $\omega = 1$ (в.о.).

Визначити миттєві значення струмів статора та ротора в системі координат $\alpha\beta$

$$i_{s\alpha} = I_{ms} \cdot \cos(\omega_s t + \varphi_s)$$

$$i_{s\beta} = I_{ms} \cdot \sin(\omega_s t + \varphi_s)$$

$$i_{r\alpha} = I_{mr} \cdot \cos(\omega_s t + \varphi_r)$$

$$i_{r\beta} = I_{mr} \cdot \sin(\omega_s t + \varphi_r)$$

де $I_{ms}, I_{mr}, \varphi_s, \varphi_r$ – амплітудні значення струмів статора й ротора та кути між напругами і струмами статора й ротора фази α ;

$$I_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{b}{a}.$$

Миттєве значення електромагнітного моменту визначити за формулою (3.3), підставивши замість діючих значень струмів їхні миттєві значення.

Реальні струми в обмотках статора й ротора визначити за умови, що трифазну машину перетворено на двофазну за допомогою матриці Парка.

В цьому випадку фазні струми статора дорівнюють

$$\begin{aligned}i_{sA} &= i_{s\alpha} = I_{ms} \cdot \cos(\omega_s t + \varphi_s) \\i_{sB} &= I_{ms} \cdot \cos(\omega_s t + \varphi_s + 120^\circ) . \\i_{sC} &= I_{ms} \cdot \cos(\omega_s t + \varphi_s - 120^\circ)\end{aligned}$$

Для визначення реальних струмів в фазах ротора перетворити струми в системі координат $\alpha\beta$ до струмів в системі координат dq (при цьому достатньо визначити i_{rd})

$$i_{rd} = i_{r\alpha} \cdot \cos(\theta) + i_{r\beta} \cdot \sin(\theta) ,$$

де – кут повороту ротора, $\theta = \omega_r \cdot t + \varphi_r$.

Далі, аналогічно, як і для обмоток статора $i_{rA} = i_{rd}$.

3.3.3 Вказівки до виконання пункту 3.2.3.

При виконанні цього пункту користуватися. Для рішення перехідних процесів числовими методами необхідно показати систему диференційних рівнянь в явному вигляді.

Зручніше використовувати математичну модель відносно похідних потокозчеплень (3.4)

$$\left. \begin{aligned}\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= \cos(t) - \alpha'_s \cdot \psi_{s\alpha} + \alpha'_s \cdot K_r \cdot \psi_{r\alpha} \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= \sin(t) - \alpha'_s \cdot \psi_{s\beta} + \alpha'_s \cdot K_r \cdot \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= -\alpha'_r \cdot \psi_{r\alpha} + \alpha'_r \cdot K_s \cdot \psi_{s\alpha} - \omega_r \cdot \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= -\alpha'_r \cdot \psi_{r\beta} + \alpha'_r \cdot K_s \cdot \psi_{s\beta} + \omega_r \cdot \psi_{r\alpha} \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{K_r}{J \cdot x'_s} \cdot (\psi_{s\beta} \cdot \psi_{r\alpha} - \psi_{s\alpha} \cdot \psi_{r\beta}) - \frac{1}{J} \cdot M_O\end{aligned}\right\} \quad (3.4)$$

і після рішення диференційних рівнянь відносно системи потокозчеплень визначити струми (3.5)

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= 1/x'_s \cdot (\psi_{s\alpha} - K_r \cdot \psi_{r\alpha}) \\ i_{s\beta} &= 1/x'_s \cdot (\psi_{s\beta} - K_r \cdot \psi_{r\beta}) \\ i_{r\alpha} &= 1/x'_r \cdot (\psi_{r\alpha} - K_s \cdot \psi_{s\alpha}) \\ i_{r\beta} &= 1/x'_r \cdot (\psi_{r\beta} - K_s \cdot \psi_{s\beta}) \end{aligned} \right\}. \quad (3.5)$$

Для розв'язання системи (5.4) необхідно розрахувати: перехідні опори x_s, x_r , коефіцієнти K_s, K_r зв'язку і коефіцієнти α'_s, α'_r затухання обмоток статора і ротора

$$\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_s \cdot x_r}; \quad x'_s = (x_m + x_{\sigma s}) \cdot \sigma; \quad x'_r = (x_m + x_{\sigma r}) \cdot \sigma;$$

$$K_s = \frac{x_m}{x_s}; \quad K_r = \frac{x_m}{x_r}; \quad \alpha_s = \frac{r_s}{x_s};$$

$$\alpha'_s = \frac{r_s}{x'_s}; \quad \alpha_r = \frac{r_r}{x_r}; \quad \alpha'_r = \frac{r_r}{x'_r}.$$

Момент опору M_O в п'ятому рівнянні системи (5.4) дорівнює усталеному електромагнітному моменту після збільшення навантаження

$$M_O = 1.2 \cdot (M_{EM})_i,$$

де $(M_{EM})_i$ – усталені значення електромагнітного моменту на початку перехідного процесу.

