

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Методичні рекомендації до лабораторних робіт

з дисциплін

«МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ»
«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ЕЛЕКТРОПРИВОД»

Частина I

*(для здобувачів вищої освіти спеціальностей G3 Електрична інженерія,
G16 Гірництво та газонафтові технології)
(Електронне видання)*

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
електричної інженерії
Протокол № 9 від 15.04.2025 р.

Київ – 2025

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін «Моделювання електротехнічних та електромеханічних систем», «Електротехніка, електропостачання, електропривод» Частина I (для здобувачів вищої освіти спеціальностей G3 Електрична інженерія, G16 Гірництво та газонафтові технології)
// Укладачі: Є.С. Руднєв, Ю.А. Романченко, М.О. Морнева – Київ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2025. – 39с.

Методичні вказівки призначені для здобувачів вищої освіти спеціальностей G3 Електрична інженерія, G16 Гірництво та газонафтові технології та можуть бути корисними для здобувачів вищої освіти інших інженерних спеціальностей.

Методичні вказівки містять рекомендації для виконання лабораторних робіт з використанням пакету MATLAB (Simulink, Control System Toolbox, SimPowerSystem) за наступними темами: «Дослідження динаміки двигуна постійного струму з незалежним збудженням», «Дослідження динаміки двигуна постійного струму з послідовним збудженням», «Моделювання асинхронної машини», «Моделювання явнополюсної синхронної машини».

Укладачі

Є.С. Руднєв, д.т.н., доц.

Ю.А. Романченко, к.т.н., доц.

М.О. Морнева, к.т.н., доц.

Рецензент

Н.М. Філімоненко, к.т.н., доц.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. Дослідження динаміки двигуна постійного струму з незалежним збудженням	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. Дослідження динаміки двигуна постійного струму з послідовним збудженням	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. Моделювання асинхронної машини	21
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. Моделювання явнополюсної синхронної машини	29
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....	38

ВСТУП

Лабораторні роботи, представлені в даному комплексі, присвячені дослідженню динаміки двигунів. У всіх роботах пропонується моделювання двигунів та систем структурним способом.

Лабораторні роботи №1–4 присвячені дослідженню динаміки та режимів чотирьох типів двигунів: постійного струму з незалежним та послідовним збудженням, асинхронного та явнополюсного синхронного з демпферними обмотками. В кожній роботі наведені параметри двигунів (30-33 варіанти). В ЛР№1 наведені параметри двигунів фірми Siemens; в ЛР№2 – двигунів серії Д; в ЛР№3 – асинхронних двигунів серії 4А. Параметри синхронних двигунів, наведені в ЛР№4, одержані за емпіричними співвідношеннями, але відповідають реальним двигунам за значенням.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Виконання лабораторних робіт вимагає засвоєння здобувачами вищої освіти основних навичок роботи на персональному комп'ютері, знання основних команд і правил роботи в операційній системі Windows.

Лабораторні роботи виконуються в спеціалізованих навчальних класах (комп'ютерних класах) за наявності до 25 комп'ютерів, об'єднаних у локальні обчислювальні мережі, з дотриманням основних правил техніки безпеки та пожежної безпеки. Невиконання цих правил може призвести до ураження електричним струмом працюючих, пошкодження дорогого обладнання, втрати важливої інформації, що зберігається на комп'ютерах локальної мережі або на сервері комп'ютерного класу.

Щоб уникнути нещасних випадків, псування обладнання здобувачі зобов'язані виконувати такі вимоги:

1) не торкатися частин обладнання, що з тих чи інших причин мають відкриті корпуси системних блоків і моніторів комп'ютерів;

2) не робити будь-які відключення і ввімкнення електрообладнання робочого місця без дозволу лаборанта або викладача, який проводить заняття, не знімати і не перевішувати попереджувальні плакати і написи;

3) у процесі виконання лабораторних робіт категорично забороняється використовувати неперевірені носії інформації, завантажувати і встановлювати в комп'ютер інше програмне забезпечення, крім використовуваного на цьому комп'ютері;

4) для тимчасового зберігання інформації при виконанні лабораторних робіт виділяється певний обсяг дискового простору на робочій машині або на сервері комп'ютерного класу. Правила доступу до цього обсягу (правила запису шляху в каталозі файлів) вказуються лаборантом навчального класу;

5) категорично забороняється видаляти інформацію з каталогів, які не належать здобувачам; будь-яке видалення інформації має бути погоджено з лаборантом навчального класу;

6) у разі помилкового видалення інформації з комп'ютера необхідно звернутися до лаборанта або викладача, який проводить лабораторні заняття, для надання допомоги у відновленні загубленої інформації. Самостійна спроба відновити видалені файли або каталоги може призвести до безповоротної втрати інформації;

7) не виконувати операцій запису в системні файли, що використовуються операційною системою Windows, не переміщати інформацію в каталогах, які не належать здобувачам, тому що це може призвести до втрати операційною системою працездатності;

8) у разі виникнення підозр у некоректній роботі комп'ютера, конфліктів програмного забезпечення, збоїв при виконанні команд операційної системи, непередбачуваній втраті оперативної інформації, появі попереджувальних повідомлень з боку антивірусного програмного забезпечення, неочікуваного перезавантаження комп'ютера необхідно повідомити про це керівника занять для перевірки комп'ютера та підтвердження його працездатності;

9) відповідальність за дотримання цих правил покладається на здобувачів вищої освіти, які працюють у комп'ютерному класі, а контроль за їх дотриманням ведеться керівником лабораторних робіт.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Мета роботи: вивчити опис двигуна постійного струму з незалежним збудженням, скласти структуру моделі двигуна та навчитися використовувати її для дослідження динаміки двигуна при параметричному, координат-ному чи амплітудному впливі на нього.

1.1 Методичні рекомендації

1.1.1 Опис двигуна постійного струму з незалежним збудженням

Вважаючи потік незмінним, опис ДПС з НЗ складається з опису електромагнітної частини (рівняння електричної рівноваги якоря) та механічної частини (рівняння руху)

$$\begin{cases} U_{я} = C\Phi\omega + R_{я}i_{я} + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} \\ C\Phi i_{я} - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (1.1)$$

Структурне представлення цього опису, в якому є можливість задавати значення $R_{я}$, приведена на рис. 1.1.

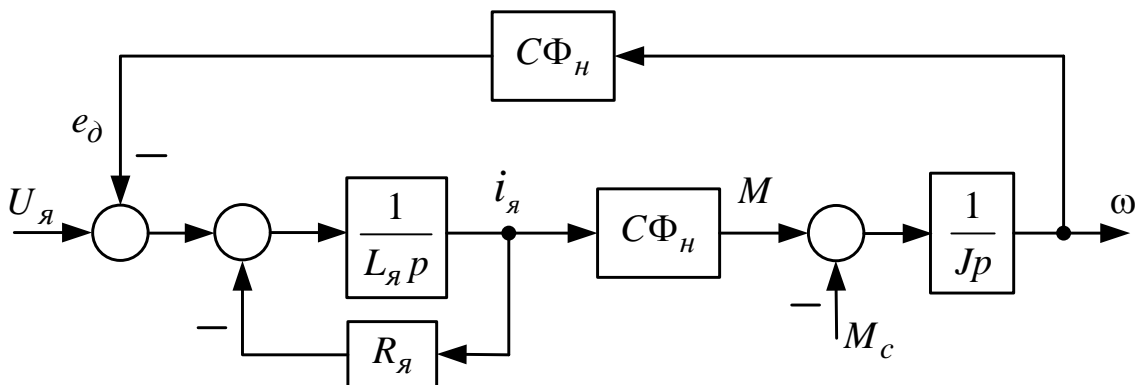


Рисунок 1.1 – Структура моделі ДПС з НЗ

Для моделювання процесів з усталеного стану у відповідних інтеграторах необхідно задавати початкові значення $i(0)$ і $\omega(0)$, які повинні бути узгоджені між собою. Ці значення відповідають значенню M_c і можуть бути розраховані з виразу для статичної електромеханічної характеристики:

$$i(0) = \frac{M_c}{C\Phi_n}; \quad \omega(0) = \frac{U - i(0)R_{я}}{C\Phi_n}. \quad (1.2)$$

Індуктивність якоря обчислюється за формулою Лінвіля–Уманського:

$$L_{я} = K \frac{U_n}{p_n I_n \omega_n}, \quad (1.3)$$

де p_n – число пар полюсів машини;

K – емпіричний коефіцієнт. Для компенсованих двигунів $K=0,25$

При нехтуванні електромагнітною сталою якоря, тобто при розгляданні тільки механічних процесів, перше рівняння (1.1) буде не диференціальним, а алгебраїчним

$$U_{я} = C\Phi\omega + R_{я}i_{я}, \quad (1.4)$$

і структура моделі двигуна буде мати вид, зображений на рис. 1.2.

