

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**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**

2023

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: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 33 с.

Укладачі: Т. П. Солодовнікова, старш. викл,  
С.О. Лапкіна, асист.,  
І. Д. Галушко, зав. лаб.

Рецензент Д. С. Яримбаш, проф., доктор 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

Загальні методичні вказівки . . . . .	4
<b>1 Лабораторна робота №1 «Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні при пуску».</b> . . . . .	7
1.1 Теоретичні відомості . . . . .	7
1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи . . . . .	11
1.3 Контрольні запитання для самоперевірки . . . . .	11
1.4 Програма роботи . . . . .	12
1.5 Порядок виконання лабораторної роботи . . . . .	12
1.6 Зміст звіту . . . . .	13
<b>2 Лабораторна робота №2 «Дослідження перехідних процесів у асинхронному двигуні при повторному вмиканні та реверсі»</b> . . . . .	14
2.1 Теоретичні відомості . . . . .	14
2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи . . . . .	18
2.3 Контрольні запитання для самоперевірки . . . . .	18
2.4 Програма роботи . . . . .	18
2.5 Порядок виконання лабораторної роботи . . . . .	19
2.6 Зміст звіту . . . . .	20
<b>3 Лабораторна робота №3 «Дослідження характеристик асинхронних машин методом планування експерименту».</b> . . . .	21
3.1 Теоретичні відомості . . . . .	21
3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи . . . . .	24
3.3 Контрольні запитання для самоперевірки . . . . .	24
3.4 Програма роботи . . . . .	25
3.5 Порядок виконання лабораторної роботи . . . . .	25
3.6 Зміст звіту . . . . .	27
<b>4 Лабораторна робота № 4 «Дослідження перехідного процесу при симетричному короткому замиканні обмотки статора асинхронного двигуна».</b> . . . . .	28
4.1 Теоретичні відомості . . . . .	28
4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи . . . . .	29
4.3 Контрольні запитання для самоперевірки . . . . .	29
4.4 Програма роботи . . . . .	29
4.5 Порядок виконання лабораторної роботи . . . . .	29
4.6 Зміст звіту . . . . .	30
Перелік джерел посилання. . . . .	31
Додаток А. Зразок оформлення титульної сторінки . . . . .	33

## ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

### Теоретичні відомості

При зміні напруги, прикладеної до обмотки статора асинхронного двигуна, або зміні моменту на валу ротора, виникають швидкодіючі електромагнітні або електромеханічні перехідні процеси неминуче присутні в експлуатації асинхронних машин. Вони виникають також і при аварійних режимах у асинхронних машинах.

Хоча довгота перехідних процесів і достатньо мала та супроводжуються вони великими кидками струмів й електромагнітного моменту. Це значно ускладнює експериментальні дослідження перехідних процесів у асинхронних машинах, тому є доцільним використання методів математичного моделювання.

### Математична модель асинхронного двигуна

Перехідні процеси в асинхронних машинах представляють собою сполучення електромагнітних перехідних процесів, які зумовлені комутаційними операціями, та механічно-перехідних процесів, що обумовлені швидкими змінами частоти обертання ротора.

Математична модель, що описує перехідні процеси, повинна складатися з рівнянь рівноваги електрорушійних сил (ЕРС) обмоток і рівняння руху ротора. Така математична модель – нелінійна. Розв'язуючи таку модель чисельними методами, необхідно її представити у неявному вигляді відносно похідних величин, що визначаються: струмів, потокозчеплень або струмів і потокозчеплень водночас якої-небудь частини машини (статора або ротора).

В лабораторних роботах використовується математична модель відносно потокозчеплень. Математичну модель складено в системі координат, яка обертається у просторі з довільною частотою  $\omega_k$ . Це дозволяє досліднику вибрати або нерухому систему координат, або систему, яка обертається у просторі з частотою ротора.

### Початкові дані

Початкові дані для виконання лабораторних робіт за темою «Асинхронний двигун» поділяються на: параметри двигуна, коефіцієнти, що визначають режим роботи двигуна, та початкові умови.

Умовні позначення наведено надалі.

**Параметри двигуна:**

- взаємоіндуктивний опір  $x_m$
- відношення взаємоіндуктивних опорів по осям  $\alpha$  й  $\beta$   $n$
- індуктивний опір розсіювання обмотки статора по осі  $\alpha$   $x_{\sigma s\alpha}$
- індуктивний опір розсіювання обмотки статора по осі  $\beta$   $x_{\sigma s\beta}$
- індуктивний опір розсіювання обмотки ротора  $x_{\sigma r}$
- активний опір обмотки статора по осі  $\alpha$   $R_{s\alpha}$
- активний опір обмотки статора по осі  $\beta$   $R_{s\beta}$
- активний опір обмотки ротора  $R_r$
- зовнішній опір  $z$
- момент інерції двигуна  $J$
- число пар полюсів  $p$

**Коефіцієнти, що визначають режим роботи двигуна:**

$$A_\alpha, A_\beta, B, C, D, E, F_1, F_2, F_3, \varphi_\alpha, \varphi_\beta, k_\alpha, k_\beta.$$

**Початкові умови:**

- початкове потокозчеплення статора по осі  $\alpha$   $\Psi_{s\alpha}$
- початкове потокозчеплення статора по осі  $\beta$   $\Psi_{s\beta}$
- початкове потокозчеплення ротора по осі  $\alpha$   $\Psi_{r\alpha}$
- початкове потокозчеплення ротора по осі  $\beta$   $\Psi_{r\beta}$
- початкова частота обертання ротора  $\omega_r$
- момент опору на валу двигуна  $M_o$
- частота обертання системи координат  $\omega_\kappa$

При виконанні лабораторних робіт студент одержує індивідуальний варіант завдання від викладача – шестизначне число – комбінація цифр 1 чи 2. Початкові дані визначаються за таблицею 1 відповідно варіанту.

**Таблиця – Початкові дані (число пар полюсів  $p = 2$ )**

Місце цифри за варіантом	1	2	3	4	5	6
Параметр	$x_m$	$x_{\sigma s}$	$x_{\sigma r}$	$R_s$	$R_r$	$J$
Цифра 1	2.5	0.12	0.16	0.07	0.05	40
Цифра 2	2.3	0.1	0.14	0.05	0.03	35

**Приклад.** Варіанту 122122 відповідають початкові дані:

$$x_m = 2.5, x_{\sigma_s} = 0.1, x_{\sigma_r} = 0.14, R_s = 0.07, R_r = 0.03, J = 35.$$

В кожній лабораторній роботі будуть зроблені конкретні вказівки що до вибору початкових даних в залежності від типу перехідного процесу або конструктивних особливостей асинхронної машини.

Початкові дані з таблиці 1 є незмінними для всіх робіт за темою «Асинхронний двигун».

# 1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ ПРИ ПУСКУ

**Мета роботи:** моделювання і дослідження рівнянь процесу пуску трифазного асинхронного двигуна зі змінними потокозчепленнями.