Систему рівнянь (3.4) вирішити:

– методом Ейлера

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot F(x_i, y_i),$$

– методом Рунге-Кутта 2-го порядку

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot F\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{K_1}{2}\right),$$

де $K_1 = h \cdot F(x_i, y_i)$;

– методом Рунге-Кутта 3-го порядку

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} \cdot (K_1 + 4 \cdot K_2 + K_3),$$

де $K_1 = h \cdot F(x_i, y_i)$,

$$K_2 = h \cdot F\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{K_1}{2}\right),$$

$$K_3 = h \cdot F(x_i + h, y_i + 2 \cdot K_1 - K_2),$$

– методом Рунге-Кутта 4-го порядку

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} \cdot (K_1 + 2 \cdot K_2 + 2 \cdot K_3 + K_4),$$

де $K_1 = h \cdot F(x_i, y_i)$,

$$K_2 = h \cdot F\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{K_1}{2}\right),$$

$$K_3 = h \cdot F\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{K_2}{2}\right),$$

$$K_4 = h \cdot F(x_i + h, y_i + K_3).$$

Всі результати розрахунків звести до таблиці 3.2 і порівняти.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків перехідного процесу числовими методами

		$i_{s\alpha}$	$i_{s\beta}$	$i_{r\alpha}$	$i_{r\beta}$	ω_r
t_i						
t_{i+1}	Ейлера					
	Рунге-Кутта	2-го порядку				
		3-го порядку				
		4-го порядку				

3.3.4 Вказівки до виконання пункту 3.2.4

При виконанні завдання слід користуватися конспектом. Початковими даними для розрахунків цього пункту є значення струмів і частоти обертання ротора в моменти часу t_i, t_{i+1} , які розраховано методом Рунге-Кутта 4-го порядку в пункті 3.2.3. Для розрахунків використати систему рівнянь рівноваги ЕРС в системі координат $\alpha\beta$

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= r_s \cdot i_{s\alpha} + e_{mp.s\alpha} \\ u_{s\beta} &= r_s \cdot i_{s\beta} + e_{mp.s\beta} \\ u_{r\alpha} &= r_r \cdot i_{r\alpha} + e_{mp.r\alpha} + e_{об.r\alpha} \\ u_{r\beta} &= r_r \cdot i_{r\beta} + e_{mp.r\beta} + e_{об.r\beta} \end{aligned} \right\}, \quad (3.6)$$

де $e_{mp.}$, $e_{об.}$ – електрорушійні сили трансформації та обертання статора та ротора в системі координат $\alpha\beta$.

Електрорушійна сила трансформації статора по осі α

$$e_{mp.s\alpha} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \left[x_s \cdot \left[(i_{s\alpha})_{i+1} - (i_{s\alpha})_i \right] + x_m \cdot \left[(i_{r\alpha})_{i+1} - (i_{r\alpha})_i \right] \right].$$

ЕРС трансформації $e_{mp.s\beta}$, $e_{mp.r\alpha}$, $e_{mp.r\beta}$ визначаються аналогічно $e_{mp.s\alpha}$.

ЕРС обертання ротора

$$\left. \begin{aligned} e_{об.r\alpha} &= (\omega_r)_{i+1} \cdot \left[x_r \cdot (i_{r\beta})_{i+1} + x_m \cdot (i_{s\beta})_{i+1} \right] \\ e_{об.r\beta} &= (\omega_r)_{i+1} \cdot \left[x_r \cdot (i_{r\alpha})_{i+1} + x_m \cdot (i_{s\alpha})_{i+1} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (3.7)$$

При визначенні потужностей врахувати, що з мережі двигун використовує активну та реактивну потужності. Активна потужність складається із:

- потужності втрат

$$P_B = {}_1 \boxed{i_t}^4 \cdot {}_4 \boxed{R}^4 \cdot {}_4 \boxed{i}^1;$$

- електромагнітної потужності

$$P_{EM} = \omega_r \cdot {}_1 \boxed{i_t}^4 \cdot {}_4 \boxed{K}^4 \cdot {}_4 \boxed{i}^1.$$

Реактивна потужність витрачається на створення поля в асинхронній машині

$$Q = j \cdot {}_1 \boxed{i_t}^4 \cdot {}_4 \boxed{L}^4 \cdot {}_4 \boxed{i}^1.$$

Пряму і транспоновану матриці струмів розрахувати для часу t_i . Матриця активного опору – діагональна

$${}^4\boxed{R}^4 = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}.$$

Матрицю ${}^4\boxed{K}^4$ скласти з елементів опорів, які створюють ЕРС обертання для асинхронної машини в системі координат $\alpha\beta$

$${}^4\boxed{K}^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & x_r \\ -x_m & 0 & -x_r & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрицю ${}^4\boxed{L}^4$ скласти з елементів матриць опорів, які створюють ЕРС трансформації

$${}^4\boxed{L}^4 = \begin{bmatrix} x_s & 0 & x_m & 0 \\ 0 & x_s & 0 & x_m \\ x_m & 0 & x_r & 0 \\ 0 & x_m & 0 & x_r \end{bmatrix}.$$

Вигляд матриці ${}^4\boxed{R}^4$ однаковий при складанні рівнянь у в.о. або з розмірними величинами. Матриці ${}^4\boxed{K}^4$ і ${}^4\boxed{L}^4$ представлені за умовою складання рівнянь у в.о.

3.3.5 Вказівки до виконання пункту 3.2.5.

При виконанні цього завдання слід користуватися. За припущенням про незмінність частоти обертання рівняння рівноваги ЕРС вирішити незалежно від рівняння руху.

При розв'язанні рівнянь асинхронного двигуна у векторній формі в системі координат $\alpha'\beta'$, яка обертається в просторі зі швидкістю поля відносно струму і потокозчеплення статора отримати наступні залежності

$$i_s = I_c + I_1 \cdot e^{\delta_1 t} \cdot e^{j\omega_1 t} + I_2 \cdot e^{\delta_2 t} \cdot e^{j\omega_2 t}, \quad (3.8)$$

$$\psi_s = \Psi_c + \Psi_1 \cdot e^{\delta_1 t} \cdot e^{j\omega_1 t} + \Psi_2 \cdot e^{\delta_2 t} \cdot e^{j\omega_2 t}, \quad (3.9)$$