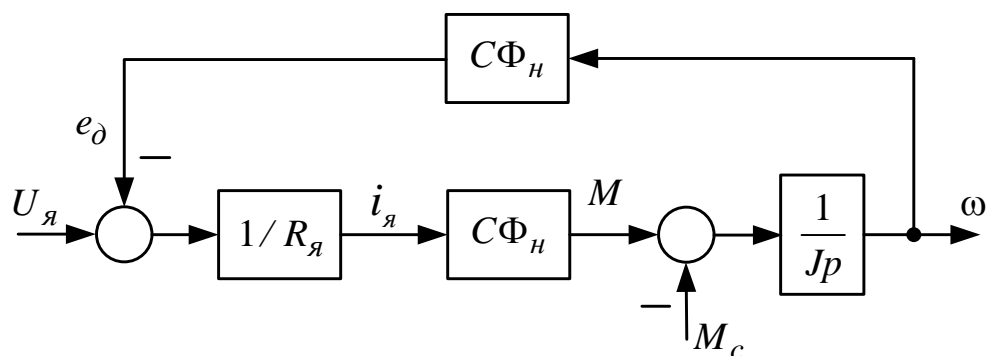


Рисунок 1.2 – Структура моделі ДПС з НЗ при $L_{я} = 0$

1.1.2 Формування сигналу моменту опору (M_c) в моделі ДПС

При активному моменті опору значення M_c задається на необхідному рівні без додаткових блоків (рис. 1.3,а). При реактивному M_c його знак формується

відповідно до знаку швидкості (рис. 1.3,б) така модель працездатна лише при моделюванні з постійним кроком. Більш коректну модель реактивного моменту опору можна реалізувати спеціальною структурою з використанням блоків Hit Crossing.

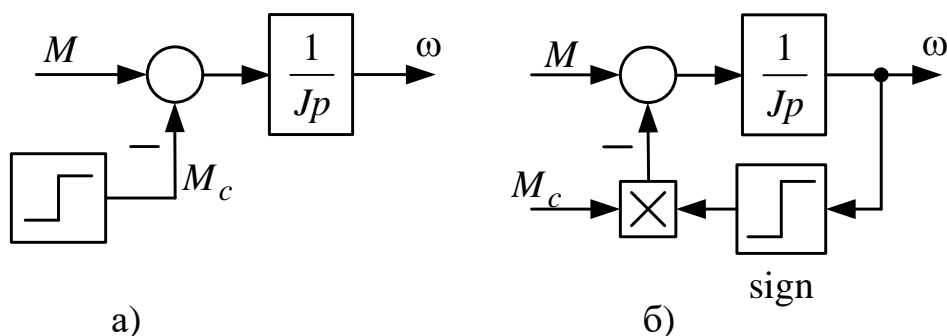


Рисунок 1.3 – Структури формування активного (а) і реактивного (б) моменту опору

1.2 Програма роботи

1. Розрахувати параметри та координати ДПС з НЗ у номінальному режимі для машини з таблиці 1.1 за індивідуальним варіантом.

2. Побудувати в MATLAB/Simulink структури моделей ДПС з НЗ з врахуванням та без врахування електромагнітної інерції якоря.

3. Промоделювати процеси прямого пуску без навантаження на моделі з врахуванням T_e при двох значеннях J , які задані в табл. 1.1. Розрахувати початкові та усталені значення струму і швидкості для цього процесу. Побудувати фазові портрети процесів в осях « $\omega - i$ ».

4. На моделі з врахуванням T_e і $J = J_1$ промоделювати процеси пуску та гальмування при лінійному змінненні напруги на якорі від 0 до U_n і навпаки. Час пуску і гальмування розрахувати з умови значення динамічного струму $I_j = 1,5I_n$

5. Промоделювати процеси накиду та зняття навантаження при роботі на природній характеристиці за наступними моделями:

- без врахування T_e ;

- з врахуванням T_e з моментом інерції J_1 (за табл. 1.2);
 - з врахуванням T_e з моментом інерції J_2 (за табл. 1.2),
- побудувати фазові портрети процесів.

При накиді навантаження M_c змінюється з 0 до M_n , при знятті навантаження з M_n до 0. Розрахувати початкові та усталені значення струму і швидкості для цих процесів.

6. Про моделювати процеси при зміні параметра чи напруги живлення, задані в табл. 1.2, в системі з врахуванням T_e при $J = J_1$. Привести фазовий портрет процесів. На фазовій діаграмі показати статичні характеристики ДПС: початкову та нову, на яку відбувається переключення. Розрахувати початкові та усталені значення струму і швидкості.

1.3 Варіанти завдань

В таблиці 1.1 приведені номінальні параметри двигунів постійного струму з незалежним збудженням.

В таблиці 1.2 – приведені завдання для дослідження перехідних процесів при зміні параметра чи напруги живлення.

Таблиця 1.1 – Данні двигунів постійного струму з незалежним збудженням

№ вар	P_H , кВт	n_H , об/хв	U_H , В	I_H , А	$R_{я}$, Ом	$L_{я}$, мГн	$J_D=J_1$, кгм ²	J_2 , кгм ²
1	6,55	1020	420	20	3,62	30	0,046	0,12
2	13,5	2270	420	27,5	0,912	7,5	0,046	0,13
3	14,8	1720	420	41,5	1,16	14	0,09	0,2
4	9,4	840	420	29,4	2,93	32,5	0,11	0,25
5	28,2	2000	420	77	0,486	5,5	0,14	0,36
6	21,5	1170	520	49,5	1,37	17,5	0,24	0,6
7	42	2530	420	112	0,237	2,8	0,24	0,51
8	16	685	420	48,5	1,62	21,5	0,29	0,87
9	50,5	2400	470	119	0,23	2,9	0,29	0,75
10	23,6	820	420	68,5	0,918	13,5	0,36	1,2
11	38	1350	520	84	0,588	8,5	0,36	1,25
12	71	2410	470	168	0,143	1,65	0,32	1,15
13	92	3430	520	193	0,108	1	0,32	0,75
14	90,5	2310	470	212	0,122	1,35	0,38	1,4
15	41,5	1310	420	114	0,403	4	0,38	0,85
16	47,5	930	520	107	0,578	7	0,46	2,1
17	89	1780	470	210	0,147	1,75	0,46	1,95

Продовження таблиці 1.1

№ вар	P_H , кВт	n_H , об/хв	U_H , В	I_H , А	$R_{я}$, Ом	$L_{я}$, мГн	$J_D=J_1$, кгм ²	J_2 , кгм ²
18	55,5	995	420	153	0,33	5,83	0,6	3,1
19	105	1920	520	220	0,156	2,72	0,6	2,9
20	119	1800	520	250	0,134	2,41	0,7	4,1
21	44,2	645	420	129	0,535	9,65	0,7	4,2
22	202	2800	470	456	0,0382	0,76	1,2	5,7
23	93	1120	420	250	0,16	3,19	1,2	6,1
24	82,5	835	520	183	0,334	7,18	1,3	8,2
25	197	2060	470	406	0,062	1,28	1,3	6,4
26	122	950	520	262	0,18	4,71	2,2	14,7
27	109	670	420	298	0,16	4,4	2,5	22,8
28	186	1040	470	428	0,069	2,32	3,6	37
29	324	1480	600	570	0,044	1,59	4,2	53
30	171	605	420	452	0,08	3,44	6,4	91
31	364	1310	520	745	0,0296	1,31	6,4	92
32	195	570	420	515	0,0685	3,19	7,5	127
33	430	1260	520	875	0,024	1,24	7,5	139

Таблиця 1.2 – Параметричні дії на двигун

№ вар	Завдання	
1	$U = 0,85 U_H$	Перехід з природної характеристики на характеристику з напругою U при $M_c = M_H$
12	$U = 0,8 U_H$	
23	$U = 0,9 U_H$	
2	$U = 0,7 U_H$	Перехід з штучної характеристики з напругою U ($R_\delta = 0$) на природну характеристику ($M_c = M_H$)
13	$U = 0,8 U_H$	
24	$U = 0,9 U_H$	
3	$R_\delta = 0,3 R_H$	Перехід з штучної характеристики з додатковим опором R_δ на природну характеристику при $M_c = M_H$
14	$R_\delta = 0,4 R_H$	
25	$R_\delta = 0,2 R_H$	
4	$R_\delta = 0,5 R_H$	Перехід з природної характеристики при $M_c = M_H$ на характеристику з додатковим опором R_δ
15	$R_\delta = 0,6 R_H$	
26	$R_\delta = 0,7 R_H$	
5	$R_\delta = 1,4 R_H$	Перехід з природної характеристики на штучну характеристику з додатковим опором R_δ при активному моменті опору, $M_c = M_H$
16	$R_\delta = 1,3 R_H$	
27	$R_\delta = 1,5 R_H$	
6	$R_\delta = 1,7 R_H$	Перехід з природної характеристики на штучну характеристику з додатковим опором R_δ при реактивному моменті опору ($M_c = M_H$)
17	$R_\delta = 1,6 R_H$	
28	$R_\delta = 1,5 R_H$	
7	$R_\delta = 0,7 R_H$	Перехід з природної характеристики при $M_c = M_H$ в режим динамічного гальмування з додатковим опором R_δ при активному M_c
18	$R_\delta = 0,8 R_H$	
29	$R_\delta = 0,6 R_H$	
8	$R_\delta = 0,6 R_H$	Перехід з природної характеристики при $M_c = M_H$ в режим динамічного гальмування з додатковим опором R_δ при реактивному M_c
19	$R_\delta = 0,5 R_H$	
30	$R_\delta = 0,7 R_H$	