## 1.1 Теоретичні відомості

**Математична модель (1.1)** – рівняння рівноваги електрорушійних сил обмоток і рівняння руху ротора – нелінійна.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\phi_{s\alpha}}{dt} &= \frac{A\alpha}{n} \cos(\varphi_\alpha + (\omega_l - \omega_k) \cdot t) - \alpha_{s\alpha} \cdot \psi_{s\alpha} + \alpha_{s\alpha} \cdot k_r \cdot \psi_{r\alpha} + \omega_k \cdot \psi_{s\beta} \\
 \frac{d\phi_{s\beta}}{dt} &= B \sin(\varphi_\beta + (\omega_l - \omega_k) \cdot t) - C \cdot \alpha_{s\beta} \cdot \psi_{s\beta} + C \cdot \alpha_{s\beta} \cdot k_r \cdot \psi_{r\beta} - \omega_k \cdot \psi_{s\alpha} \\
 \frac{d\phi_{r\alpha}}{dt} &= -\alpha_{r\alpha} \cdot \psi_{r\alpha} + n^2 \cdot \alpha_{r\alpha} \cdot k_{s\alpha} \cdot \psi_{s\alpha} - (\omega_r - \omega_k) \cdot \psi_{r\beta} \\
 \frac{d\phi_{r\beta}}{dt} &= D \cdot (-E \cdot \alpha_{r\beta} \cdot \psi_{r\beta} + E \cdot \alpha_{r\beta} \cdot k_{s\beta} \cdot \psi_{s\beta} + (\omega_r - \omega_k) \cdot \psi_{r\alpha}) \\
 \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{p}{J} \cdot \left[ F_1 x_m \left( \frac{1}{x'_{s\beta} \cdot x'_{r\alpha}} - \frac{k_r \cdot k_{s\beta}}{x'_{s\alpha} \cdot x'_{r\beta}} \right) \psi_{s\beta} \psi_{r\alpha} + \left( \frac{n^2 k_r \cdot k_{s\alpha}}{x'_{s\beta} \cdot x'_{r\alpha}} - \frac{n}{x'_{s\alpha} \cdot x'_{r\beta}} \right) \psi_{s\alpha} \psi_{r\beta} - \right. \\
 &\quad \left. - \left( \frac{n^2 \cdot k_{s\alpha}}{x'_{s\beta} \cdot x'_{r\alpha}} - \frac{n \cdot k_{s\beta}}{x'_{s\alpha} \cdot x'_{r\beta}} \right) \psi_{s\alpha} \psi_{s\beta} - \left( \frac{k_r}{x'_{s\beta} \cdot x'_{r\alpha}} - \frac{n \cdot k_r}{x'_{s\alpha} \cdot x'_{r\beta}} \right) \psi_{s\alpha} \psi_{s\beta} + \right. \\
 &\quad \left. + F_2 \left( \frac{x_m \cdot \sigma_\beta}{x'_{s\beta} \cdot x'_{r\alpha}} - \frac{k \cdot k_{s\beta}}{x'_{s\alpha} \cdot x'_{r\beta}} \right) \psi_{s\alpha} \psi_{s\beta} \right] \quad (1.1)
 \end{aligned} \right\}$$

Розв'язок математичної моделі асинхронного двигуна відносно поточкозчеплень методом Рунге-Кутта 4-го порядку дає можливість визначити струми:

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= \frac{1}{x'_{s\alpha}} \cdot (\psi_{s\alpha} - n \cdot k_r \cdot \psi_{r\alpha}) \\ i_{s\beta} &= \frac{C}{x'_{s\beta}} \cdot (\psi_{s\beta} - k_r \cdot \psi_{r\beta}) \\ i_{r\alpha} &= \frac{1}{x'_{r\alpha}} \cdot (\psi_{r\alpha} - n \cdot k_{s\alpha} \cdot \psi_{s\alpha}) \\ i_{r\beta} &= \frac{E}{x'_{r\beta}} \cdot (\psi_{r\beta} - k_{s\beta} \cdot \psi_{s\beta}) \\ i_{s\phi A} &= i_{s\alpha} \cdot \cos \omega_k t - i_{s\beta} \cdot \sin \omega_k t \\ i_{r\phi A} &= i_{r\alpha} \cdot \cos (\omega_r - \omega_k) \cdot t - i_{r\beta} \cdot \sin (\omega_r - \omega_k) \cdot t \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Початкові поточкозчеплення розраховують, спираючись на миттєві значення струмів, за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{s\alpha n} &= (n^2 \cdot x_m + x_{\sigma s\alpha}) \cdot n^{-1} \cdot i_{s\alpha n} + x_m \cdot i_{r\alpha n} \\ \psi_{s\beta n} &= (x_m + x_{\sigma s\beta}) \cdot i_{s\beta n} + x_m \cdot i_{r\beta n} \\ \psi_{r\alpha n} &= (x_m + x_{\sigma r}) \cdot i_{r\alpha n} + n \cdot x_m \cdot i_{s\alpha n} \\ \psi_{r\beta n} &= (x_m + x_{\sigma r}) \cdot i_{r\beta n} + x_m \cdot i_{s\beta n} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

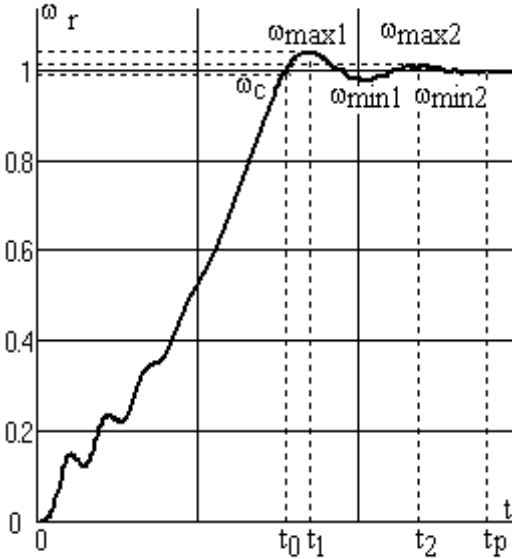
**Пуск асинхронного двигуна.** В процесі пуску на обмотку статора асинхронного двигуна подається симетрична напруга. Частота обертання ротора змінюється від нуля до сталого значення (рис. 1.1). Час закінчення процесу пуску (час розбігу двигуна -  $t_p$ ) визначають по досягненню ротором сталої частоти обертання, яка коливається навколо номінального значення через наявність інерційності.

Стала частота обертання ротора

$$\omega_c = \frac{\omega_{\max 2} + \omega_{\min 2}}{2} \quad (1.4)$$

Параметри  $\alpha$  та  $A$  експоненціального закону затухання коливань ротора

$$\omega_r = A \cdot e^{\alpha dt},$$



$\omega_{\max 1}, \omega_{\max 2}, \omega_{\min 1}, \omega_{\min 2}, \omega_c$  –  
максимальні, мінімальні та сталі значення частот  
обертання ротора;  $t_1, t_2$  – час досягнення  
максимальних частот обертання;  
 $t_0$  – перший час досягнення сталої частоти;  
 $t_p$  – час розбігу двигуна

**Рисунок 1.1 – Графік частоти обертання ротора при пуску**

**Методика аналітичного розрахунку миттєвих значень складових струму.** Для кожного значення частоти обертання ротора  $\omega_r$

визначають ковзання у в.о.

$$S = \frac{1 - \omega_r}{S_n}, \quad (1.9)$$

де  $S_n$  – номінальне ковзання, яке відповідає сталій частоті обертання ротора,  $S_n = (1 - \omega_c) / 1 = 1 - \omega_c$ .