де I_c, Ψ_c – амплітуди сталих значень струму і потокозчеплення статора, які розраховуються при значенні $S_{i+1} = 1 - \omega_{i+1}$;

$$I_c = \frac{\alpha_r + jS}{x'_s \cdot (\alpha'_s \cdot \alpha_r - S + j(\alpha'_s \cdot S + \alpha_r))}, \quad (3.10)$$

$$\Psi_c = \frac{\alpha'_r + jS}{\alpha'_s \cdot \alpha_r - S + j(\alpha'_s \cdot S + \alpha_r)}, \quad (3.11)$$

де I_1, I_2, Ψ_1, Ψ_2 – амплітуди вільних струмів та потокозчеплень статора, які розраховуються при значенні $S_{i+1} = 1 - \omega_{i+1}$;

$$I_1 = \frac{(\alpha_r + p_1 + jS)(1 + p_1 \cdot \psi_{s0}) - p_1(p_1 + J)(\psi_{s0} - x'_s \cdot I_{s0})}{x'_s \cdot p_1 \cdot (2 \cdot p_1 + \alpha'_s + \alpha'_r + j(1 + S))}, \quad (3.12)$$

$$\Psi_1 = \frac{(\alpha'_r + p_1 + jS)(1 + p_1 \cdot \psi_{s0}) + p_1 \cdot \alpha'_s (\psi_{s0} - x'_s \cdot I_{s0})}{p_1 \cdot (2 \cdot p_1 + \alpha'_s + \alpha'_r + j(1 + S))}, \quad (3.13)$$

$$I_2 = \frac{(\alpha_r + p_2 + jS)(1 + p_2 \cdot \psi_{s0}) - p_2(p_2 + J)(\psi_{s0} - x'_s \cdot I_{s0})}{x'_s \cdot p_2 \cdot (2 \cdot p_2 + \alpha'_s + \alpha'_r + j(1 + S))}, \quad (3.14)$$

$$\Psi_2 = \frac{(\alpha'_r + p_2 + jS)(1 + p_2 \cdot \psi_{s0}) + p_2 \cdot \alpha'_s (\psi_{s0} - x'_s \cdot I_{s0})}{p_2 \cdot (2 \cdot p_2 + \alpha'_s + \alpha'_r + j(1 + S))}, \quad (3.15)$$

де I_{s0}, ψ_{s0} – початкові умови – амплітуди початкових струму та потокозчеплення, які розраховуються за (3.10), (3.11) при $S_i = 1 - \omega_i$;

$p_1 = \delta_1 + j\omega_1$ та $p_2 = \delta_2 + j\omega_2$ – корені характеристичного рівняння, які розраховуються за (5.16) при ω_{i+1} .

Розрахувати корні характеристичного рівняння

$$p_{1,2} = -\frac{\alpha'_s + \alpha'_r}{2} - j\left(1 - \frac{\omega_r}{2}\right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\alpha'_s - \alpha'_r + j\omega_r)^2 + 4\alpha'_s \alpha'_r (1 - \sigma)}. \quad (3.16)$$

Дійсні частини коренів характеристичного рівняння (δ_1, δ_2) характеризують зміни амплітуд вільних струмів та

потокозчеплень у часі й називаються коефіцієнтами затухання цих струмів та потокозчеплень. Уявні частини коренів (ω_1, ω_2) показують частоту обертання векторів вільних струмів та потокозчеплень.

Електромагнітний момент в перехідному режимі подати у вигляді п'яти моментів:

$$M_{EM} = M_C + M_\Gamma + M_{\delta_1} + M_{\delta_2} + M_{\delta_1 + \delta_2}, \quad (3.17)$$

де M_C – сталий момент;

M_Γ – гальмівний момент;

$M_{\delta_1}, M_{\delta_2}, M_{\delta_1 + \delta_2}$ – знакозмінні моменти.

Моменти M_C та M_Γ нерухомі у просторі, при цьому гальмівний момент зі збігом часу зменшується із коефіцієнтами затухання та завжди негативний по відношенню до M_C (3.18).

$$\left. \begin{aligned} M_C &= \operatorname{Re} \left(j \left(\psi_c \cdot I_c^* \right) \right) \\ M_\Gamma &= \operatorname{Re} \left(j \left(\psi_1 \cdot I_1^* \cdot e^{2 \cdot \delta_1 \cdot t} + \psi_2 \cdot I_2^* \cdot e^{2 \cdot \delta_2 \cdot t} \right) \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Знакозмінні моменти, які зменшуються за амплітудами з коефіцієнтами затухання δ_1, δ_2 та $(\delta_1 + \delta_2)$.

$$\left. \begin{aligned} M_{\delta_1} &= \operatorname{Re} \left[j \left(\psi_c \cdot I_1^* e^{-j\omega_1 t} + I_c^* \cdot \psi_1 e^{j\omega_1 t} \right) e^{\delta_1 t} \right] \\ M_{\delta_2} &= \operatorname{Re} \left[j \left(\psi_c \cdot I_2^* e^{-j\omega_2 t} + I_c^* \cdot \psi_2 e^{j\omega_2 t} \right) e^{\delta_2 t} \right] \\ M_{(\delta_1 + \delta_2)} &= \operatorname{Re} \left[j \left(\psi_1 \cdot I_2^* e^{j(\omega_1 - \omega_2)t} + \psi_2 \cdot I_1^* e^{-j(\omega_1 - \omega_2)t} \right) e^{(\delta_1 + \delta_2)t} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Для 12 значень часу розрахувати струми та потокозчеплення, прийнявши при цьому:

$$\delta_{cp} = \left| \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right|.$$

Результати розрахунків надати до кожного моменту часу у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} I_s &= I_c + I_{c1} \cdot e^{j\phi_1} + I_{c2} \cdot e^{j\phi_2} \\ \psi_s &= \psi_c + \psi_{c1} \cdot e^{j\phi_1} + \psi_{c2} \cdot e^{j\phi_2}, \end{aligned}$$

де

$$I_{c1} = I_1 \cdot e^{\delta_1 t}; \quad I_{c2} = I_2 \cdot e^{\delta_2 t};$$

$$\psi_{c1} = \psi_1 \cdot e^{\delta_1 t}; \quad \psi_{c2} = \psi_2 \cdot e^{\delta_2 t}.$$

Показники ступенів $\delta_1 \cdot t$ та $\delta_2 \cdot t$ розраховувати в радіанах.

