

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт
з дисципліни
"Мікроелектромеханіка"

для студентів спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітня програма
«Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної
техніки»)
усіх форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Мікроелектромеханіка" для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (освітня програма «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Огренич Є.В., Поспеева І.Є. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 45 с.

Укладачі : Огренич Євген Вікторович, к.т. н., ст. викл.,
 Поспеева Ірина Євгенівна, ст.викл.

Рецензент: Пирожок Андрій Володимирович, канд. техн. наук,
 доцент

Відповідальний за випуск: Шило Галина Миколаївна, д.т.н., доцент,
зав. каф. ІТЕЗ

Затверджено
на засіданні кафедри ІТЕЗ
протокол № 6 від 01.02.19 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
протокол № 7 від 21.03.19 р.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	5
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТИПОВИХ ЛІНІЙНИХ ЛАНОК СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	6
1.1 Завдання до роботи	6
1.2 Зміст звіту	8
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАДАВАЧА ІНТЕНСИВНОСТІ	9
2.1 Теоретичні відомості.....	9
2.2 Завдання до роботи	10
2.3 Зміст звіту	12
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЛІНІЙНИХ ЛАНЦЮГАХ ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПРИ ФОРСУВАННІ	13
3.1 Теоретичні відомості.....	13
3.2 Завдання до роботи	14
3.3 Зміст звіту	16
4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЛАНЦЮГАХ ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З УРАХУВАННЯМ НАСИЧЕННЯ	17
4.1 Теоретичні відомості.....	17
4.2 Завдання до роботи	20
4.3 Зміст звіту	21
5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ОДНОЗОНОВОМУ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ	22
5.1 Теоретичні відомості.....	22
5.2 Завдання до роботи	23
5.3 Зміст звіту	25
6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ДВОЗОНОВОМУ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ	26
6.1 Теоретичні відомості.....	26
6.2 Завдання до роботи	27
6.3 Зміст звіту	28
7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7. МОДЕЛЮВАННЯ ДВОМАСОВИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ (ДПС НЗ) В СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK ПАКЕТУ MATLAB	29

7.1 Теоретичні відомості.....	29
7.1.1 Диференційні рівняння електромеханічної системи.....	29
7.1.2 Узагальнені параметри двомасової пружної електромеханічної системи.....	34
7.2 Завдання до роботи	35
7.3 Порядок виконання роботи	35
7.3.1 Підготовка до виконання лабораторної роботи.....	35
7.3.2 Експериментальна частина.....	37
7.4 Зміст звіту	38
7.5 Контрольні запитання	39
ЛІТЕРАТУРА	40
Додаток А.....	42

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Дослідження властивостей елементів автоматизованого електроприводу за допомогою методів цифрового моделювання є абсолютно необхідним етапом при розробці і проектуванні.

У даних методичних вказівках дається програма проведення, цілі і завдання досліджень на цифровій моделі для кожного розглянутого елемента електроприводу. Для кожного досліджуваного об'єкта передбачено як мінімум по 12 варіантів параметрів.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТИПОВИХ ЛІНІЙНИХ ЛАНОК СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

1.1 Завдання до роботи

У даній роботі повинно отримати криві перехідних процесів на виходах $U_{\text{вих}}(t)$ наступних ланок:

а) інтегруючої з передавальної функцією

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1 \cdot p} ;$$

б) інерційної або аперіодичної з передавальної функцією

$$W_2(p) = \frac{K}{T_2 \cdot p + 1} ;$$

в) пропорційно-інтегруючої з передавальної функцією

$$W_3(p) = \frac{T_3 \cdot p + 1}{T_2 \cdot p} ;$$

г) реально диференційною з передавальної функцією

$$W_4(p) = \frac{T_1 \cdot p}{T_2 \cdot p + 1} .$$

Напруги на виходах досліджуваних ланок повинно отримати для двох основних режимів вхідних впливів:

- стрибкоподібне змінення (*Step_2t*) (рис.1.1, а);
- лінійний закон зміни (*Step_4t*) (рис.1.1, б).