Продовження таблиці 1.2

№ вар	Завдання	
9	$R_o = 1,2 R_H$	Перехід з природної характеристики при $M_c = 0,5M_H$ в режим гальмування противмиканням з додатковим опором R_o при активному характері моменту опору
20	$R_o = 1,4 R_H$	
31	$R_o = 1,1 R_H$	
10	$R_o = 1,4 R_H$	Перехід з природної характеристики при $M_c = M_H$ в режим гальмування противмиканням з додатковим опором R_o при реактивному характері моменту опору
21	$R_o = 1,5 R_H$	
32	$R_o = 1,3 R_H$	
11	$M_c = 0,4M_H$	Перехід з природної характеристики при моменті опору M_c в режим гальмування противмиканням з додатковим опором $R_o = R_H$ при реактивному характері моменту опору
22	$M_c = 0,5M_H$	
33	$M_c = 0,3M_H$	

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Мета роботи: дослідження динаміки ДПС з ПЗ при параметричному регулюванні швидкості.

2.1 Теоретичні відомості

Динаміку ДПС з ПЗ досліджуємо на моделі з врахуванням нелінійності $\Phi(i)$. Індуктивність обмотки збудження вважаємо незмінною. Нелінійність $\Phi(i)$ зручніше використовувати у відносних одиницях. В результаті опис ДПС з ПЗ буде наступним:

$$\begin{cases} U = C\Phi(i)\omega + iR_{яц} + L_{яц} \frac{di}{dt} \\ C\Phi(i)i_{я} - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

Нелінійність $C\Phi(i)$ в визначаємо з залежності $\Phi^*(I^*)$ у відносних одиницях:

$$C\Phi(i) = \Phi^*(I^*) \cdot C\Phi_n = \Phi^*(I/I_n) \cdot C\Phi_n. \quad (2.2)$$

Точки залежності $\Phi^*(I^*)$ подані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Залежність $\Phi^*(I^*)$

Φ^*	0	0,1	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
I^*	0	0,02	0,1	0,14	0,3	0,45	0,67	1,0	1,49

Структура ДПС з ПЗ, призначена для дослідження динаміки при параметричному керуванні, подана на рисунку 2.1. Для правильної роботи моделі при дослідженні режимів противмикання, фізичну операцію змінення полярності (підключення) обмотки якоря математично відображаємо

операцію модуля сигналу потоку Φ . Цим відображається незмінний напрям струму в обмотці збудження (знак Φ) при зміні напрямку струму в обмотці якоря (знаку I).

Для забезпечення самозбудження при переході в режим противмикання чи динамічного гальмування з самозбудженням необхідна наявність остаточного потоку при відсутності струму в обмотках якоря та збудження. При умові, що знак потоку не змінюється, тобто завжди буде позитивним, а остаточний потік на рівні 5% від Φ_n , в моделі можна сформувати або додаванням сигналу до значення $S\Phi$ одержаного з нелінійності, або обмеженням мінімального значення сигналу Φ на рівні $\Phi_{ост} = 0,05\Phi_n$, або завданням в кривій намагнічування потоку $\Phi_{ост}$ при $I = 0$. Цей варіант і рекомендується використовувати при побудові структури моделі. При цьому, для моделювання, наприклад, процесу переходу в режим противмикання в початковий момент часу в моделі задається негативне значення напруги живлення, значення $R_{од}$ і початкова швидкість в інтеграторі рішення рівняння руху (рис. 2.1).

Ця ж структура може використовуватися для дослідження процесів переходу в режим динамічного гальмування з самозбудженням. При цьому спостерігається й динаміка процесу самозбудження.

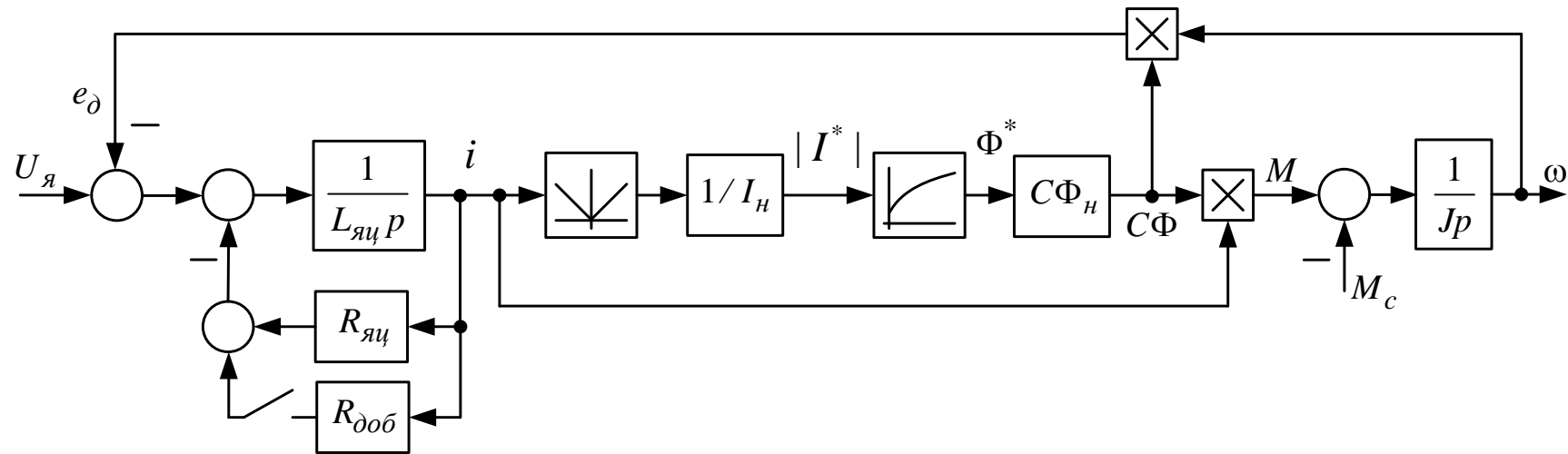


Рисунок 2.1 – Структурна схема моделі ДПС з ПЗ

2.2 Розрахунок необхідних параметрів

За даними таблиці 2.2 для двигуна, обраного за варіантом, попередньо необхідно визначити:

$$\text{номінальний потік: } C\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_{яц}}{\omega_n};$$

$$\text{опір якірного ланцюга: } R_{яц} = r_я + r_г;$$

$$\text{номінальний опір: } R_n = \frac{U_n}{I_n};$$

$$\text{номінальний момент: } M_n = \frac{P_n}{\omega_n};$$

$$\text{індуктивність якоря: } L_я = 0,25 \frac{U_n}{I_n p_n \omega_n};$$

$$\text{індуктивність послідовної обмотки збудження } L_г = (5 \div 6) L_я \frac{r_г}{r_я};$$

$$\text{повна індуктивність якірного ланцюга } L_{яц} = L_я + L_г.$$

2.3 Програма досліджень

Результатами досліджень за кожним пунктом є перехідні процеси $i(t)$, $\Phi(t)$, $\omega(t)$ фазовий портрет процесів (ω, i) .

На моделі, побудованій за структурою на рисунку 2.1 дослідити такі процеси:

1) прямий пуск двигуна без додаткових опорів в силовому ланцюзі при моменті опору $M_c = M_n$ реактивного характеру;

2) процеси ступінчастого змінення навантаження без додаткових опорів в схемі: збільшення $M_c = 0,5M_n, M_n, 1,5M_n, 2,0M_n$, та зменшення з $2,0M_n$ до $0,5M_n$. Процеси слід одержувати в одному циклі моделювання, змінюючи M_c після встановлення процесів. Процеси одержуються після попереднього пуску з $M_c = 0,5M_n$;

3) процес пуску з додатковим опором $R_{\partial} = 0,5R_n$ при $M_c = 0,5M_n$ з подальшим закорочувнням R_{∂} (стрибкоподібним змінням R_{∂} до 0) при усталеному стані;

4) процес переходу в режим противмикання при номінальній швидкості з додатковим опором $R_{\partial ne} = 0,5R_n$ при реактивному моменті опору $M_c = M_n$;

5) процес переходу в режим динамічного гальмування з самозбудженням з початкової швидкості ω_n при додатковому опорі $R_{\partial m} = 0,5R_n$ при двох значеннях момента опору: $M_c = 0$ і $M_c = M_n$ реактивного характеру.

2.4 Параметри двигунів постійного струму з послідовним збудженням

Досліджується динаміка двигуна постійного струму з послідовним збудженням, параметри якого обираються за варіантом за табл. 2.2. Для всіх машин, наведених в таблицях $2p=4$.