Кути $\varphi_1 = \omega_1 \cdot t$ і $\varphi_2 = \omega_2 \cdot t$ визначаються в градусах.

3.3.6 Вказівки до виконання пункту 3.2.6.

Задаючись значенням ω_r в діапазоні від 0 до 1 з кроком 0.1, визначити коефіцієнти затухання та кутові швидкості обертання векторів перехідних струмів за (3.16).

Ці залежності повинні мати вигляд, що надано на рисунку 3.1.

З графіка в точці екстремуму функції визначити $\omega_{кр}$.

Розрахувати аналітично $\omega_{кр}$ за формулою:

$$\omega_{кр} = \sqrt{(\alpha'_s - \alpha'_r)^2 + 4 \cdot \alpha'_r \cdot \alpha'_s \cdot (1 - \sigma)}$$

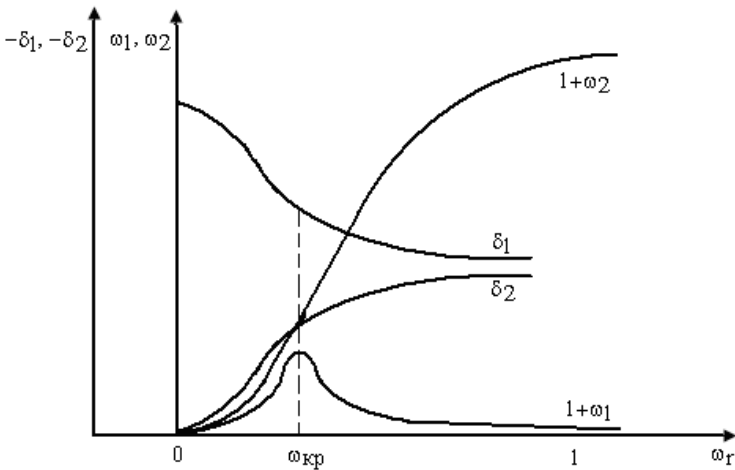


Рисунок 3.1 – Коефіцієнти затухання та кутові швидкості обертання векторів перехідних струмів

3.3.7 Вказівки до виконання пункту 3.2.7

За результатами розрахунків провести аналіз електромагнітного перехідного процесу.

4 ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ ДО РОЗДІЛУ «СИНХРОННІ МАШИНИ»

4.1 Варіанти завдань

Початкові дані у відносних одиницях обираються з таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Початкові дані синхронної машини

Індекс варіанту	1	2	3	4	5	6	
Параметр	x_d	x_q	$x_{\sigma s}$	$x_{\sigma зб}$	r_s	$r_{зб}$	
Варіант	1	1.2	0.8	0.12	0.3	0.03	0.01
	2	1.4	1.0	0.14	0.4	0.05	0.02

Кут θ , що визначає положення ротора в момент перехідного процесу, за всіма варіантами прийняти рівним нулю $\theta = 0$.

4.2 Зміст роботи

Класичним методом знайти аналітичне рішення рівнянь синхронної машини без демпферного контуру у режимі трифазного раптового короткого замикання, яке сталося з режиму неробочого ходу. Побудувати залежність струму фази А статора й струму обмотки збудження від часу t .

4.3 Методичні вказівки до виконання роботи

При аналітичному розв'язку трифазного короткого замикання прийняти припущення, що частота обертання ротора не змінюється ($\omega_2 = const$), тому математична модель у системі координат dq складається з рівнянь рівноваги напруги, в якій $u_{sd} = u_{sq} = 0$ і має вигляд

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{3\bar{b}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s + x_{sd} \cdot \frac{d}{dt} & -x_{sq} & x_d \cdot \frac{d}{dt} \\ x_{sd} & r_s + x_{sd} \cdot \frac{d}{dt} & x_d \\ x_d \cdot \frac{d}{dt} & 0 & r_{3\bar{b}} + x_{3\bar{b}} \cdot \frac{d}{dt} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{3\bar{b}} \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

де $x_{sd} = x_d + x_{\sigma s}$, $x_{sq} = x_q + x_{\sigma s}$, $x_{3\bar{b}} = x_d + x_{\sigma 3\bar{b}}$.

Початкові умови (струми статора по осях dq та струм збудження) для режиму короткого замикання, що сталося з режиму неробочого ходу:

$$i_{sd} = 0, \quad i_{sq} = 0, \quad i_{3\bar{b}} = u_{3\bar{b}} / r_{3\bar{b}},$$

де $u_{3\bar{b}}$ – напруга збудження синхронної машини, в.о.,

$$u_{3\bar{b}} = \frac{r_{3\bar{b}}}{x_{3\bar{b}}} \cdot e.$$

У режимі неробочого ходу прийняти $e = 1$ у відносних одиницях.