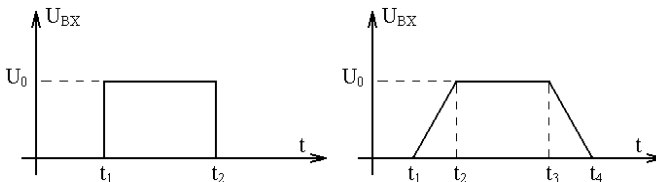


Рисунок 1.1 - Режими вхідних впливів

Параметри ланок наведені в табл. 1.1. Параметри вхідних сигналів за варіантами представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.1 - Параметри ланок

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
пар.												
K	2	3	6	7	9	11	13	15	17	19	20	22
T₁	1	1.5	1.7	2.0	2.5	3.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
T₂	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.3
T₃	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	0.8	0.6	0.4	0.2	0.35	0.45

Таблиця 1.2 - Параметри вхідних сигналів за варіантами

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
пар.												
U₀	5	7	9	13	15	14	12	10	8	6	4	2
t₁	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
t₂	7	11	15	9	13	10	8	12	7	16	17	17
t₃	10	15	20	11	17	13	14	15	11	19	20	19
t₄	12	18	23	14	19	17	16	19	13	24	23	20

Для кожної досліджуваної ланки необхідно отримати залежності $U_{\text{вх}}(t)$ і $U_{\text{вих}}(t)$ для двох видів вхідних впливів як на екрані дисплея, так і на папері за допомогою принтера. При необхідності реєстрації на одному графіку як $U_{\text{вх}}(t)$, так і $U_{\text{вих}}(t)$ можливе введення масштабів з використанням пропорційної ланки.

1.2 Зміст звіту

У звіті до лабораторної роботи за результатами моделювання встановити, як залежать величина і характер зміни $U_{\text{вих}}(t)$ від:

- характеру зміни вхідного сигналу $U_{\text{вх}}(t)$ (величини стрибка, усталеного значення, темпів наростання, спадання);
- параметрів досліджуваної ланки (K_i , T_i).

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАДАВАЧА ІНТЕНСИВНОСТІ

2.1 Теоретичні відомості

Задавач інтенсивності (ЗІ), застосовуваний широко в сучасних САР електроприводу, забезпечує перетворення швидкоплинної вхідної напруги в вихідна напруга, що змінюється з заданим темпом. Якщо темп зміни вхідного напруги нижче, ніж заданий темп зміни вихідної напруги, то вихідна напруга повторює за формою вхідна напруга.

Структурна схема задавача інтенсивності представлена на рис. 2.1.

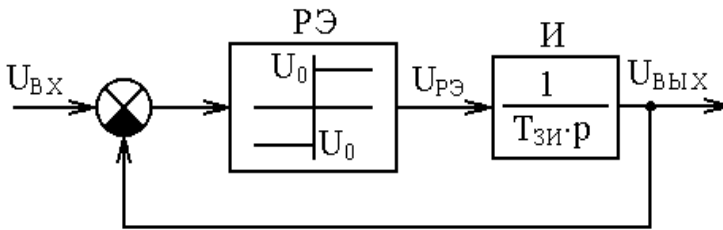


Рисунок 2.1 - Структурна схема задавача інтенсивності

У режимі відпрацювання заданого темпу вихідна напруга змінюється за такою залежністю (релейний елемент РЕ не насичений):

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{U_0}{T_{\text{ЗИ}}} t.$$

Таким чином темп зміни вихідної напруги можна регулювати або зміною напруги обмеження релейного елемента РЕ – U_0 , або - постійної інтегрування інтегратора И – $T_{\text{ЗИ}}$.

Час наростання вихідної напруги до рівня вхідного можна визначити за формулою:

$$t_H = \frac{U_{BX}}{U_0} T_{ЗИ}.$$

Моделювання процесів в ЗІ на основі цифрової моделі доцільність-різному здійснювати методами Рунге-Кутта або Ейлера з постійним кроком інтегрування, оскільки реалізація ідеального релейного елемента методами Фельдберг і Кутта-Мерсон з автоматичним вибором кроку інтегрування дають значні похибки. Рекомендується без великих похибок в розрахунках характеристику релейного елемента реалізувати в наступному наближеному вигляді (рис. 2.2).