Таблиця 2.2 – Параметри двигунів постійного струму з послідовним збудженням

№ вар	Тип двигуна	P_n , кВт	n_n , об/хв	U_n , В	I_n , А	$r_{я}$, Ом	r_{ϵ} , Ом	J , кгм ²
1	Д-12	2,5	1100	220	16	1,63	0,59	0,05
2	Д-21	4,5	900	220	28	0,95	0,275	0,125
3	Д-22	6,0	850	220	36,5	0,57	0,3	0,155
4	Д-31	8,0	800	220	46,5	0,42	0,118	0,3
5	Д-32	12,0	675	220	69	0,28	0,097	0,425
6	Д-41	16,0	650	220	89	0,17	0,053	0,8
7	Д-806	22,0	575	220	120	0,1085	0,052	1,0

Продовження табл. 2.2

№ вар	Тип двигуна	P_n , кВт	n_n , об/хв	U_n , В	I_n , А	$r_{я}$, Ом	r_{ϵ} , Ом	J , кгм ²
8	Д-808	37,0	525	220	200	0,054	0,031	2,0
9	Д-810	85,0	500	220	294	0,0356	0,0171	3,625
10	Д-812	75,0	475	220	390	0,023	0,0103	7,0
11	Д-814	110,0	460	220	565	0,0805	0,0069	10,25
12	Д-816	150,0	450	220	765	0,084	0,0052	16,25
13	Д-818	185,0	410	220	935	0,0066	0,0039	27,5
14	Д-21	5,5	1200	220	33	0,531	0,275	0,125
15	Д-22	8,0	1200	220	46	0,322	0,19	0,155
16	Д-31	12,0	1100	220	68	0,194	0,118	0,3
17	Д-32	18,0	960	220	98	0,125	0,06	0,425
18	Д-41	24,0	970	220	130	0,072	0,053	0,8
19	Д-806	32,0	900	220	170	0,047	0,028	1,0
20	Д-808	47,0	720	220	248	0,0295	0,02	2,0
21	Д-21	4,0	1050	440	13	3,54	1,52	0,125
22	Д-31	6,7	800	440	19,5	2,08	0,63	0,3
23	Д-41	15,0	660	440	73	0,695	0,24	0,8
24	Д-808	37,0	525	440	100	0,21	0,135	2,0
25	Д-810	55,0	510	440	145	0,146	0,066	3,625
26	Д-812	70,0	500	440	180	0,099	0,041	7,0
27	Д-816	150,0	460	440	380	0,0324	0,02	16,25
28	Д-818	185,0	410	440	467	0,026	0,0148	27,5
29	Д-22	7,0	1180	440	20,5	1,69	0,96	0,125
30	Д-32	17,0	970	440	47	0,534	0,24	0,425
31	Д-806	32,0	900	440	85	0,205	0,099	1,0

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

Мета роботи: дослідити динаміку пуску при різних параметрах ланцюгів статора і ротора. Одержати модель АМ для застосування при дослідженні систем частотно-керованого електропривода.

3.1 Теоретичні відомості

Опис АМ розглядається при класичних припущеннях про магнітну та електричну симетрію обмоток, лінійність кривої намагнічування, нехтування зубцевими ефектами.

Опис АМ в ортогональній загальній просторовій системі координат (u, v) яка обертається зі швидкістю ω_k наступний:

$$\begin{cases} U_{su} = R_s i_{su} + \frac{d\psi_{su}}{dt} - \omega_k \psi_{sv} \\ U_{sv} = R_s i_{sv} + \frac{d\psi_{sv}}{dt} + \omega_k \psi_{su} \\ U_{ru} = R_r i_{ru} + \frac{d\psi_{ru}}{dt} - (\omega_k - \omega_e) \psi_{rv} \\ U_{rv} = R_r i_{rv} + \frac{d\psi_{rv}}{dt} + (\omega_k - \omega_e) \psi_{ru} \end{cases} \quad (3.1)$$

де R_s, R_r – активні опори обмоток статора та ротора;

ω_e – електрична швидкість обертання ротора, $\omega_e = z_p \omega$;

z_p – кількість пар полюсів.

Проекції потокозчеплень статора і ротора

$$\begin{cases} \psi_{su} = L_s i_{su} + L_m i_{ru} \\ \psi_{sv} = L_s i_{sv} + L_m i_{rv} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} \psi_{ru} = L_m i_{su} + L_r i_{ru} \\ \psi_{rv} = L_m i_{sv} + L_r i_{rv} \end{cases} \quad (3.3)$$

де L_s, L_r, L_m – індуктивності статора, ротора і намагнічування,

$$L_s = L_m + L_{1\sigma}; \quad L_r = L_m + L_{2\sigma}.$$

Електромагнітний момент

$$M_e = \frac{3}{2} z_p L_m (i_{sv} \cdot i_{ru} - i_{su} \cdot i_{rv}). \quad (3.4)$$

Для побудови структури моделі, призначеної для дослідження АМ при частотному керуванні за статором, запишемо наведений опис:

в нерухомій системі просторових координат $(\alpha, \beta; \omega_k = 0)$;

ротор розглядаємо короткозамкненим, тобто $U_{ru} = 0, U_{rv} = 0$;

опис одержимо в координатах стану $(i_s - \psi_r)$.

Доповнивши одержаний з (3.1)–(3.4) опис рівнянням руху, будемо мати:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[U_{s\alpha} - (R_s + K_r^2 R_r) i_{s\alpha} + K_r \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} + \omega_e K_r \psi_{r\beta} \right]; \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[U_{s\beta} - (R_s + K_r^2 R_r) i_{s\beta} + K_r \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} - \omega_e K_r \psi_{r\alpha} \right]; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} + R_r K_r i_{s\alpha} - \omega_e \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + R_r K_r i_{s\beta} + \omega_e \psi_{r\alpha}; \\ M_e = \frac{3}{2} z_p K_r (i_{s\beta} \psi_{r\alpha} - i_{s\alpha} \psi_{r\beta}); \quad \omega_e = z_p \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_c), \end{array} \right. \quad (3.5)$$

де K_r – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора, $K_r = \frac{L_m}{L_r}$;

σ – коефіцієнт розсіяння за Блонделем, $\sigma = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r}$;

Складові напруги статора при $\omega_k = 0$:

$$\begin{aligned} U_{s\alpha} &= U_{\phi m} \cdot \sin\left(\int \omega_{0e} dt\right); \\ U_{s\beta} &= -U_{\phi m} \cdot \cos\left(\int \omega_{0e} dt\right), \end{aligned} \quad (3.6)$$

де $U_{\phi m}$ – амплітуда фазної напруги живлення статора;

ω_{0e} – електрична швидкість обертання поля, $\omega_{0e} = 2\pi f$.

Струм ротора та потокозчеплення статора в проекціях на осі α і β виражаються алгебраїчно:

$$\begin{cases} i_{r\alpha} = \frac{1}{L_r}(\psi_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}); \\ i_{r\beta} = \frac{1}{L_r}(\psi_{r\beta} - L_m i_{s\beta}); \end{cases} \quad \begin{cases} \psi_{s\alpha} = K_r \psi_{r\alpha} + \sigma L_s i_{s\alpha}; \\ \psi_{s\beta} = K_r \psi_{r\beta} + \sigma L_s i_{s\beta}. \end{cases} \quad (3.7)$$

Роторні координати стану (ψ_r, i_r) в просторовій системі, пов'язаній з ротором (d, q) можна одержати з проекцій ψ_r, i_r в нерухомій системі α, β координатним перетворенням:

$$\begin{cases} \psi_{rd} = \psi_{r\alpha} \cos \sigma_e + \psi_{r\beta} \sin \sigma_e \\ \psi_{rq} = -\psi_{r\alpha} \sin \sigma_e + \psi_{r\beta} \cos \sigma_e \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} i_{rd} = i_{r\alpha} \cos \sigma_e + i_{r\beta} \sin \sigma_e \\ i_{rq} = -i_{r\alpha} \sin \sigma_e + i_{r\beta} \cos \sigma_e \end{cases} \quad (3.9)$$

де σ_e – електричний кут положення ротора,

$$\sigma_e = \int \omega_e dt = \int z_p \omega dt.$$

Модулі узагальнених векторів (амплітуди фазних значень) електричних координат стану одержуються в будь-якій ортогональній просторовій системі за теоремою Піфагора, наприклад модуль струму статора:

$$|I_s| = \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}. \quad (3.10)$$

За описом (3.5), (3.7), (3.8) складається структура моделі АМ. Для зручності при подальшому використанні цю структуру рекомендується згорнути в підсистему з вхідними сигналами $U_{s\alpha}, U_{s\beta}, M_c$, а вихідними – сигналами проекцій електричних координат стану (статорних на осі α, β , роторних на осі d, q), електромагнітного моменту (M_e) та швидкості (ω). Структура буде мати велику кількість зв'язків. Спростити її подання можна застосовуючи блоки

передачі сигналу Goto та From. Розрахунок модулів векторів за (3.10) також доцільніше реалізовувати окремими підсистемами. Один з варіантів структури АМ, яка відображає опис (3.5) наведена на рисунку 3.1.