За класичним методом рішення надається у вигляді суми сталого струму й вільної складової струму

$$i_{sd} = (i_{sd})_c + (i_{sd})_e$$

$$i_{sq} = (i_{sq})_c + (i_{sq})_e.$$

$$i_{3\bar{b}} = (i_{3\bar{b}})_c + (i_{3\bar{b}})_e$$

У сталому режимі напруга збудження $u_{3\bar{b}}$ постійна, тому при переході до сталого режиму оператор $d/dt = 0$. Матриця сталих опорів має вигляд

$$Z_c = \begin{pmatrix} r_s & -x_{sq} & 0 \\ x_{sd} & r_s & x_d \\ 0 & 0 & r_{3\bar{b}} \end{pmatrix}.$$

Сталі струми є відношенням детермінантів матриць опорів

$$(I_c)_i = \frac{D_i}{D},$$

де D – детермінант матриці Z_c , $D = \det Z_c$,

D_i – детермінант матриці Z_i , утвореної з матриці Z_c заміною відповідного (i -того) стовпця на ліву частину рівняння (4.1)

$$D_i = \det Z_i.$$

Для визначення вільних складових струмів у матриці перехідних опорів (рівняння (4.1)) необхідно замінити d/dt на p й визначити детермінант одержаної матриці опору. Якщо прирівняти його нулю, одержимо характеристичне рівняння, що являє собою поліном третього ступеня:

$$p^3 + a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + a_3 = 0 \quad (4.2)$$

Рівняння (4.2) має аналітичне рішення.

Прийнявши нову змінну x , що зв'язана з p співвідношенням

$$p = x - a_1/3, \quad (4.3)$$

одержимо нове рівняння

$$x^3 - b_1 \cdot x + b_2 = 0, \quad (4.4)$$

де

$$b_1 = a_2 - \frac{a_1}{3}; \quad b_2 = a_3 - \frac{a_1 \cdot a_2}{3} + \frac{2a_1^3}{27}.$$

Розв'язок рівняння (4.4) залежить від значення коефіцієнтів b_1 та b_2 .

Для задачі, що розглядається, завжди буде мати місце наступне співвідношення

$$\frac{b_2}{4} + \frac{b_2^2}{27} > 0 \text{ та } b_1 > 0.$$

У цьому випадку рівняння (4.4) має один корінь дійсний та два – комплексно-спряжені

$$x_1 = -\frac{2}{\operatorname{tg}(2\phi)} \sqrt{\frac{b_1}{3}};$$

$$x_{2,3} = \frac{2}{\operatorname{tg}(2\phi)} \sqrt{\frac{b_1}{3}} \pm j \frac{1}{\sin(2\phi)} \sqrt{b_1},$$

$$\text{де } \phi = \arctg \left(\sqrt[3]{\text{tg} \left(\frac{\omega}{2} \right)} \right); \quad \omega = \arctg \left(\frac{2}{b_2} \cdot \sqrt{\frac{b_1^3}{27}} \right).$$

Після одержання x_1, x_2, x_3 з рівняння (4.2) визначимо p_1, p_2, p_3 .

При цьому корені p_2 і p_3 теж будуть комплексно-спряжені

$$p_{2,3} = \delta \pm j\omega_6.$$

Вільна складова струму для кожного контуру буде мати вигляд

$$(i_6)_i = (A_1)_i \cdot e^{p_1 t} + (A_2)_i \cdot e^{\delta t} \cdot \sin[\omega_6 \cdot t + (A_3)_i], \quad (4.5)$$

де i – індекси, $i = sd, sq, зб$.

Корені характеристичного рівняння однакові для всіх струмів, а постійні інтегрування A_1, A_2, A_3 мають різні значення для струмів статора по осях dq і струмів збудження й визначаються з початкових умов для вільних струмів в їх перших і других похідних. Початкові значення вільних струмів для всіх контурів визначаються з рівняння

$$(i_6)_{t=0} = (i)_{t=0} - (i_c)_{t=0}, \quad (4.6)$$

де $(i)_{t=0}$ – початкове значення струму обмотки,

i_c – початкове стале значення струму обмотки.

Для визначення перших похідних вільних струмів при $t = 0$ необхідно розглянути рівняння рівноваги ЕРС без лівої частини

$$\left. \begin{aligned} 0 &= r_s \cdot i_{sd} + x_{sd} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + x_d \cdot \frac{di_{зб}}{dt} - x_{sq} \cdot i_{sq} \\ 0 &= r_s \cdot i_{sq} + x_{sq} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + x_{sd} \cdot i_{sd} + x_d \cdot i_{зб} \\ 0 &= r_{зб} \cdot i_{зб} + x_{зб} \cdot \frac{di_{зб}}{dt} + x_d \cdot \frac{di_{sd}}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (4.7)$$

Рівняння (4.7) має вільні складові струмів, тому підставивши їх значення й розв'язавши систему відносно похідних струмів, одержимо перші похідні вільних складових струмів:

$$\left. \frac{d(i_{sd})_e}{dt} \right|_{t=0}, \quad \left. \frac{d(i_{sq})_e}{dt} \right|_{t=0}, \quad \left. \frac{d(i_{3\phi})_e}{dt} \right|_{t=0}.$$

Для визначених других похідних струмів (4.8) при $t=0$ необхідно диференціювати систему рівнянь (4.7)

$$\left. \begin{aligned} 0 &= r_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + x_{sd} \cdot \frac{d^2 i_{sd}}{dt^2} + x_d \cdot \frac{d^2 i_{3\phi}}{dt^2} - x_{sq} \cdot \frac{di_{sq}}{dt} \\ 0 &= r_s \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + x_{sq} \cdot \frac{d^2 i_{sq}}{dt^2} + x_{sd} \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + x_d \cdot \frac{di_{3\phi}}{dt} \\ 0 &= r_{3\phi} \cdot \frac{di_{3\phi}}{dt} + x_{3\phi} \cdot \frac{d^2 i_{3\phi}}{dt^2} + x_d \cdot \frac{d^2 i_{sd}}{dt^2} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

Підставивши в систему рівнянь (4.8) значення перших похідних вільних складових струмів при $t=0$, що визначені раніше, одержимо систему відносно других похідних струмів

$$\left. \frac{d^2(i_{sd})_e}{dt^2} \right|_{t=0}, \quad \left. \frac{d^2(i_{sq})_e}{dt^2} \right|_{t=0}, \quad \left. \frac{d^2(i_{3\phi})_e}{dt^2} \right|_{t=0}.$$