Розраховують сталі значення струмів статора й ротора у комплексній формі

де

$$\alpha = \frac{\ln \omega_{\max 1} - \ln \omega_{\max 2}}{t_1 - t_2},$$

$$A = \frac{\omega_{\max 1}}{e^{\alpha(t_1 - t_0)}}. \quad (1.5)$$

Час розбігу двигуна, с

$$t_p = t_0 + \frac{\ln \cdot \omega_c - \ln A}{\alpha}. \quad (1.6)$$

Струм статора фази А ( $i_{s\phi A} = i_{s\alpha}$ ) у процесі пуску змінює свою амплітуду та частоту і спадає по експоненті:

$$i_s = i_{sc} + i_{s\phi 1} + i_{s\phi 2}, \quad (1.7)$$

де  $i_{sc}, i_{s\phi 1}, i_{s\phi 2}$  – стала та вільні складові струму.

Миттєві значення складових струму

$$i_{sc} = I_{smc} \cdot \cos \alpha_c,$$

$$i_{s\phi 1} = I_{sm\phi 1} \cdot \cos \alpha_{\phi 1}, \quad (1.8)$$

$$i_{s\phi 2} = I_{sm\phi 2} \cdot \cos \alpha_{\phi 2}.$$

визначають за  
нижченаведеною  
методикою (1.9) – (1.19).

$$i_{sc} = \frac{\alpha_r + jS}{x'_s \cdot D}, \quad i_{rc} = -\frac{jk_r \cdot S}{x'_r \cdot D}, \quad (1.10)$$

де  $x_s, x_r$  – реактивні опори обмоток статора та ротора;

$x'_s, x'_r$  – перехідні опори обмоток статора та ротора;

$\sigma$  – коефіцієнт розсіювання;

$\alpha_s, \alpha'_s, \alpha_r, \alpha'_r$  – постійні часу затухання струмів статора та ротора;

$D$  – детермінант матриці  $Z$  [1, розд. 2];

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

$$\sigma = 1 - \frac{x_m^2}{x_s \cdot x_r}; \quad \alpha_s = \frac{R_s}{x_s}; \quad \alpha'_s = \frac{R_s}{x'_s}; \quad \alpha_r = \frac{R_r}{x_r}; \quad \alpha'_r = \frac{R_r}{x'_r}; \quad k_s = \frac{x_m}{x_s}; \quad k_r = \frac{x_m}{x_r};$$

$$D = \alpha'_s \alpha_r - S + j(\alpha'_s S + \alpha_r) \quad (1.11)$$

Розраховують корені характеристичного рівняння

$$p_{1,2} = -\frac{\alpha'_s + \alpha'_r}{2} + j \frac{\omega_r \mp 1}{2} \sqrt{[\alpha'_s - \alpha'_r + j \omega_r]^2 + 4 \alpha'_s \alpha'_r (1 - \sigma)} \quad (1.12)$$

та приводять до загального вигляду

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \delta_1 + j\omega_1 \\ p_2 &= \delta_2 + j\omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Приводять до загального та експоненціального виглядів сталі струми статора і ротора:

$$\left. \begin{aligned} i_{sc} &= a_{sc} + j b_{sc} = I_{scm} \cdot e^{j\varphi_{sc}} \\ i_{rc} &= a_{rc} + j b_{rc} = I_{rcm} \cdot e^{j\varphi_{rc}} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

де  $I_{scm}, I_{rcm}, \varphi_{sc}, \varphi_{rc}$  – амплітудні значення та аргументи (кути) зміни сталих струмів статора та ротора;

$$\begin{aligned} I_{scm} &= \sqrt{a_{sc}^2 + b_{sc}^2}, & I_{rcm} &= \sqrt{a_{rc}^2 + b_{rc}^2}, \\ \varphi_{sc} &= \arctg \frac{b_{sc}}{a_{sc}}, & \varphi_{rc} &= \arctg \frac{b_{rc}}{a_{rc}}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Розраховують початкові значення вільних струмів обмоток статора та ротора

$$\left. \begin{aligned} i_{sen} &= (i_{s\alpha} - a_{sc}) + j(i_{s\beta} - b_{sc}) \\ i_{ren} &= (i_{r\alpha} - a_{rc}) + j(i_{r\beta} - b_{rc}) \end{aligned} \right\}, \quad (1.16)$$

де  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  – миттєві значення струмів статора та ротора по осям  $\alpha, \beta$  з таблиці розрахунку на ЕОМ.

Розраховують вільні складові струму обмотки статора у векторній формі

$$\left. \begin{aligned} i_{se1} &= \frac{1}{p_2 - p_1} \cdot \left[ (p_2 + \alpha'_s) \cdot i_{sen} - k_s \cdot \alpha'_r \cdot i_{ren} \right] \\ i_{se2} &= \frac{-1}{p_2 - p_1} \cdot \left[ (p_1 + \alpha'_s) \cdot i_{sen} - k_s \cdot \alpha'_r \cdot i_{ren} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (1.17)$$

Приводять до загального та експоненціального виглядів за (1.15)

$$\left. \begin{aligned} i_{se1} &= a_{se1} + j b_{se1} = I_{sm\epsilon 1} \cdot e^{j \cdot \phi_{\epsilon 1}} \\ i_{se2} &= a_{se2} + j b_{se2} = I_{sm\epsilon 2} \cdot e^{j \cdot \phi_{\epsilon 2}} \end{aligned} \right\}. \quad (1.18)$$

Розраховують кути  $\alpha_c, \alpha_{\epsilon 1}, \alpha_{\epsilon 2}$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_c &= \omega t + \varphi_{sc} \\ \alpha_{\epsilon 1} &= \omega \omega_1 t + \varphi_{\epsilon 1} \\ \alpha_{\epsilon 2} &= \omega \omega_2 t + \varphi_{\epsilon 2} \end{aligned} \right\}, \quad (1.19)$$

де  $\omega = 2\pi f$ ; частота  $f = 50$  Гц.

## 1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою: «Пуск асинхронного двигуна». Ознайомитись з матеріалом п. 1.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

### 1.3 Контрольні запитання для самоперевірки

**1.3.1** В якій системі координат доцільно розглядати процес пуску асинхронної машини?

**1.3.2** Охарактеризувати електромагнітний й електромеханічний перехідні процеси асинхронної машини.

1.3.3 Як за кривою  $i_s = f(t)$  визначити струм холостого ходу?

1.3.4 Чому дорівнює взаємоіндуктивність між обмотками на ортогональних осях у магнітосиметричній електричній машині?

1.3.5 Яка математична модель є загальноприйнятною при розв'язанні диференційних рівнянь асинхронних машин чисельними методами й чому?

1.3.6 Чим відрізняється ідеалізована машина від реальної?

1.3.7 Які припущення, що спрощують математичну модель, можливо прийняти при складанні диференційних рівнянь електричних машин?

1.3.8 Коли ЕРС обертання з'являється в рівняннях статора, а коли в рівняннях ротора? Чи може з'явитися ЕРС обертання в рівняннях обох частин машини?

## 1.4 Програма роботи

1.4.1 Скласти початкові дані.

1.4.2 Чисельними методами розрахувати процес пуску на ЕОМ.

1.4.3 Провести аналітичний розрахунок миттєвих значень складових фазного струму статора.

## 1.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1.5.1 Початкові дані процесу пуску асинхронного трифазного двигуна підготувати за варіантом.

**Параметри двигуна.** Індуктивні та активні опори в симетричній машині розподілені по осям та рівні між собою:

$$x_{s\alpha} = x_{s\beta} = x_{\sigma s}, \quad R_{s\alpha} = R_{s\beta} = R_s, \quad \Rightarrow \quad n=1.$$

Зовнішній опір  $z = 0$ .