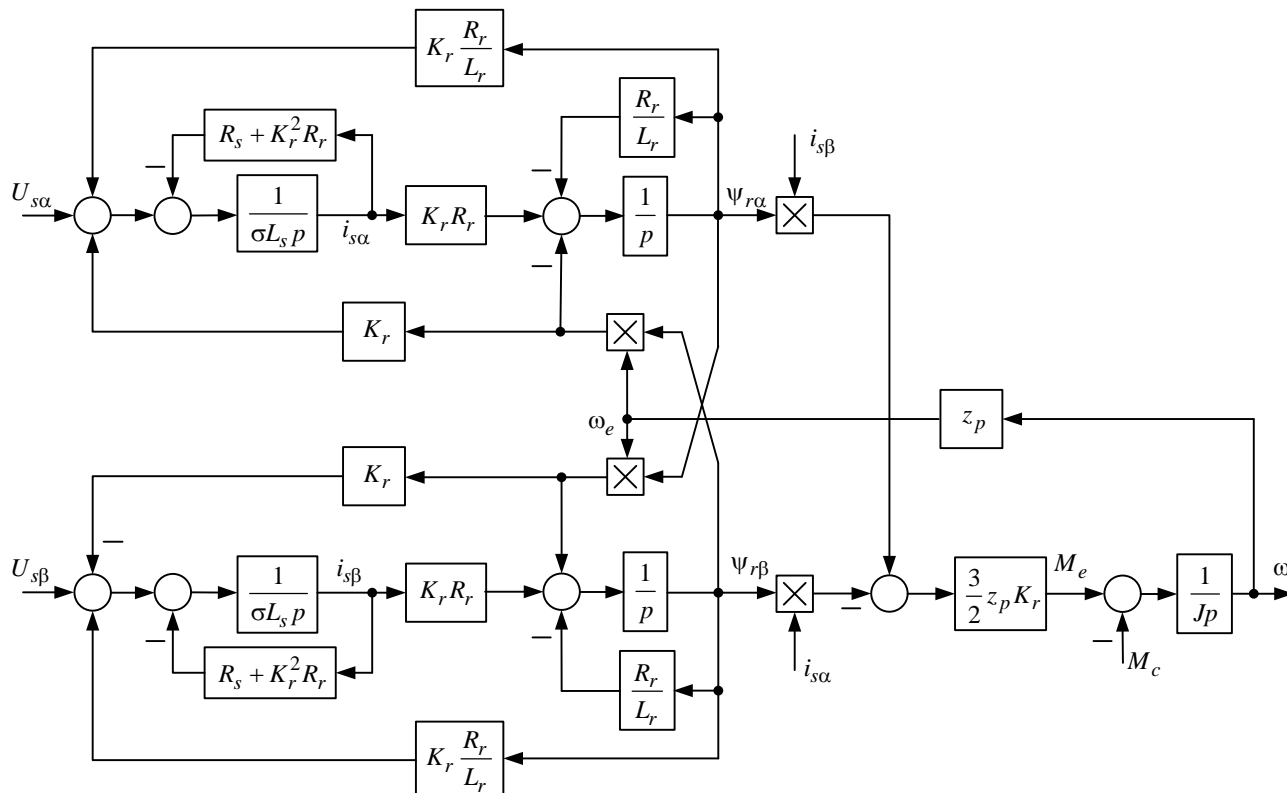


Рисунок 3.1 – Структура опису АМ в нерухомій загальній системі просторових координат (α, β)

Формування сигналів напруги живлення за (3.6) також слід реалізувати у вигляді підсистеми, входами якої є сигнали $\omega_{0e}, U_{\phi m}$ а виходами – $U_{s\alpha}, U_{s\beta}$.

3.2 Розрахунок параметрів АМ

В даній роботі для моделювання пропонуються двигуни серії 4А, параметри яких взято з довідника [2]. Необхідні параметри двигунів приведені в табл. 3.1. Основні формули для розрахунку параметрів вже наведені в [2]. Нижче дається методика розрахунку параметрів АМ, необхідних для моделювання.

Кількість пар полюсів визначається з кодування двигуна, де вказана кількість полюсів. Наприклад, двигун 4А250S4У3 має $z_p = 2$. Для зручності в

табл. 3.1 наведені синхронні частоти обертання, отже кількість пар полюсів можна також знайти розрахунком: $z_p = 3000 / n_0$.

Номінальна швидкість та момент (зверніть увагу, що номінальне ковзання наводиться у відсотках)

$$\omega_n = \omega_0(1 - s_n), M_n = P_n / \omega_n.$$

Номінальний фазний струм статора

$$I_{1n} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n}, \text{ A,}$$

де $U_{1\phi}$ – діюче значення фазної напруги статора.

Для всіх двигунів, дані яких наведені в табл. 3.1, $U_{1л} = 380\text{В}$. Тож

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}} = 220\text{В}.$$

Базовий опір

$$r_{\sigma} = x_{\sigma} = \frac{U_{1\phi}}{I_{1n}}, \text{ Ом.}$$

За опорами спрощеної Г-подібної схеми заміщення (значення яких приводяться у відносних одиницях, приведеними до статора) розраховуємо чисельні значення опорів

$$x_{\mu} = X_{\mu} \cdot x_{\sigma}, \text{ Ом;}$$

$$x_1 = \frac{2X'_1 X_{\mu}}{X_{\mu} + \sqrt{X_{\mu}^2 + 4X'_1 X_{\mu}}} \cdot x_{\sigma}, \text{ Ом; } x_2 = x'_2 = X''_2 \cdot x_{\sigma}, \text{ Ом;}$$

$$R_s = \frac{R'_1}{X'_1} \cdot x_1, \text{ Ом; } R_r = r'_2 = R''_2 \cdot r_{\sigma}, \text{ Ом;}$$

Знайдемо відповідні індуктивності:

$$L_m = 1,5 \cdot \frac{x_{\mu}}{\omega_{0e}}. L_{\sigma 1} = \frac{x_1}{\omega_{0e}}; L_{\sigma 2} = \frac{x_2}{\omega_{0e}};$$

$$L_s = L_m + L_{\sigma 1}; L_r = L_m + L_{\sigma 2},$$

де ω_{0e} – кругова частота напруги живлення статора, $\omega_{0e} = 2\pi f$.

За значеннями індуктивностей визначаються коефіцієнт магнітного зв'язку ротора (K_r) та коефіцієнт розсіювання за Блонделем (σ).

3.3 Програма досліджень

1. Для двигуна обраного з таблиці 3.1 за варіантом, розрахувати необхідні для моделювання параметри. Побудувати в MATLAB/Simulink структуру моделі АМ в загальній просторовій системі координат, пов'язаній зі статором в фазових координатах $i_s - \psi_r$.

2. Про моделювати процес прямого пуску двигуна при номінальних параметрах при $M_c = 0$. В результаті одержати процеси змінення проєкцій електричних координат стану (струмів та потокозчеплень статора і ротора) та їх модулів, процеси $\omega(t)$ і $M_e(t)$, побудувати фазовий портрет (ω, M_e).

3. Про моделювати процес номінального навантаження з режиму ідеального холостого ходу. Зафіксувати значення модулів потокозчеплень ротора та статора в номінальному режимі ($|\psi_r|_H, |\psi_s|_H$ до 3-го знаку), необхідні для розрахунків систем частотного керування.

4. Про моделювати процеси пуску при напрузі живлення зменшеній на 20%.

5. Про моделювати процеси пуску двигуна при симетричному змінненні параметрів обмоток:

– активного опору ротора $R_r = 3R_r$;

– активного опору статора $R_s = 3R_s$;

– індуктивності розсіювання статора $L_{\sigma 1} = 5L_{\sigma 1}$ (врахувати відповідне змінненя L_s і σ).

Впів змінненя кожного параметра враховувати окремо.

3.4 Дані асинхронних двигунів

В табл. 3.1 приводяться параметри асинхронних двигунів серії 4А. Для дослідження двигун обирається за варіантом.