Визначимо першу й другу похідні струмів попередньо диференціювавши рівняння (4.5)

$$\begin{aligned} \frac{d(i_g)_i}{dt} &= p_1(A_1)_i e^{p_1 t} + [\delta \cdot (A_2)_i] e^{\delta t} \cdot \sin[\omega_g \cdot t + (A_3)_i] + \\ &+ \omega \cdot (A_2)_i e^{\delta t} \cdot \cos[\omega_g \cdot t + (A_3)_i] \end{aligned}, \quad (4.9)$$

$$\frac{d^2(i_{\epsilon})_i}{dt^2} = p_1^2 (A_1)_i e^{p_1 t} + (\delta^2 - \omega_{\epsilon}^2) \cdot (A_2)_i \cdot e^{\delta t} \cdot \sin[\omega_{\epsilon} \cdot t + (A_3)_i] + (4.10)$$

$$+ 2\delta \cdot \omega_{\epsilon} (A_2)_i \cdot e^{\delta t} \cdot \cos[\omega_{\epsilon} \cdot t + (A_3)_i]$$

Прийнявши у рівняннях (4.4), (4.5), (4.10) $t = 0$ й позначивши

$$(x_1)_i = (A_1)_i,$$

$$(x_2)_i = (A_2)_i \cdot \sin[(A_3)_i],$$

$$(x_3)_i = (A_2)_i \cdot \cos[(A_3)_i],$$

одержимо систему рівнянь у матричній формі (4.11).

Систему рівнянь (4.11) необхідно розв'язати для кожного контуру.

$$\begin{pmatrix} (i_{\epsilon})_i \\ \frac{d(i_{\epsilon})_i}{dt} \\ \frac{d^2(i_{\epsilon})_i}{dt^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ p_1 & \delta & \omega_{\epsilon} \\ p_1^2 & \delta^2 - \omega_{\epsilon}^2 & 2\delta \cdot \omega_{\epsilon} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} (x_1)_i \\ (x_2)_i \\ (x_3)_i \end{pmatrix}. \quad (4.11)$$

Визначивши постійні інтегрування, визначити струми в контурах $i_{sd}, i_{sq}, i_{3\bar{0}}$ у функції часу. Струм обмотки збудження є реальним струмом цієї обмотки.

Для визначення реального струму статора фази А необхідно перейти до системи координат $\alpha\beta$

$$i_A = i_{sd} \cos(\theta) - i_{sq} \sin(\theta),$$

де θ – кут повороту (вільоту) ротора, $\theta = \omega_1 \cdot t + \theta_i$.

Після одержання аналітичного виразу для струмів $i_{3\bar{0}}, i_A$ у функції часу t , необхідно зробити розрахунок зміни цих струмів у часі при раптовому короткому замиканні. Значення змінних розрахувати для часу t у інтервалі від 0 до $t = r_{3\bar{0}}/x_{3\bar{0}}$ з кроком $\Delta t = 0.001$ с та звести до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку струмів синхронного генератора при раптовому короткому замиканні

t	c	0	0.001	...	$r_{3\phi} / x_{3\phi}$
i_A	в.о.				
$i_{3\phi}$	в.о.				

За даними таблиці 4.2 побудувати графіки $i_A = f(t)$, $i_{3\phi} = f(t)$.
Дати аналіз цих графіків.

5 ПРАКТИЧНА РОБОТА ДО РОЗДІЛУ «МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»

5.1 Варіанти роботи

Початкові дані у відносних одиницях вибираються з таблиці 5.1.
Номінальна напруга двигуна 220 В.

Таблиця 5.1 – Початкові дані двигуна постійного струму

Індекс варіанту	1	2	3	4	5	6	
Параметр	$R_{я}$ (Ом)	$R_{3\phi}$ (Ом)	$L_{я}$ (Гн)	M (Гн)	J (Нм)	n_k (об/хв)	
Варіант	1	20	140	0,01	0,3	1,2	1300
	2	22	150	0,2	0,4	1,5	1350

5.2 Зміст роботи

Чотириполюсний двигун постійного струму з паралельним збудження працює під навантаження і має частоту обертання 1500 об/хв. При збільшенні навантаження в новому сталому режимі частота оберту стала n_k (з таблиці 5.1 згідно варіанту).

Визначити: початкову величину навантаження двигуна та збільшення навантаження; залежність зміни струму якоря і частоти обертання якоря від часу перехідного процесу, прийнявши, що в перехідному режимі $i_{3\phi} = const$.

5.3 Методичні вказівки до виконання роботи

Математична модель двигуна постійного струму в перехідному процесі має вигляд

$$\begin{vmatrix} U_{я} \\ U_{зб} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{я} + L_{я} \frac{d}{dt} & \omega_2 \cdot M \\ 0 & R_{я} + L_{я} \frac{d}{dt} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{я} \\ i_{зб} \end{vmatrix} \quad (5.1)$$

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{ем} - M_c, \quad (5.2)$$

де p – число полюсів,

$M_{ем}$ – момент електромагнітний,

M_c – момент опору.

Рішення задачі розіб'ємо на дві частини: сталий та перехідний процеси.

5.3.1 Рішення сталого режиму машини постійного струму

В сталому режимі в рівнянні (5.1) необхідно прийняти $d/dt = 0$, а в рівнянні (5.2) $d\omega_2/dt = 0$, тому $M_{ем} = M_c$.