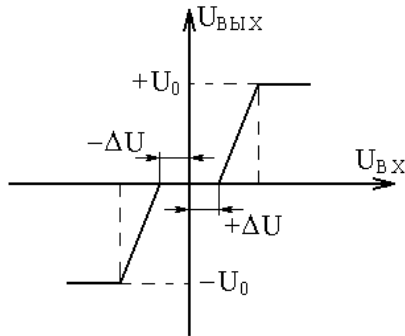


Рисунок 2.2 - Характеристика релейного элемент

При цьому величина зони нечутливості в статичній характеристиці $\pm \Delta U \geq h$, де h – крок інтегрування. Коефіцієнт посилення на лінійній частині характеристики $K = 200 \div 500$.

2.2 Завдання до роботи

Властивості ЗІ досліджуються при двох типах вхідних впливів:

- ступінчастий сигнал (*Step_3t*) (рис. 2.3, а);
- напруга, що лінійно змінюється (*Step_4t*) (рис. 2.3, б).

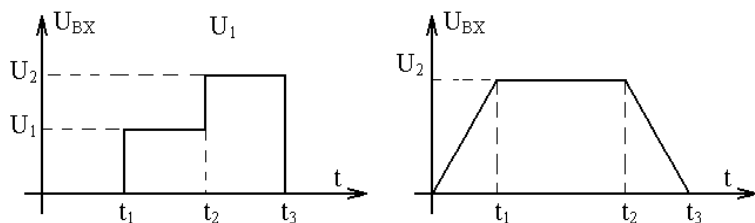


Рисунок 2.3 - Режими входних впливів

Параметри ЗІ за варіантами наведені в табл. 2.1. Параметри входних впливів за варіантами наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.1 - Параметри ЗІ

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
пар.												
$U_0, В$	10	12	14	16	15	16	17	18	10	12	11	14
$T_{зв}, с$	0.5	0.6	0.4	0.3	0.7	0.5	0.8	0.6	0.7	0.5	0.4	0.6

Таблиця 2.2 - Параметри входних сигналів за варіантами

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
пар.												
$U_1, В$	5	7	10	12	15	17	15	13	10	8	6	7
$U_2, В$	10	15	20	25	30	35	30	25	20	15	10	13
$t_1, с$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.6	0.9	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
$t_2, с$	1.2	2.0	3.2	3.5	4.0	5.0	3.6	2.7	2.6	1.7	1.1	1.2
$t_3, с$	2.0	3.3	5.0	5.5	6.5	8.5	6.0	5.0	4.5	3.0	2.5	2.2

2.3 Зміст звіту

2.3.1 Представити криві перехідних процесів $U_{BX}(t)$, $U_{PЭ}(t)$, $U_{ВИХ}(t)$ при заданих для даного варіанту параметрах ЗІ і двох режимах зміни вхідної напруги.

2.3.2 Дати оцінку впливу на властивості ЗІ параметрів U_0 и $T_{ЗІ}$.

2.3.3 Проаналізувати отримані результати і зробити висновки за ними.

З ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЛІНІЙНИХ ЛАНЦЮГАХ ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПРИ ФОРСУВАННІ

3.1 Теоретичні відомості

Ланцюг збудження електричних машин, якщо знехтувати нелінійністю кривої намагнічування, потоками розсіювання і вихрових струмів, описується диференціальним рівнянням:

$$U_B = I_B \cdot R_B + L_B \frac{dI_B}{dt_B} \quad (3.1)$$

Він може бути представлений аперіодичною або інерційною ланкою виду:

$$W(p) = \frac{I_B(p)}{U_B(p)} = \frac{1/R_B}{T_B \cdot p + 1}.$$

де: R_B , L_B – відповідно опір та індуктивність;

T_B – електромагнітна стала часу ланцюга збудження.

Для великий електричних машин $T_B = (1 \div 5)$ с, тому при включенні обмотки збудження на номінальну напругу тривалість наростання струму збудження $t_H = (3 \div 4) T_B$ і складає від 3 до 20 с.

Для скорочення тривалості наростання струму збудження застосовується форсоване збудження, суть якого полягає в тому, що на період наростання струму до номінального значення до обмотки збудження прикладається напруга αU_{BH} , де α – коефіцієнт форсування (рис. 3.1).