**Коефіцієнти рівнянь** процесу пуску

$$A_\alpha = A_\beta = B = C = D = E = F_1 = 1,$$

$$F_2 = F_3 = \varphi_\alpha = \varphi_\beta = 0, \quad k_\alpha = k_\beta = -1.$$

**Початкові умови.** Початкові потокозчеплення й частота оберту ротора при пуску дорівнюють нулю. Початковий момент опору  $M_o$  прийняти за завданням викладача. Рівняння розв'язувати в системі координат статора (система  $\alpha\beta$ ), тобто  $\omega_k = 0$ .

**1.5.2** Змодельовати пуск двигуна на ЕОМ. Одержати результати зміни струмів, моменту і частоти оберту ротора в функції часу.

Визначити сталу частоту обертання ротора за (1.4).

Визначити параметри  $\alpha$  та  $A$  експоненціального закону затухання коливань ротора за (1.5) та час розбігу двигуна за (1.6) де за час  $t_0$  прийняти час першого досягнення ротором значення сталої частоти обертання  $\omega_c$ .

**1.5.3** Провести аналітичний розрахунок миттєвих значень складових струму статора за методикою (1.9) – (1.19) користуючись даними ЕОМ для значень часу в інтервалі від нуля до 1 (рис.1.1).

Побудувати графіки залежностей складових коренів характеристичного рівняння (тобто коефіцієнтів затухання та кутових швидкостей обертання в просторі векторів, які виникають при включенні асинхронного двигуна до мережі) від частоти обертання ротора асинхронного двигуна –  $\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2 = f(\omega_r)$ .

Побудувати графіки залежностей струмів статора та ротора по вісі  $\alpha$  –  $i_{s\alpha}, i_{r\alpha} = f(t)$ , струму статора та його складових в функції часу –  $i_{sc}, i_{s61}, i_{s62} = f(t)$  та проаналізувати форму одержаних кривих.

Побудувати графіки залежностей електромагнітного моменту та частоти обертання ротора в функції часу –  $M_{em}, \omega_r = f(t)$ .

## 1.6 Зміст звіту

**1.6.1** Початкові дані, які необхідно підготувати до вводу в ЕОМ.

**1.6.2** Аналітичний розрахунок миттєвих значень сталої та вільних складових фазного струму статора.

**1.6.3** Графіки залежностей  $\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2 = f(\omega_r)$ ,  $i_s, i_{sc}, i_{s61}, i_{s62} = f(t)$ ,  $M_{em}, \omega_r = f(t)$ .

**1.6.4** Висновки.

## 2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ ПРИ ПОВТОРНОМУ ВМИКАННІ ТА РЕВЕРСІ

**Мета роботи:** дослідження зміни струмів й моментів у асинхронному двигуні при повторному вмиканні та реверсі

### 2.1 Теоретичні відомості

Розглянемо процеси повторного вмикання та реверсу асинхронного двигуна. Обидва перехідні процеси практично складаються з двох процесів: гальмування (або процес відключення двигуна) та вмикання або реверс. Математична модель процесу пуску є основою для цих режимів роботи. Розглянемо детальніше, порівнюючи з процесом пуску та враховуючи відмінність у напругах статора, кожен режим.

Пуск	$U_{s\alpha} = \cos(\omega t)$	$U_{s\beta} = \sin(\omega t)$
Повторне вмикання	$U_{s\alpha} = \cos(\omega t + \varphi_\alpha)$	$U_{s\beta} = \sin(\omega t + \varphi_\beta)$
Реверс	$U_{s\alpha} = \cos(\omega t)$	$U_{s\beta} = -\sin(\omega t)$

**Процес повторного вмикання.** Прикладена до обмотки асинхронного двигуна напруга симетрична, тому

$$\varphi_\alpha = \varphi_\beta = \omega(t_p + \Delta t_1 + \Delta t_2),$$

де  $t_p$  – час розбігу двигуна (рис. 1.1);

$\Delta t_1$  – проміжок часу після розбігу двигуна, через який відбувається відключення живлення;

$\Delta t_2$  – проміжок часу, через який відбувається повторне вмикання.

Будемо вважати, що двигун працює в сталому режимі з моментом опору  $M_o$  і має сталу частоту оберту  $\omega_c$ . Через проміжок часу  $\Delta t_1$  після розбігу двигуна відбувається відключення живлення на проміжок часу рівний  $\Delta t_2$ . Струм обмотки статора практично миттєво стає рівним нулю.

**Повторне вмикання із залишковим полем.** Якщо прийняти час  $\Delta t_2$  невеликим, струм обмотки ротора (вона замкнута), підтриманий залишковим полем, буде мати місце.

До моменту відключення значення струмів у векторній формі дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} i_{sc} &= I_{scm} \cdot e^{j\varphi_{sc}} \cdot e^{j\omega(t_p + \Delta t_1)} \\ i_{rc} &= I_{rcm} \cdot e^{j\varphi_{rc}} \cdot e^{j\omega(t_p + \Delta t_1)} \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

де  $I_{scm}, I_{rcm}, \varphi_{sc}, \varphi_{rc}$  визначаються за формулами (1.10–1.15) при номінальному ковзанні  $S_n = 1$  в.о.

Ці струми статора й ротора є початковими струмами до відключення, тобто  $i_{sn-}, i_{rn-}$ . З умови рівності потокозчеплень ротора до відключення при часі  $t_{n-}$  та після відключення –  $t_{n+}$  визначимо початковий струм ротора в момент відключення

$$i_{rn+} = i_{rn-} + k_r \cdot i_{sn-}$$

тобто

$$i_{rcn+} = (i_{rcn-} \cdot e^{j\varphi_{rc}} + k_r \cdot i_{scn-} \cdot e^{j\varphi_{rc}}) \cdot e^{j\omega(t_p + \Delta t_1)}. \quad (2.2)$$

Проекції цього струму по осях  $\alpha$  та  $\beta$ :

$$\left. \begin{aligned} i_{ran} &= \operatorname{Re}(i_{rcn+}) \\ i_{r\beta n} &= \operatorname{Im}(i_{rcn+}) \end{aligned} \right\}. \quad (2.3)$$

Через час  $\Delta t_2$  відбувається повторне вмикання, до цього моменту часу струми в роторі зміняться й будуть рівні

$$\left. \begin{aligned} (i_{r\alpha})_{\Delta t_2} &= (i_{ran} \cdot \cos(\omega \cdot \omega_c \cdot \Delta t_2) - i_{r\beta n} \cdot \sin(\omega \cdot \omega_c \cdot \Delta t_2)) \cdot e^{-\alpha_r \cdot \Delta t_2} \\ (i_{r\beta})_{\Delta t_2} &= (i_{ran} \cdot \sin(\omega \cdot \omega_c \cdot \Delta t_2) + i_{r\beta n} \cdot \cos(\omega \cdot \omega_c \cdot \Delta t_2)) \cdot e^{-\alpha_r \cdot \Delta t_2} \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

потокозчеплення обмоток статора й ротора зміняться й будуть рівні

$$\left. \begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= x_m \cdot (i_{r\alpha})_{\Delta t_2} \\ \psi_{s\beta} &= x_m \cdot (i_{r\beta})_{\Delta t_2} \\ \psi_{r\alpha} &= (x_m + x_{\sigma r}) \cdot (i_{r\alpha})_{\Delta t_2} \\ \psi_{r\beta} &= (x_m + x_{\sigma r}) \cdot (i_{r\beta})_{\Delta t_2} \end{aligned} \right\}. \quad (2.5)$$

Ці потокозчеплення і є початковими для процесу повторного вмикання. Будемо вважати, що частота оберту ротора за цей час не змінилася і дорівнює  $\omega_c$ .