Таким чином, визначивши електромагнітний момент при двох значення частоти обертання двигуна знайдемо величину навантаження за цими частотами обертання

$$M_{ем} = \begin{vmatrix} i_{я} & i_{зб} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & M \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{я} \\ i_{зб} \end{vmatrix}. \quad (5.3)$$

Для рішення (5.3) необхідно знайти струм обмоток якоря та навантаження, які визначаються з математичної моделі в сталому режимі

$$\begin{vmatrix} U_{я} \\ U_{зб} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{я} & \omega_2 \cdot M \\ 0 & R_{я} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{я} \\ i_{зб} \end{vmatrix}, \quad (5.4)$$

$$\text{де } \omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot p}{60}.$$

5.3.2 Рішення перехідного процесу

При допущенні що, $i_{3\phi} = const$, друге рівняння системи (5.1) можна не розглядати, тоді математична модель буде мати вигляд

$$\left. \begin{aligned} U_{я} &= R_{я} \cdot i_{я} + L_{я} \frac{d}{dt} i_{я} + \omega_2 \cdot M \cdot i_{3\phi} \\ \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_2}{dt} &= M_{ем} - M_c \end{aligned} \right\}. \quad (5.5)$$

В другому рівнянні $M_{ем}$ необхідно представити в загальному вигляді в залежності від струму якоря з рішення (5.3), а M_c буде дорівнювати електромагнітному моменту при збільшенні навантаження.

Метод редукції систем двох рівнянь (5.5) зводимо до одного рівняння другого порядку. Для цього диференціюємо перше рівняння системи (5.5)

$$\frac{dU_{я}}{dt} = R_{я} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + L_{я} \frac{d^2}{dt^2} i_{я} + M \cdot i_{3\phi} \frac{d\omega_2}{dt} \quad (5.6)$$

Похідну частоти обертання якоря беремо з другого рівняння системи (5.5)

Отримане рівняння другого порядку вирішується класичним методом, який описаний в завданні з синхронних машин. В результаті отримуємо залежності $i_{я} = f(t)$ та $\omega_2 = f(t)$. Задаючись кількома значеннями часу t , побудувати графік отриманих залежностей.

6 ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Самостійна робота виконується студентами в час запланований до самостійного вивчення та опрацювання матеріалу.

6.1 Теми до самостійного вивчення

Теми до самостійного вивчення у відповідності з робочою програмою, наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Елементи векторної та матричної алгебри	20
2	Параметри електричних машин	20
3	Перетворення реальної електричної машини до ідеальної двофазної	20
4	Диференційні рівняння ЕРС обмоток статора та ротора в єдиній системі координат	20
5	Рівняння руху електричних машини	20
6	Класифікація задач. Методи дослідження сталих та перехідних процесів в електричних машинах	20
7	Використання методу планування експерименту при вирішенні задач синтезу	20
8	Математичні моделі асинхронних машин	20
9	Математичні моделі синхронних машин	20
10	Математичні моделі машин постійного струму	20
	Разом	120

6.2 Задачі до самостійної проробки

6.1 Параметри СМ з демпферною обмоткою $x_d = 1,2$; $x_q = 0,8$; $x_{\sigma s} = 0,1$; $x_{\sigma v} = 0,4$; $x_{\sigma ld} = 0,3$; $x_{\sigma dq} = 0,2$; $R_s = 0,01$; $R_v = 0,02$; $R_{ld} = 0,05$; $R_{dq} = 0,03$. На обмотку збудження подана напруга $U_b = 0,01$. Ротор обертається з синхронною частотою. Обмотка статора короткозамкнена. Визначити усталені значення струму в колах.

6.2 Взаємоіндуктивність між фазами статора трифазної симетричної електричної машини $M = 0,6$ Гн. Індуктивність розсіювання обмотки статора $L_s = 0,01$ Гн. Визначити матрицю індуктивності і взаємоіндуктивності двофазної машини, якщо для перетворення струмів використовується матриця Парка, а для перетворення напруг – матриця Кларка.

6.3 Асинхронна машина має такі дані: $2p = 4$, $R_s = 0,03$ Ом, $R_p = 0,0172$ Ом, $L_m = 0,154$ Гн, $L_s = 0,1581$ Гн, $L_p = 0,158$ Гн, $S = 0,015$ в.о. Визначити матрицю опору машини в системі координат, яка обертається в просторі з кутовою швидкістю $\omega_k = 200$ 1/с.

6.4 Визначити миттєві значення напруг по осям α , β та нульової

послідовності при перетворенні трифазної АМ до еквівалентної двохфазної, якщо до трифазної машини підведені несиметричні діючі напруги: $U_a = 220$ В, $U_b = 240$ В, $U_c = 180$ В, і якщо для перетворення використовувалась матриця Парка.

6.5 4-х полюсний ДПС з паралельним збудженням та напругою 220 В має такі параметри: $R_{\Sigma} = 0,55$ Ом, $R_3 = 137,5$ Ом, $L_{\Sigma} = 0,002$ Гн, $M = 0,416$ Гн, $J = 1,5$ Нм. Визначити, наскільки збільшиться навантаження двигуна при зміні обертів із 1500 об/хв. до 1355 об/хв .

6.6 Сталий струм трифазного КЗ обмотки статора по осях dq дорівнює: $i_{sd} = 25 + j36$ А, $i_{sq} = 9 + j16$ А. Кут між ротором і віссю фази А $\Theta = 30^\circ$. Визначити сталий струм КЗ у фазі А.

6.7 Обмотка статора СМ з явно визначеними полюсами має наступні данні: $2p = 2$, $z = 12$, $w_k = 100$, довжину магнітопроводу $l_s = 150$ мм, внутрішній діаметр осердя статора $D_1 = 500$ мм, повітряний зазор по повздовжній осі $\delta'_d = 5$ мм, по поперечній осі $\delta'_q = 12$ мм. Визначити матрицю загальних індуктивностей двохфазної обмотки перетвореної з трифазної, якщо для перетворення струмів застосувалися матриця Парка, а для перетворення напруг застосувалися матриця Кларка, для моменту часу, який відповідає куту $\Theta = 45^\circ$.