Таблиця 3.1 – Параметри асинхронних двигунів*

№ вар	Тип	(n_0 , об/хв)	P_H , кВт	η_H , %	$\cos \varphi_H$
1	4A112M2Y3	3000	7,5	87,5	0,88
2	4A160S2Y3	3000	15	88,0	0,91
3	4A180S2Y3	3000	22	88,5	0,90
4	4A200M2Y3	3000	37	90,0	0,89
5	4A225M2Y3	3000	55	91,9	0,92
6	4A280S2Y3	3000	110	91,0	0,89
7	4A112M4Y3	1500	5,5	86,5	0,86
8	4A132M4Y3	1500	11	87,5	0,87
9	4A160M4Y3	1500	18,5	89,5	0,88
10	4A200L4Y3	1500	45	92,0	0,90
11	4A250S4Y3	1500	75	93,0	0,90
12	4A250M4Y3	1500	90	93,0	0,91
13	4A280S4Y3	1500	110	92,5	0,90
14	4A315S4Y3	1500	160	93,5	0,91
15	4A132S6Y3	1000	5,5	85,0	0,80
16	4A160S6Y3	1000	11	86,0	0,86
17	4A180M6Y3	1000	18,5	88,0	0,87
18	4A200L6Y3	1000	30	90,5	0,90
19	4A250S6Y3	1000	45	91,5	0,89
20	4A280S6Y3	1000	75	92,0	0,89
21	4A315S6Y3	1000	110	93,0	0,90
22	4A355S6Y3	1000	160	93,5	0,90
23	4A160S8Y3	750	7,5	86,0	0,75
24	4A180M8Y3	750	15	87,0	0,82
25	4A200L8Y3	750	22	88,6	0,84
26	4A250S8Y3	750	37	90,0	0,83
27	4A280S8Y3	750	55	92,0	0,84
28	4A315S8Y3	750	90	93,0	0,85
29	4A355S8Y3	750	132	93,5	0,85
30	4A250S10Y3	600	30	88,0	0,81
31	4A280M10Y3	600	45	91,5	0,78
32	4A315M10Y3	600	75	92,0	0,80

* для всіх двигунів $U_H = 380В$

Продовження таблиці 3.1

№ вар	$s_H, \%$	X_μ	R'_1	X'_1	R''_1	X''_1	$J_D,$ кгм ²
1	2,3	3,7	0,046	0,058	0,028	0,14	0,01
2	2,1	4,0	0,052	0,092	0,022	0,12	0,048
3	1,9	3,6	0,039	0,091	0,02	0,11	0,07
4	1,9	1,1	0,029	0,084	0,021	0,12	0,15
5	1,8	6,6	0,026	0,092	0,019	0,12	0,25
6	2,0	3,8	0,017	0,087	0,013	0,10	1,1
7	3,6	2,8	0,054	0,078	0,041	0,13	0,017
8	2,8	3,2	0,043	0,085	0,032	0,13	0,04
9	2,2	4,3	0,042	0,085	0,024	0,13	0,13
10	1,6	4,6	0,034	0,082	0,017	0,14	0,45
11	1,2	4,4	0,026	0,089	0,014	0,11	1,0
12	1,3	5,0	0,024	0,088	0,014	0,12	1,2
13	2,3	4,9	0,023	0,122	0,014	0,16	2,3
14	1,4	4,6	0,018	0,107	0,017	0,15	3,1
15	3,3	1,9	0,067	0,072	0,041	0,11	0,04
16	2,7	3,0	0,073	0,11	0,03	0,15	0,14
17	2,4	2,9	0,056	0,11	0,026	0,13	0,22
18	2,1	3,7	0,046	0,12	0,022	0,13	0,45
19	1,4	3,8	0,037	0,09	0,015	0,14	1,2
20	2,0	3,7	0,032	0,12	0,021	0,13	2,9
21	1,8	3,9	0,026	0,10	0,19	0,12	4,0
22	1,4	3,8	0,02	0,10	0,015	0,14	7,3
23	2,5	2,0	0,075	0,14	0,032	0,18	0,14
24	2,6	2,4	0,084	0,13	0,03	0,17	0,25
25	2,7	3,1	0,062	0,14	0,029	0,18	0,45
26	1,6	2,8	0,047	0,11	0,017	0,18	1,2
27	2,2	2,5	0,035	0,12	0,022	0,14	3,2
28	1,5	2,6	0,023	0,11	0,019	0,13	4,9
29	1,3	2,9	0,023	0,12	0,017	0,16	9,0
30	1,9	2,3	0,056	0,11	0,023	0,17	1,4
31	1,7	2,2	0,037	0,12	0,031	0,16	3,8
32	1,6	2,2	0,029	0,11	0,027	0,15	6,2

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

МОДЕЛЮВАННЯ ЯВНОПОЛЮСНОЇ СИНХРОННОЇ МАШИНИ

Мета роботи: Дослідження динаміки пуску явно полюсної синхронної машини (СМ) з демпферними обмотками. Дослідження процесів подачі збудження та накиду і зняття навантаження.

4.1 Теоретичні відомості

Для уникнення змінних коефіцієнтів, опис СМ доцільно розглянути в просторовій системі, пов'язаній з ротором (d, q). Процеси в статорі, для зменшення кількості рівнянь розглянемо в перетворених (ортогональних) просторових координатах.

Таким чином, рівняння електричної рівноваги явнополюсної машини з демпферними обмотками на роторі мають вид:

$$\begin{cases} U_d = i_d R_s + d\psi_d / dt - \omega_e \psi_q; \\ U_q = i_q R_s + d\psi_q / dt + \omega_e \psi_d; \\ U_f = i_f R_f + d\psi_f / dt; \\ 0 = i_{Dd} R_{Dd} + d\psi_{Dd} / dt; \\ 0 = i_{Dq} R_{Dq} + d\psi_{Dq} / dt, \end{cases} \quad (4.1)$$

де i – індекс d відноситься до обмотки статора по осі d

q – обмотки статора по осі q ;

f – обмотки збудження;

Dd, Dq – демпферних обмоток по осях d, q ;

R_s – активний опір обмоток статора;

R_s, R_f, R_{Dd}, R_{Dq} – величини активних опорів відповідно обмоток статора,

збудження та демпферної в осях d і q ;

ω_e – електрична швидкість обертання ротора, $\omega_e = z_p \omega$,

де z_p – кількість пар полюсів СМ;

Параметри обмоток ротора і струми в обмотках ротора (i_f, i_{Dd}, i_{Dq}) розглядаються приведеними до статора, тому потокозчеплення розраховуються за виразами:

$$\begin{aligned}\psi_d &= L_d i_d + M_{ad} i_f + M_{ad} i_{Dd}; \\ \psi_q &= L_q i_q + M_{aq} i_{Dq}; \\ \psi_f &= M_{ad} i_d + L_f i_f + M_{ad} i_{Dd}; \\ \psi_{Dd} &= M_{ad} i_d + M_{ad} i_f + L_{Dd} i_{Dd}; \\ \psi_{Dq} &= M_{aq} i_q + L_{Dq} i_{Dq},\end{aligned}\tag{4.2}$$

де L_d, L_q – повні індуктивності обмоток статора по осях d і q ,

$$L_d = M_{ad} + L_{1\sigma}; \quad L_q = M_{aq} + L_{1\sigma};$$

$L_{1\sigma}$ – індуктивність розсіяння обмоток статора;

L_f, L_{Dd}, L_{Dq} – індуктивності обмотки збудження та демпферної по повздовжній і поперечній осях відповідно,

$$L_f = M_{ad} + L_{f\sigma}; \quad L_{Dd} = M_{ad} + L_{Dd\sigma}; \quad L_{Dq} = M_{aq} + L_{Dq\sigma};$$

$L_{f\sigma}, L_{Dd\sigma}, L_{Dq\sigma}$ – індуктивності розсіяння відповідних обмоток;

M_{ad}, M_{aq} – взаємні індуктивності будь-якої пари контурів у повздовжній і поперечній осях СМ відповідно.

Вираз для електромагнітного моменту СМ

$$M_e = \frac{3}{2} z_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d).$$

З (4.1) одержуємо модель СМ у координатах стану « $\psi_s - \psi_r$ »:

$$\begin{cases} d\psi_d/dt = U_d - i_d r_s + \omega_e \psi_q; \\ d\psi_q/dt = U_q - i_q r_s - \omega_e \psi_d; \\ d\psi_f/dt = U_f - i_f r_f; \\ d\psi_{Dd}/dt = -i_{Dd} r_{Dd}; \\ d\psi_{Dq}/dt = -i_{Dq} r_{Dq}. \end{cases}\tag{4.3}$$

Струми в описі (4.3) виражаються через потокозчеплення з (4.2)

$$\begin{aligned}
 i_d &= \lambda_{dd}\Psi_d - \lambda_{df}\Psi_f - \lambda_{dDd}\Psi_{Dd} ; \\
 i_q &= \lambda_{qq}\Psi_q - \lambda_{qDq}\Psi_{Dq} ; \\
 i_f &= -\lambda_{fd}\Psi_d + \lambda_{ff}\Psi_f - \lambda_{fDd}\Psi_{Dd} ; \\
 i_{Dd} &= -\lambda_{Ddd}\Psi_d - \lambda_{Ddf}\Psi_f + \lambda_{DdDd}\Psi_{Dd} ; \\
 i_{Dq} &= -\lambda_{Dqq}\Psi_q + \lambda_{DqDq}\Psi_{Dq} ,
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

де

$$\begin{aligned}
 \lambda_{dd} &= \frac{L_f L_{Dd} - M_{ad}^2}{\Delta_1} ; \lambda_{df} = \frac{M_{ad} L_{Dd} - M_{ad}^2}{\Delta_1} ; \lambda_{dDd} = \frac{M_{ad} L_f - M_{ad}^2}{\Delta_1} ; \\
 \lambda_{qq} &= \frac{L_{Dq}}{\Delta_2} ; \lambda_{qDq} = \frac{M_{aq}}{\Delta_2} ; \\
 \lambda_{fd} &= \frac{M_{ad} L_{Dd} - M_{ad}^2}{\Delta_1} ; \lambda_{ff} = \frac{L_d L_{Dd} - M_{ad}^2}{\Delta_1} ; \lambda_{fDd} = \frac{M_{ad} L_d - M_{ad}^2}{\Delta_1} ; \\
 \lambda_{Ddd} &= \frac{M_{ad} L_f - M_{ad}^2}{\Delta_1} ; \lambda_{Ddf} = \frac{M_{ad} L_d - M_{ad}^2}{\Delta_1} ; \lambda_{DdDd} = \frac{L_d L_f - M_{ad}^2}{\Delta_1} ; \\
 \lambda_{Dqq} &= \frac{M_{aq}}{\Delta_2} ; \lambda_{DqDq} = \frac{L_q}{\Delta_2} ; \\
 \Delta_1 &= L_d L_f L_{Dd} + 2M_{ad}^3 - M_{ad}^2 (L_d + L_f + L_{Dd}) ; \Delta_2 = L_q L_{Dq} - M_{ad}^2 .
 \end{aligned}$$

Рівняння (4.3), (4.4), доповнені рівнянням руху

$$M_e - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \tag{4.5}$$

складають опис СМ, за яким будується структура моделі.