**Повторне вмикання без залишкового поля.** Якщо прийняти час  $\Delta t_2$  достатньо великим (струми ротора повністю затухають), це буде відповідати режиму повторного вмикання без залишкового поля. Тоді потокозчеплення всіх обмоток будуть дорівнювати нулю. Частота обертання ротора рівна  $\omega_c$ .

**Методика розрахунку електромагнітного моменту.** Розрахунок коренів характеристичного рівняння (1.12) проводять підставляючи значення сталої частоти обертання ротора (у лабораторних роботах  $\omega_c = 0.98$  в.о.).

Амплітуди сталих струмів статора та ротора визначають за рівнянням (2.1), прийнявши  $t_p + \Delta t_1 = 0$ , тобто

$$\left. \begin{aligned} i_{sc} &= I_{scm} \cdot e^{j\phi_{sc}} \\ i_{rc} &= I_{rcm} \cdot e^{j\phi_{rc}} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Після чого визначають вільні складові струмів статора та ротора

$$\left. \begin{aligned} i_{s1} &= \frac{-1}{p_2 - p_1} \cdot \left[ (p_1 + \alpha'_s) I_{scm} \cdot e^{j\phi_{sc}} - k_s \cdot \alpha'_r \cdot I_{rcm} \cdot e^{j\phi_{rc}} \right] \\ i_{s2} &= \frac{1}{p_2 - p_1} \cdot \left[ (p_1 + \alpha'_s) I_{scm} \cdot e^{j\phi_{sc}} - k_s \cdot \alpha'_r \cdot I_{rcm} \cdot e^{j\phi_{rc}} \right] \\ i_{r1} &= \frac{-1}{p_2 - p_1} \cdot \left[ (p_2 + \alpha'_r) I_{rcm} \cdot e^{j\phi_{rc}} - k_r \cdot \alpha'_s \cdot I_{scm} \cdot e^{j\phi_{sc}} \right] \\ i_{r2} &= \frac{1}{p_2 - p_1} \cdot \left[ (p_2 + \alpha'_r) I_{rcm} \cdot e^{j\phi_{rc}} - k_r \cdot \alpha'_s \cdot I_{scm} \cdot e^{j\phi_{sc}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

та представляють ці струми в показовій формі  $i = I_m \cdot e^{j\phi}$ .

Сумарний електромагнітний момент

$$M_{em} = M_c + M_\Gamma + M_{\delta_1} + M_{\delta_1 + \delta_2} + M_{\delta_2} \quad (2.8)$$

представляють у вигляді суми п'яти моментів – сталого  $M_c$ , гальмівного  $M_\Gamma$  та знакозмінних моментів  $M_{\delta_1}$ ,  $M_{\delta_1 + \delta_2}$ ,  $M_{\delta_2}$ .

Амплітуда сталого електромагнітного моменту

$$M_c = x_m \cdot I_{scm} \cdot I_{rcm} \cdot \sin(\varphi_{sc} - \varphi_{rc}). \quad (2.9)$$

Амплітуда гальмівного моменту

$$M_\Gamma = x_m I_{s1m} I_{r1m} \sin(\varphi_{s1} - \varphi_{r1}) e^{2\delta_1 t} + I_{s2m} I_{r2m} \sin(\varphi_{s2} - \varphi_{r2}) e^{2\delta_2 t}. \quad (2.10)$$

Знакозмінні моменти

$$M_{\delta_1} = x_m \left[ \begin{array}{l} I_{scm} \cdot I_{r1m} \cdot \sin[\omega(1-\omega_1)t - (\varphi_{sc} - \varphi_{r1})] - \\ - I_{s1m} \cdot I_{rcm} \cdot \sin[\omega(1-\omega_1)t - (\varphi_{s1} - \varphi_{rc})] \cdot e^{\delta_1 t} \end{array} \right], \quad (2.11)$$

$$M_{\delta_2} = x_m \left[ \begin{array}{l} I_{scm} \cdot I_{r2m} \cdot \sin[\omega(1-\omega_2)t - (\varphi_{sc} - \varphi_{r2})] - \\ - I_{s2m} \cdot I_{rcm} \cdot \sin[\omega(1-\omega_2)t - (\varphi_{s2} - \varphi_{rc})] \cdot e^{\delta_2 t} \end{array} \right], \quad (2.12)$$

$$M_{\delta_1+\delta_2} = x_m \left[ \begin{array}{l} I_{s1m} \cdot I_{r2m} \cdot \sin[\omega(\omega_1 - \omega_2)t - (\varphi_{s1} - \varphi_{r2})] - \\ - I_{s2m} \cdot I_{r1m} \cdot \sin[\omega(\omega_1 - \omega_2)t - (\varphi_{s2} - \varphi_{r1})] \cdot e^{(\delta_1+\delta_2)t} \end{array} \right]. \quad (2.13)$$

### Реверс асинхронного двигуна

Будемо вважати, що двигун працює в сталому режимі з моментом опору  $M_o$  і має сталу частоту оберту  $\omega_c$ .

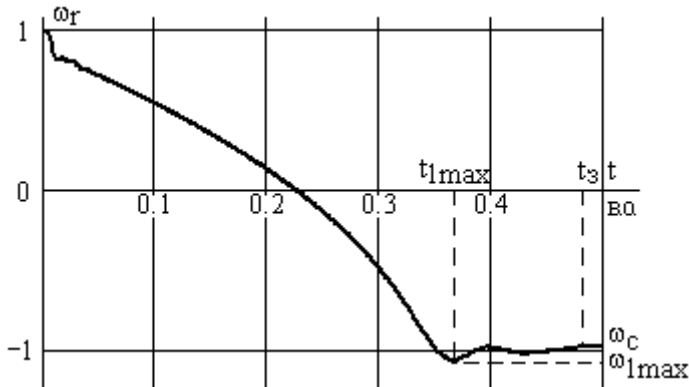


Рисунок 2.1 – Зміна частоти оберту ротора при реверсі

Часом закінчення процесу «реверс» -  $t_3$  є час, при якому частота обертання ротора приймає стає значення.

Зміна порядку чергування фаз напруги відображається тільки в зміні напрямку  $U_{s\beta}$ . Частота оберту ротора після переключення швидко падає до нуля (рис. 2.1), а потім ротор починає обертатися в інший бік набираючи оберти до сталої частоти (що не відрізняється від сталого режиму обертання в прямому напрямку).

## 2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темами: «Повторне вмикання» та «Реверс асинхронного двигуна». Ознайомитись з матеріалом п. 2.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

### 2.3 Контрольні запитання для самоперевірки

**2.3.1** При яких початкових умовах режиму «повторне вмикання» буде найбільший кидок струмів?

**2.3.2** Як впливає проміжок часу між відключенням та повторним вмиканням на кидок струму й електромагнітний момент?

**2.3.3** З яких перехідних процесів складається процес реверсу?

**2.3.4** Чим обумовлений кидок струму при реверсі?

**2.3.5** Яке значення приймає частота обертання поля відносно частота обертання ротора при реверсі?

**2.3.6** В якому випадку перехідний процес в асинхронному двигуні протікатиме більш довгий час: коли він почався при більшому чи меншому навантаженні та чому?