6.8 На явнополюсній частині ЕМ відсутні обмотки. По обмотках статора течуть симетричні струми. Амплітуда струму статора 5 А, параметри: $x_d = 5$ Ом, $x_q = 4$ Ом. Визначити миттєве значення моменту при синхронній частоті оберту в момент часу $t = 0,0125$ с, якщо в цей момент кут між віссю обмотки фази «А» складає 30° .

6.9 АД має такі сталі значення струму й потокозчеплення: $I_s = 0,9e^{-j40}$ в.о., $\psi_s = 0,6e^{j230}$ в.о. Визначити стале значення електромагнітного моменту.

6.10 Обмотка статора СМ з явно визначеними полюсами має наступні данні: $2p = 2$, $z = 12$, $w_k = 100$, довжину магнітопроводу $l_s = 150$ мм, внутрішній діаметр осердя статора $D_1 = 500$ мм, повітряний зазор по повздовжній осі $\delta'_d = 5$ мм, по поперечній осі $\delta'_q = 12$ мм. Визначити матрицю загальних індуктивностей двохфазної обмотки перетвореної з трифазної при умові, якщо для перетворення струмів та напруг застосовувалася матриця Парка, для моменту часу, який відповідає куту $\Theta = 60^\circ$.

6.11 АМ має параметри (у в.о.): $R_s = 0,05$; $R_p = 0,03$; $\alpha_s' = 0,12$; $\alpha_p' = 0,23$; $\sigma = 0,2$. При частоті обертання ротора $\omega = 0,9$ почався перехідний електромагнітний процес. Початкові значення струмів (у в.о.): $i_{s\alpha} = 0,8$; $i_{s\beta} = -0,6$; $i_{p\alpha} = -0,7$; $i_{p\beta} = -0,5$. Визначити знакозмінний момент на початку перехідного процесу згасаючий із сталою часу δ_2 .

6.12 АМ має параметри (у в.о.): $R_s = 0,05$; $R_p = 0,03$; $\alpha_s' = 0,12$; $\alpha_p' = 0,23$; $\sigma = 0,2$. При частоті обертання ротора $\omega = 0,9$ почався перехідний електромагнітний процес. Початкові значення струмів у машині (у в.о.): $i_{s\alpha} = 0,8$; $i_{s\beta} = -0,6$; $i_{p\alpha} = -0,7$; $i_{p\beta} = -0,5$. Визначити знакозмінний момент на початку перехідного процесу згасаючий із сталою часу δ_1 .

6.13 АД має взаємодуктивність $X_m = 2,3$ в.о. і сталі струми статора і ротора $I_s = 0,9e^{j40}$ в.о., $I_p = 0,6e^{j230}$ в.о. Визначити електромагнітний момент, що розвивається двигуном.

6.14 Обмотка статора МЗС має різні активні опори в фазах $R_A = 90$ Ом, $R_B = 100$ Ом, $R_C = 120$ Ом. Застосувавши матрицю Парка для перетворення струмів та матрицю Кларка для перетворення напруг, визначити активні опори двофазної машини в фазах α та β .

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

Базова

1 Моделювання електромеханічних систем [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електричні машини і апарати» / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Шиманська, В. В. Котлярова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: X,XX Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 253 с.

2 Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навчальний посібник / О. І. Голочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл.

3 Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / за ред. М. С. Сегеди. – 2-ге вид. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 606 с.

4 Чорний О. П., Луговой А. В. и др. Моделювання електромеханічних систем Підручник / Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В. – Кременчук, 2001. – 410 с.

5 Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навчальний посібник / О. І. Голочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл.

6 Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / за ред. М. С. Сегеди. – 2-ге вид. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 606 с.

Допоміжна

7 Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання . Частина 1 / Укл.: Т. П. Солодовнікова, С.О. Лапкіна, І.Д. Галушко. – Запоріжжя : НУЗП, 2023– 32 с.

8 Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання . Частина 2 / Укл.: Т. П. Солодовнікова, С.О. Лапкіна, І.Д. Галушко. – Запоріжжя : НУЗП, 2023– 32 с.

9. Яримбаш, Д. Особливості тривимірного моделювання електромагнітних полів асинхронного двигуна / Д. С. Яримбаш, М. І. Коцур, С. Т. Коцур, І. М. Коцур // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2016. – № 2. - С. 43-50. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2016-2-5](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5).

10. Літвінов, Д. Схемно-польове моделювання теплових процесів в асинхронних двигунах / Д. О. Літвінов, О. О. Шлянін, Т. В. Бондарчук, О. В. Стремідловська, Ріхам Матар // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. –№ 1. - С. 71-78. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2017-1-9](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-9).

11. Яримбаш, Д. Особливості визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна для режиму короткого замикання / Д. С. Яримбаш, М. І. Коцур, С. Т. Коцур, І. М. Коцур // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 1. - С. 24-30. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2017-1-4](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-4).

12. Паталах, Д. Числовий безітераційний метод моделювання електромеханічних процесів в асинхронних двигунів / Д. Паталах, С. Тиховод, Т. Корнус // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – №2. - С. 50-55. – Режим доступу : DOI : [10.15588/1607-6761-2017-2-5](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-2-5).

Додаток А
Зразок оформлення титульної сторінки

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Кафедра «Електричні машини»

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ
з дисципліни
«Моделювання електромеханічних систем»
до розділу «Асинхронні машини»

Виконав
ст. гр. _____ Тарас ШЕВЧЕНКО

Перевірив,
старш. викл. _____ Тетяна СОЛОДОВНИКОВА