Складові напруг статора

$$\begin{aligned}
 U_d &= U_{sm} \sin \gamma ; \\
 U_q &= -U_{sm} \cos \gamma ,
 \end{aligned}$$

де U_{sm} – максимальне значення фазної напруги статора;

γ – різниця кутових положень узагальненого вектора напруги та ротора, які обертаються у просторі зі швидкостями $\omega_{0e} = 2\pi f$ та ω_e відповідно,

$$\gamma = \theta_{0e} - \theta_e = \int \omega_{0e} dt - \int \omega_e dt = \int (\omega_{0e} - \omega_e) dt .$$

В Simulink модель СМ доцільно представляти, згорнувши в підсистему вхідними координатами $\epsilon (U_d, U_q, U_f, M_c)$ а вихідними – всі струми і потокозчеплення, електромагнітний момент M_e , швидкість ω , електричний кут повороту ротора θ_e . Структурно опис (4.3) – (4.5) краще представляти з явним розрахунком струмів. Один з варіантів структури опису СМ наведено на рисунку 4.1. Для зменшення кількості ліній-зв'язків має сенс використовувати блоки Goto і From.

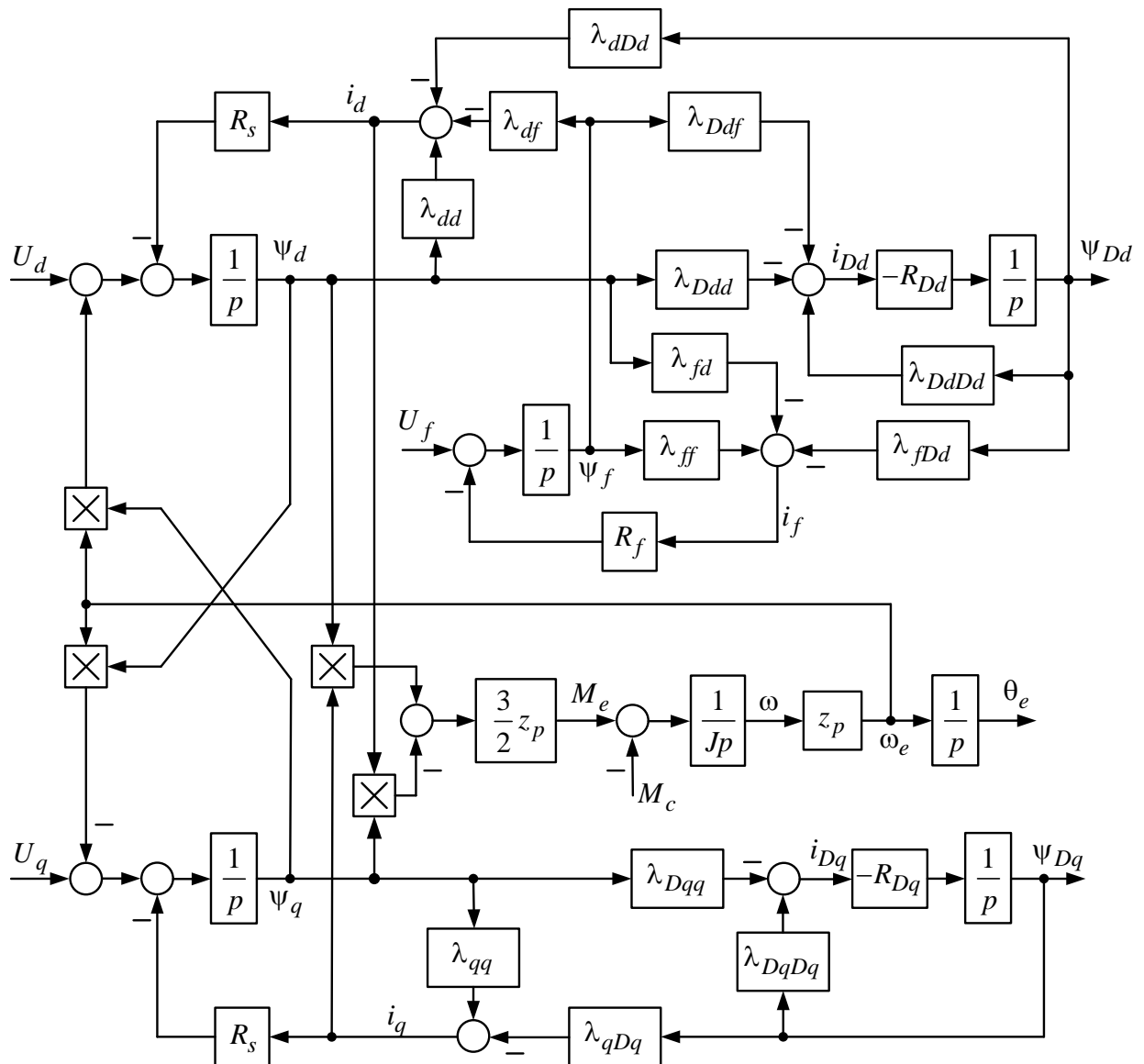


Рисунок 4.1 – Структура моделі СМ з демпферними обмотками

4.2 Розрахунок параметрів моделі

У якості вихідних даних СМ в табл. 4.1 задані:

- номінальна лінійна напруга статора U_n ;
- номінальна потужність P_n ;
- синхронна швидкість обертання ротора n_c та відповідне їй число пар полюсів z_p ;
- номінальний $\cos \varphi_n$ та ККД (η_n) ;
- індуктивні та активні опори обмоток у відносних одиницях.

Для двигуна, обраного за номером варіанта, розраховуємо:

номінальний струм статора

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n \eta_n} ;$$

номінальне та амплітудне значення фазної напруги статора

$$U_{\phi n} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}, U_{sm} = \sqrt{2} U_{\phi n} ;$$

номінальний опір

$$z_n = \frac{U_{\phi n}}{I_n} = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} .$$

Знаючи z_n , розраховуємо активні опори обмоток (R_s, R_f, R_{Dd}, R_{Dq}) у розмірних одиницях за загальною формулою

$$R = r^* \cdot z_n .$$

Розраховуємо індуктивні опори у розмірних одиницях:

$$x_{ad} = x_{ad}^* \cdot z_n ; x_{aq} = x_{aq}^* \cdot z_n ;$$

$$x_d = (x_{ad}^* + x_{1\sigma}^*) \cdot z_n ; x_q = (x_{aq}^* + x_{1\sigma}^*) \cdot z_n ;$$

$$x_{Dd} = (x_{ad}^* + x_{Dd\sigma}^*) \cdot z_n ; x_{Dq} = (x_{aq}^* + x_{Dq\sigma}^*) \cdot z_n ;$$

$$x_f = (x_{ad}^* + x_{f\sigma}^*) \cdot z_n$$

і відповідні індуктивності:

$$M_{ad} = \frac{x_{ad}}{\omega_{0e}}; M_{aq} = \frac{x_{aq}}{\omega_{0e}}; L_d = \frac{x_d}{\omega_{0e}}; L_q = \frac{x_q}{\omega_{0e}};$$

$$L_{Dd} = \frac{x_{Dd}}{\omega_{0e}}; L_{Dq} = \frac{x_{Dq}}{\omega_{0e}}; L_f = \frac{x_f}{\omega_{0e}},$$

де ω_{0e} – електрична швидкість обертання поля статора,

$$\omega_{0e} = 2\pi f = 314,15 \text{ с}^{-1}.$$

Використовуючи значення повних та взаємних індуктивностей обмоток, розрахувати коефіцієнти λ_{ij} за (4.4).