**2.3.7** Якими повинні бути корені характеристичного рівняння, щоб перехідний процес затухав?

**2.3.8** Як зміниться електромагнітний момент асинхронного двигуна при швидкому реверсі з урахуванням та без урахування згасання поля?

### 2.4 Програма роботи

**2.4.1** Скласти початкові дані процесу повторного вмикання.

**2.4.2** Чисельними методами розрахувати процес повторного вмикання на ЕОМ при наявності й відсутності залишкового поля.

**2.4.3** Аналітично розрахувати змінення електромагнітного моменту та його складових у перехідному процесі повторного вмикання при відсутності залишкового поля.

**2.4.4** Скласти початкові дані процесу реверсу.

**2.4.5** Чисельними методами розрахувати процес реверсу на ЕОМ.

**2.4.6** Аналітично розрахувати процес реверсу асинхронного двигуна.

**2.4.7** Провести аналіз одержаних результатів.

## 2.5 Порядок виконання лабораторної роботи

**2.5.1** Провести два розрахунки процесу «повторне вмикання» на ЕОМ при наявності й відсутності залишкового поля.

**Параметри двигуна** такі ж самі, як при пуску.

**Коефіцієнти рівнянь** такі ж, як при пуску (окрім  $\varphi_\alpha = \varphi_\beta = \omega(t_p + \Delta t_1 + \Delta t_2)$ ;  $\Delta t_1 = 1$ ;  $\Delta t_2 = 0.05$ ). Значення  $t_p$  взяти з лабораторної роботи 1.

**Початкові умови** (крім п. а) обох дослідів однакові:

а) для режиму повторного вмикання при наявності залишкового поля – потокозчеплення розрахувати за формулами (2.1) – (2.5); для режиму повторного вмикання при відсутності залишкового поля – прийняти потокозчеплення рівними 0;

б) момент опору як у лабораторній роботі № 1;

в) двигун працює в сталому режимі із частотою оберту  $\omega_c$ ;

г) рівняння розв'язуються в системі координат статора  $\omega_k = 0$ .

**2.5.2** Завдавши початкові дані, змоделювати задані режими на ЕОМ. Для кожного досліду побудувати графіки залежностей  $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, I_A = f(t)$ ;  $i_{s\beta}, i_{r\beta}, I_B = f(t)$ ;  $\omega_r, M_{em} = f(t)$ . Довготу процесу «повторне вмикання» визначити за кривою зміни моменту.

**2.5.3** Аналітично розрахувати змінення електромагнітного моменту та його складових у перехідному процесі «повторне вмикання» при відсутності залишкового поля й незмінній (сталій) частоті оберту ротора за методикою ((2.6) – (2.13)). Прийняти ковзання  $S_n = S_c$ . Початкові значення струмів та потокозчеплень дорівнюють нулеві.

Задаючись часом  $t=0,0.005,\dots,0.1$ , розрахувати всі складові електромагнітного моменту. За результатами аналітичного розрахунку побудувати графіки  $M_{emO}, M_c, M_\Gamma, M_{\delta_1}, M_{\delta_1+\delta_2}, M_{\delta_2} = f(t)$ , де  $M_{emO}$  - електромагнітний момент процесу повторного вмикання при відсутності залишкового поля з розрахунку на ЕОМ.

**2.5.4** Провести розрахунок процесу «реверс» на ЕОМ.

**Параметри двигуна** такі ж самі, що й при пуску.

**Коефіцієнти рівнянь** аналогічні коефіцієнтам режиму «повторне вмикання» окрім  $A_\beta$ . Зміна порядку чергування фаз напруги відображається в зміні напрямку  $U_{s\beta}$ , тому приймаємо  $A_\beta = -1$ .

**Початкові умови** такі ж самі, як у режимі «повторне вмикання» при наявності залишкового поля.

**2.5.5** Завдавши початкові дані, змодельовати режим «реверс» на ЕОМ. Довготу перехідного процесу «реверс» визначити по кривій зміни частоти обертання ротора, визначити час розгону ротора та сталу частоту обертання за формулами (1.5) – (1.8). Побудувати графіки залежностей струмів  $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, I_A = f(t)$ ; частоти обертання та електромагнітного моменту  $\omega_r, M_{em} = f(t)$ .

**2.5.6** Аналітично розрахувати перехідний процес «реверс» асинхронного двигуна з початку реверса до  $t. \omega_{1\max}$  за методикою, наведеною у лабораторній роботі №1 ((1.9) – (1.19)).

## 2.6 Зміст звіту

**2.6.1** Розрахунок початкових потокозчеплень.

**2.6.2** Результати машинного розрахунку повторного вмикання при наявності й відсутності залишкового поля.

**2.6.3** Результати аналітичного розрахунку зміни моменту у функції часу.

**2.6.4** Аналіз результатів аналітичного й машинного розрахунків.

**2.6.5** Висновки.

### 3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОНИХ МАШИН МЕТОДОМ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

**Мета роботи:** одержати за допомогою планованого експерименту функціональні залежності між параметрами асинхронних машин й динамічними характеристиками. Визначити оптимальні значення параметрів.

#### 3.1 Теоретичні відомості

Об'єктом для планування експерименту є математична модель. Під експериментом розуміється розрахунок на ЕОМ цільових функцій  $F_i(x_1, x_2)$  при різних комбінаціях значень факторів  $x_1, x_2$ . При постановці експерименту фактори змінюють в межах  $\Delta x_{in}$ , необхідних для проведення досліду. Для спрощення розрахунків, полегшення побудови графіків та сприйняття інформації виконують перехід від абсолютних величин до кодованих.

**Таблиця 3.1 – Співвідношення значень факторів**

Значення фактору	Позначення	Значення	
		абсолютне (од. вим.)	кодоване
Максимальне	$x_{\max}$	$x_n + \Delta x_n$	+1
Середнє (номінальне)	$x_n$	$x_n$	0
Мінімальне	$x_{\min}$	$x_n - \Delta x_n$	-1

Кількість дослідів, необхідних для одержання полінома другого порядку визначається за формулою

$$N = 2^n + 2n + 1, \quad (3.1)$$

де  $n$  – кількість факторів.

Загальний вигляд матриці планування експерименту другого порядку надано в таблиці 3.2. Перший стовпчик – номер досліду. Другий – значення умовного фактора  $x_0$ , який в усіх дослідах дорівнює одиниці. Третій та четвертий по суті являються плануванням експерименту, тобто в цих стовпчиках вказується які значення

факторів  $x_1, x_2$  необхідно прийняти при постанові дослідів. П'ятий стовпчик – добуток третього й четвертого  $x_{12} = x_1 \cdot x_2$ . Шостий і сьомий стовпчики – умовні фактори

$$x_{11} = x_1^2 - a, \quad x_{22} = x_2^2 - a, \quad (3.2)$$

де  $a$  – постійна (при двох факторах  $a = 2/3$ );

$$a = \frac{\sum_{j=1}^N x_{1j}^2}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{2j}^2}{N}. \quad (3.3)$$

Восьмий і дев'ятий стовпчики – результати експерименту.

**Таблиця 3.2 – Матриця планування й результатів експерименту**

Матриця планування							Результати експерименту	
задано				розраховано				
N	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_{12}$	$x_{11}$	$x_{22}$	$F_1$	$F_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	+	-	-	+	1/3	1/3		
2	+	+	-	-	1/3	1/3		
3	+	-	+	-	1/3	1/3		
4	+	+	+	+	1/3	1/3		
5	+	-	0	0	1/3	-2/3		
6	+	+	0	0	1/3	-2/3		
7	+	0	-	0	-2/3	1/3		
8	+	0	+	0	-2/3	1/3		
9	+	0	0	0	-2/3	-2/3		

Задаючись різними значеннями  $x_1, x_2$  за таблицею 3.2 проводять  $N$  дослідів. У стовпчики 8, 9 вписують результати експерименту.

На основі результатів розрахунку визначають поліноми для цільових функцій  $F_1, F_2$ :

$$F_1 = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_{12} + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2, \quad (3.4)$$

$$F_2 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_{12} + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2, \quad (3.5)$$

де  $a_i, b_i$  – коефіцієнти

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot F_{1j}}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}, \quad b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot F_{2j}}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}. \quad (3.6)$$

Двомірний факторний простір змінних  $x_1, x_2$  відображено на рисунку 3.1. Внутрішній (факторний) простір квадрату – вихідна частина допустимого розв'язку (без урахування обмежень).

Визначення оптимального значення функції звичайно виконується за поставлених умов. Наприклад:  $F_1 \rightarrow \min$ ,  $F_2 \leq F^*$  (обмеження). Обмеження може представляти собою криву другого порядку

$$b_2 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 \leq F^*, \quad (3.7)$$

яку будують за заданими значеннями  $x_1, x_2$  у діапазоні від  $-1$  до  $+1$ . Обмеження звужує область допустимих рішень до багатокутника АБВГ.

Для визначення координати точки факторного простору, в якій  $F_1$  буде мінімальною, необхідно щоб

$$\frac{dF_1}{dx_1} = 0, \quad \frac{dF_1}{dx_2} = 0. \quad (3.8)$$

Диференціюючи (3.4), одержують систему рівнянь з двома невідомими. Її розв'язок дає оптимальні значення факторів  $x_{10}$  та  $x_{20}$ .

Якщо ці значення знаходяться в межах факторного простору з урахуванням обмежень, то це буде остаточне рішення. Якщо деякі значення випадають за межі факторного простору, то оптимальне значення приймають на межі факторного простору.

Оптимальні значення  $x_{10}$  та  $x_{20}$  переводять з кодованих одиниць у абсолютні

$$x_{i0n} = \frac{x_{i \max} \cdot (1 + x_{i0}) + x_{i \min} \cdot (1 - x_{i0})}{2}. \quad (3.9)$$

З одержаними оптимальними значеннями  $x_{iOn}$  проводять експеримент та визначають оптимальні значення цільових функцій  $F_{iOn}$ .

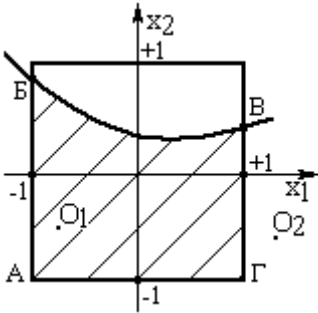


Рисунок 3.1 – Область факторного простору

Точка  $O_1$  з координатами  $(x_{11}, x_{21})$  знаходиться в межах факторного простору з урахуванням обмежень, тому  $(x_{11}, x_{21})$  - остаточне рішення. Точка  $O_2$  з координатами  $(x_{12}, x_{22})$  випадає за межі факторного простору, тому оптимальні значення треба прийняти на межі, тобто

$$x_{12} = 1 \quad \text{бо} \quad 1 \leq x_{12},$$

$$x_{22} = x_{22} \quad \text{бо} \quad -1 \leq x_{22} \leq 1.$$

Підставивши оптимальні значення факторів  $x_{iOn}$  в поліноми (3.4) та (3.5), визначають цільові функції  $F_{iOn}$ . Одержані результати порівнюють.

### 3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темами: «Застосування методів планування експерименту для рішення задач синтезу електричних машин». Ознайомитись з матеріалом п. 3.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

### 3.3 Контрольні запитання для самоперевірки

3.3.1 Що таке ортогональне планування експерименту?

3.3.2 Що таке планування експерименту на трьох рівнях?

3.3.3 Як розраховується значення зіркового плеча для кожного фактора при побудові планів другого порядку?

3.3.4 Які існують міри покращення адекватності поліному при неадекватності плану першого порядку?

3.3.5 Навіщо використовують кодовані фактори?

3.3.6 Які є шляхи підтримання адекватності моделі 1-го порядку?

### 3.4 Програма роботи

3.4.1 Провести планований експеримент другого порядку процесу «пуск асинхронного двигуна» на математичній моделі.

3.4.2 Розрахувати поліноми цільових функцій –  $I_{s\phi A}$  та  $M_{em}$ .

3.4.3 На основі одержаних поліномів графоаналітичним методом визначити координати точок оптимуму.

3.4.4 Провести пуск двигуна з оптимальними значеннями.

### 3.5 Порядок виконання лабораторної роботи

3.5.1 Об'єктом планування експерименту обрати пускову модель симетричного асинхронного двигуна.

Експериментом є розрахунок на ЕОМ моменту та струму статора у процесі пуску з різними комбінаціями опорів статора й ротора.

Розробити матрицю планування експерименту другого порядку. Цільовими функціями обрати струм статора фази А ( $I_{s\phi A}$ ) та електромагнітний момент ( $M_{em}$ ). За фактори експерименту обрати активні опори обмоток статора  $R_s$  та ротора  $R_r$ .

Визначити кількість дослідів, що необхідно для одержання полінома другого порядку, за формулою (3.1). Побудувати матрицю планування експерименту за зразком табл. 3.2, 3.3.

**Таблиця 3.3 – Матриця планування й результатів експерименту**

Матриця планування							Результати експерименту	
№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 \cdot x_2$	$x_{11}$	$x_{22}$	$I_{s\phi A}$	$M_{em}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	+	-	-	+	1/3	1/3		
...								
N	+	0	0	0	-2/3	-2/3		

Значення факторів при постановці експерименту змінювати в межах  $\pm 20\%$  від початкових значень, що вказані в таблиці 1 (тобто

$\Delta R_n = 20\% R_n$ ). Перевести значення факторів у кодовані спираючись на табл. 3.1. За матрицею експерименту (табл. 3.3) провести N дослідів на ЕОМ (початкові дані процесу пуску взяти з лабораторної роботи 1), окрім розрахованих значень факторів  $R_s$  ( $R_{s\alpha} = R_{s\beta} = R_s$ ) та  $R_r$ .

З табл. 3.3 виписати максимальні за модулем значення струму статора фази А та електромагнітного моменту, що мають місце у другому або третьому пиках.

**3.5.2** Скласти поліноми функцій мети другого порядку аналогічно (3.4), (3.5). Визначити коефіцієнти поліномів  $a$  й  $b$  за (3.6).

**3.5.3** Визначити оптимальні значення факторів за умов, що  $I_{s\phi A} \rightarrow \min$ ,  $M_{em} \leq M^*$  ( $M^*$  задається викладачем). Відобразити двовірний факторний простір змінних  $R_s, R_r$  (див. рис. 3.1). Звузити область припустимих рішень до багатокутника АБВГ введенням обмеження  $-b_2 + b_1 R_s + b_2 R_r + b_{12} R_s R_r + b_{11} R_s^2 + b_{22} R_r^2 \leq M^*$  за заданими значеннями  $R_s, R_r$  у діапазоні від  $-1$  до  $+1$ .