Синхронна механічна швидкість:

$$\omega_0 = \omega_c = \frac{\pi n_c}{30}.$$

Номінальний момент

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_0}.$$

Номінальна е.р.с. двигуна

$$E_{0n} \cong \frac{2}{3} \cdot \frac{M_n \omega_0 x_d}{U_{fn}}.$$

Номінальний струм збудження (приведений до статора)

$$I_{fn} = \frac{E_{0n} \sqrt{2}}{x_{ad}}.$$

Номінальна напруга збудження (приведена до статора)

$$U_{fn} = I_{fn} \cdot R_f.$$

Наголошуємо що одержані значення параметрів та координат стану в номінальному режимі є приведеними до статора.

Розрахунок параметрів слід реалізувати у вигляді m-файла в MATLAB. Букву λ можна замінити, наприклад, на A.

4.3 Програма досліджень

Реалізувати модель СМ в MATLAB/Simulink. Одержати процеси модулів струмів і потокозчеплень, моменту і швидкості та побудувати фазові портрети (ω, M_e) для наступних режимів:

- 1) прямий пуск з $U_f = 0$ і $R_f = 10R_f$ при $M_c = 0$;
- 2) прямий пуск з $U_f = 0$ і без додаткових опорів в ланцюзі обмотки збудження при $M_c = 0$;
- 3) подача номінального збудження при підсинхронній швидкості процес втягування в синхронізм;
- 4) накид і зняття номінального навантаження.

Рекомендація: процеси за пунктами 2 – 4 слід одержувати за один прийом моделювання, сформувавши подачу сигналів U_f та M_c у відповідні моменту часу.

4.5 Параметри синхронних двигунів

В таблиці 4.1 наведені номінальні параметри синхронних двигунів та значення опорів обмоток у відносних одиницях.

Таблиця 4.1 – Параметри синхронних двигунів*

№ вар	U_n , кВ	P_n , кВт	n_n , об/хв	η_n , %	R_s^*	R_f^*	R_{Dd}^*	R_{Dq}^*
1	10	800	250	91,3	0,0037	0,0081	0,0139	0,0084
2	10	1000	250	92,1	0,0038	0,0090	0,0139	0,0084
3	10	1250	300	93,3	0,0046	0,0118	0,0212	0,0129
4	10	1600	300	93,6	0,0039	0,0097	0,0164	0,0100
5	10	2000	375	93,4	0,0039	0,0106	0,0186	0,0113
6	10	2500	375	94,1	0,0040	0,0093	0,0141	0,0086
7	10	3200	500	94,1	0,0035	0,0086	0,0130	0,0079
8	10	4000	500	93,8	0,0049	0,0112	0,0194	0,0118
9	10	5000	600	94,2	0,0047	0,0128	0,0205	0,0124
10	10	8000	600	94,3	0,0040	0,0118	0,0188	0,0114
11	6	530	300	91,5	0,0096	0,0228	0,0352	0,0213
12	6	800	300	91,8	0,0088	0,0180	0,0278	0,0169
13	6	800	375	92,1	0,0099	0,0232	0,0382	0,0231
14	6	1000	500	92,5	0,0079	0,0224	0,0340	0,0206
15	6	1250	500	93,2	0,0075	0,0156	0,0259	0,0157
16	6	1250	600	93,6	0,0069	0,0148	0,0245	0,0149
17	6	1600	600	93,9	0,0063	0,0136	0,0203	0,0123
18	6	1600	750	94,1	0,0088	0,0186	0,0322	0,0195
19	6	2000	750	94,3	0,0063	0,0128	0,0211	0,0128
20	6	2000	1000	94,4	0,0076	0,0166	0,0261	0,0158
21	6	2500	1000	95,5	0,0092	0,0240	0,0402	0,0243
22	3	400	300	92,3	0,0113	0,0277	0,0462	0,0280
23	3	400	375	92,0	0,0131	0,0361	0,0549	0,0333
24	3	500	375	93,1	0,0169	0,0498	0,0850	0,0515
25	3	500	500	93,2	0,0121	0,0353	0,0565	0,0343
26	3	530	500	93,7	0,0155	0,0418	0,0664	0,0403
27	3	530	600	93,9	0,0158	0,0382	0,0672	0,0407
28	3	630	600	94,1	0,0118	0,0253	0,0401	0,0243
29	3	630	750	94,2	0,0165	0,0439	0,0668	0,0405
30	3	800	750	93,9	0,0168	0,0471	0,0771	0,0467
31	3	800	1000	94,2	0,0156	0,0348	0,0574	0,0348
32	3	850	1000	93,3	0,0105	0,0280	0,0462	0,0280

* для всіх двигунів $\cos\varphi_n = 0,9$ (випереджаючий)

Продовження таблиці 4.1

№ вар	x_{ad}^*	x_{aq}^*	$x_{1\sigma}^*$	$x_{Dd\sigma}^*$	$x_{Dq\sigma}^*$	$x_{f\sigma}^*$	Д, ТМ ²
1	1,224	0,807	0,0688	0,0786	0,0588	0,194	3,8
2	1,108	0,723	0,0858	0,0998	0,0747	0,134	5
3	1,107	0,731	0,0858	0,0958	0,0718	0,179	6,3
4	1,328	0,734	0,0629	0,0726	0,0544	0,170	8,4
5	1,285	0,849	0,0842	0,0961	0,0720	0,196	10,5
6	1,319	0,788	0,0565	0,0662	0,0496	0,145	13,5
7	1,329	0,826	0,0562	0,0628	0,0471	0,199	17,2
8	1,141	0,779	0,0564	0,0660	0,0495	0,137	22
9	1,232	0,744	0,0712	0,0796	0,0596	0,111	27,6
10	1,203	0,755	0,0651	0,0747	0,0560	0,132	45,6
11	1,346	0,908	0,0725	0,0817	0,0612	0,190	1,98
12	1,340	0,814	0,0859	0,0978	0,0732	0,166	3,6
13	1,322	0,728	0,0587	0,0664	0,0497	0,116	3,3
14	1,319	0,870	0,0712	0,0830	0,0622	0,159	4
15	1,172	0,783	0,0776	0,0866	0,0649	0,210	5,5
16	1,245	0,711	0,0775	0,0895	0,0671	0,130	5,1
17	1,319	0,908	0,0822	0,0934	0,0700	0,197	7,2
18	1,134	0,782	0,0768	0,0882	0,0661	0,173	6,6
19	1,345	0,919	0,0580	0,0676	0,0506	0,122	9
20	1,212	0,758	0,0572	0,0654	0,0490	0,201	8
21	1,200	0,669	0,0719	0,0804	0,0602	0,171	11
22	1,179	0,817	0,0682	0,0779	0,0583	0,165	1,2
23	1,197	0,764	0,0877	0,0991	0,0742	0,187	0,9
24	1,185	0,724	0,0531	0,0601	0,0450	0,133	1,5
25	1,257	0,698	0,0741	0,0845	0,0633	0,178	1
26	1,210	0,834	0,0842	0,0988	0,0740	0,172	1,18
27	1,347	0,797	0,0702	0,0820	0,0614	0,155	0,78
28	1,266	0,754	0,0621	0,0724	0,0542	0,152	1,38
29	1,206	0,741	0,0780	0,0874	0,0655	0,172	0,78
30	1,188	0,781	0,0772	0,0885	0,0663	0,155	1,8
31	1,268	0,825	0,0650	0,0736	0,0552	0,200	0,8
32	1,281	0,862	0,0824	0,0924	0,0692	0,200	1,1

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Гаєв Є.О., Нестеренко Б.М. Універсальний математичний пакет MATLAB і типові задачі обчислювальної математики. Навчальний посібник.– К.: НАУ, 2004. – 176 с.
2. Ільїн С.П. Варіаційне обчислення із застосуванням MATLAB. – Харків: ХП, 2001. – 107 с.
3. Лазарєв Ю.Ф. Початки програмування в середовищі MATLAB. Навч. посібник. – К.: "Політехніка", 2000. – 396 с.
4. Проведення математичних розрахунків із використанням системи MATLAB. Метод. посібник. – Харків: НТУ "ХП", 2001. – 56 с.
5. Вірченко Н.О., Ляшко І.І. Графіки елементарних та спеціальних функцій. – К.: Наук. думка, 1996. – 582 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

з дисциплін

«МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ»

«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ЕЛЕКТРОПРИВОД»

Частина I

(для здобувачів вищої освіти спеціальностей G3 Електрична інженерія,
G16 Гірництво та газонафтові технології)

(електронне видання)

Укладачі:

Є. С. РУДНЄВ

Ю. А. РОМАНЧЕНКО

М. О. МОРНЕВА

Оригінал-макет *Ю.А. Романченко*

Підписано до друку _____ 2025.

Формат 60x84 ¹/₁₆. Папір типогр. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. ____ . Обл.-вид. арк. ____ .

Тираж ____ екз. Вид. № ____ . Замов. № ____ . Ціна договірна.

**Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля**

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса видавництва: 01042, м. Київ, вул. Іоанна Павла II, 17

адреса електронної пошти uni@snu.edu.ua,

офіційний web-сайт <https://snu.edu.ua>

E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com