Визначити координати точки факторного простору, для чого диференціювати поліном  $I_{s\phi A}$  відносно факторів  $R_s, R_r$  за формулами (3.9). Розв'язком отриманої системи рівнянь є оптимальні значення активних опорів обмоток статора та ротора. Відобразити на рисунку точку з координатами  $(R_s, R_r)$ . Якщо значення  $(R_s, R_r)$  знаходяться в межах факторного простору з врахуванням обмежень, то це й буде остаточне рішення.

Якщо значення  $R_s$  або  $R_r$  знаходяться за межами факторного простору, то оптимальне значення приймають на межі факторного простору (див. рис. 3.1).

Перевести значення  $R_{s0}$  та  $R_{r0}$ , одержані в кодованих одиницях, в абсолютні одиниці за формулою (3.9).

**3.5.4** Провести експериментальний пуск двигуна з оптимальними значеннями  $R_{s0}, R_{r0}$  й визначити цільові функції  $I_{s\phi A}$  та  $M_{em}$ . Порівняти одержані результати з результатами, визначеними з рішення поліномів з оптимальними значеннями  $R_{s0}, R_{r0}$ .

### 3.6 Зміст звіту

- 3.6.1 Матриця планованого експерименту.
- 3.6.2 Поліноми залежностей  $I_{s\phi A}$  та  $M_{em}$ .
- 3.6.3 Оптимальні активні опори.
- 3.6.4 Висновки.

## 4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ СИМЕТРИЧНОМУ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОНОГО ДВИГУНА

**Мета роботи:** дослідження процесу затухання поля в асинхронному двигуні при короткому замиканні

### 4.1 Теоретичні відомості

**4.1.1** При проведенні дослідження перехідного процесу симетричного короткого замикання обмотки статора асинхронного двигуна напруга  $U_{s\alpha} = U_{s\beta} = 0$ . При цьому миттєві значення потокозчеплень відповідають значенням сталих потокозчеплень при часі розбігу двигуна –  $t_p$  (рис. 1.1).

Для розрахунку потокозчеплень визначають амплітуди сталих струмів статора та ротора  $i_{sc}$ ,  $i_{rc}$  за формулами (1.9) – (1.19) з п. 1.1. Приводять до експоненціального вигляду сталі струми статора і ротора за формулами (1.14) – (1.15).

Визначають миттєві значення струмів статора й ротора по осях  $\alpha$  та  $\beta$  для часу  $t = t_p$

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= I_{scm} \cdot \cos(\omega t_p + \varphi_{sc}) \\ i_{s\beta} &= I_{scm} \cdot \sin(\omega t_p + \varphi_{sc}) \\ i_{r\alpha} &= I_{rcm} \cdot \cos(\omega t_p + \varphi_{rc}) \\ i_{r\beta} &= I_{rcm} \cdot \sin(\omega t_p + \varphi_{rc}) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Визначають початкові потокозчеплення:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{s\alpha n} &= x_s \cdot i_{s\alpha} + x_m \cdot i_{r\alpha} \\ \psi_{s\beta n} &= x_s \cdot i_{s\beta} + x_m \cdot i_{r\beta} \\ \psi_{r\alpha n} &= x_r \cdot i_{r\alpha} + x_m \cdot i_{s\alpha} \\ \psi_{r\beta n} &= x_r \cdot i_{r\beta} + x_m \cdot i_{s\beta} \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

## 4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Ознайомитись з матеріалом п. 4.1 та [4], [5], підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

### 4.3 Контрольні запитання для самоперевірки

**4.3.1** Коли гасіння поля станеться скоріше: при короткому замиканні чи при відключенні двигуна?

**4.3.2** Від яких параметрів залежить час затухання поля у повітряному зазорі?

**4.3.3** Яку частину електричної машини можна перетворювати для виключення періодичних коефіцієнтів в рівняннях математичної моделі.

**4.3.4** Що таке симетрична та несиметрична двофазна електрична машина?

**4.3.5** На що впливає гальмівний момент асинхронного двигуна при короткому замиканні?

### 4.4 Програма роботи

**4.4.1** Скласти початкові дані.

**4.4.2** Чисельним методом на ЕОМ розрахувати перехідний процес короткого замикання.

**4.4.3** Розрахувати аналітично вільні складові струмів обмоток статора та ротора при гасінні поля у режимі короткого замикання.

**4.4.4** Провести аналіз одержаних результатів.

### 4.5 Порядок виконання лабораторної роботи

**4.5.1** Дослідити симетричну машину.

**Параметри двигуна** такі ж самі, що й при пуску.

**Коефіцієнти рівнянь** такі ж самі, що й при пуску окрім  $A_\alpha = 0$ ,  $A_\beta = 0$ .

**Початкові умови** – для сталого режиму. Розрахувати миттєві значення сталих потокозчеплень (див. п. 4.1), які відповідають часу  $t_p$ , визначеному в лабораторній роботі №1. Початковий момент опору

такий же як при пуску. Початкова частота оберту ротора  $\omega_r = \omega_c = 0.98$ . Рівняння розв'язують в системі координат статора, тобто  $\omega_k = 0$ .

**4.5.2** Розрахувати на ЕОМ перехідний процес короткого замикання. Побудувати графіки залежностей струмів статора та ротора –  $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta} = f(t)$  та графіки залежностей електромагнітного моменту та частоти обертання ротора  $M_{em}, \omega_r = f(t)$  в функції часу. За графіками визначити час гасіння поля (струми дорівнюють нулеві).

**4.5.3** Аналітичний розрахунок виконати за методикою п. 1.1 – ((1.9) – (1.19)) до часу гасіння поля.

**4.5.4** При аналізі визначити кидок струму й моменту, визначити залежності частот оберту вільних струмів статора й ротора у функції часу, а також коефіцієнти згасання цих струмів. Побудувати графіки залежностей складових коренів характеристичного рівняння від частоти обертання ротора асинхронного двигуна –  $\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2 = f(\omega_r)$ , струму статора та його складових в функції часу –  $i_s, i_{sc}, i_{s\beta 1}, i_{s\beta 2} = f(t)$  і проаналізувати форму одержаних кривих.

## 4.6 Зміст звіту

**4.6.1** Розрахунок початкових умов

**4.6.2** Результати аналітичного розрахунку.

**4.6.3** Графіки залежностей  $i_{s\alpha}, i_{r\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\beta} = f(t)$ ,  $\delta_1, \delta_2, \omega_1, \omega_2 = f(\omega_r)$ ,  $i_s, i_{sc}, i_{s\beta 1}, i_{s\beta 2} = f(t)$ ,  $M_{em}, \omega_r = f(t)$ .

**4.6.4** Висновки.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

### 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 дані (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. Толочко. – 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. Толочко. – 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 2 / Укл.: Т. П. Солодовнікова, С.О. Лапкіна, І.Д. Галушко. – Запоріжжя : НУЗП, 2023– 32 с.

8 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 : НУЗП, 2023. – 34 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»

**ЗВІТ**  
**З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**  
з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем»

Виконав

ст. гр. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

А. В. Шевченко

Перевірив,

старш. викл. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Т. П. Солодовнікова