Структурна схема моделі з дослідження процесів в обмотках збудження може бути представлена у вигляді, представленому на рис. 3.2.

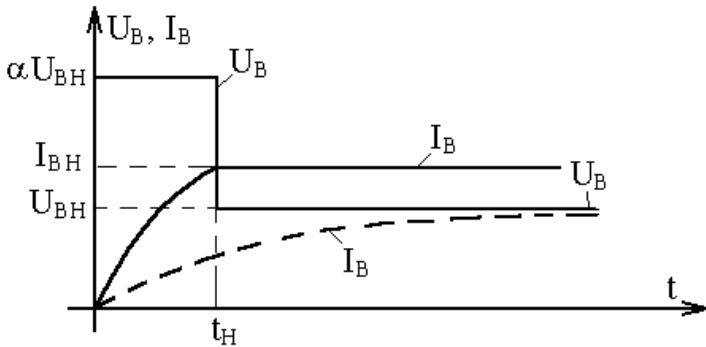


Рисунок 3.1 - Залежності струму та напруги збудження від часу

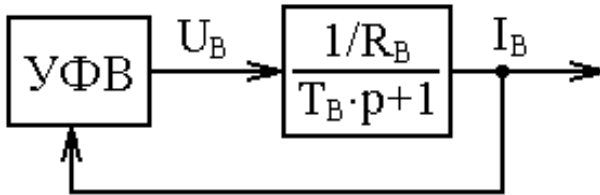


Рисунок 3.2 - Структурна схема моделі з дослідження процесів в обмотках збудження

Пристрій для форсування збудження (УФВ) (модель-UFW) забезпечує зміну $U_B(t)$, що відповідає рис. 3.1.

У програмі УФВ може бути реалізований або на блоці нелінійності загального вигляду, або за допомогою схем порівняння і нелінійних елементів або ключів.

3.2 Завдання до роботи

Параметри досліджуваного ланцюга збудження за варіантами наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Параметри досліджуваного ланцюга збудження за варіантами

Номер ВАРІАНТА парам.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I_{BH}, A	22	23	24	27	30	35	33	31	29	26	23	21
R_B, Ω	10	9.5	9.16	8.15	7.33	6.28	6.66	7.09	7.58	8.46	9.56	10.5
T_B, c	3	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5

Відповідно до рівняння (3.1) можна отримати залежність $U_B = f(t)$, що забезпечує лінійний закон наростання і спадання струму збудження електричних машин за заданий час (рис. 3.3).

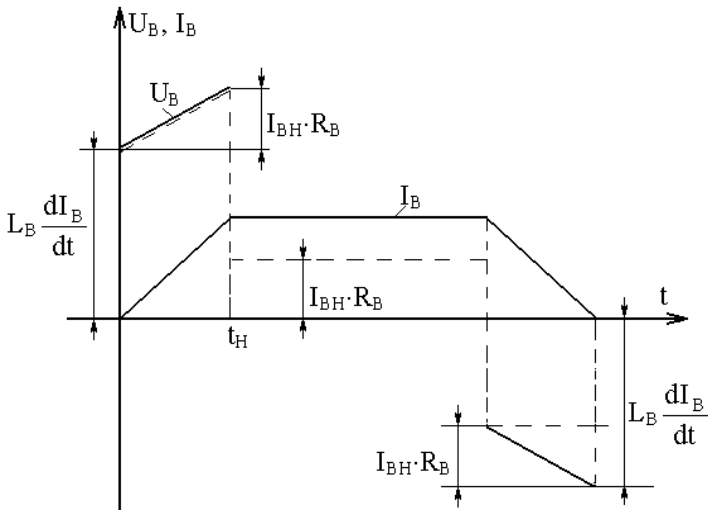


Рисунок 3.3 - Закон наростання і спадання струму збудження електричних машин за заданий час

3.3 Зміст звіту

3.3.1 Отримати криві перехідних процесів $U_B = f(t)$, $I_B = f(t)$ при коефіцієнті форсування $\alpha = 3$ (рис.3.1).

3.3.2 Отримати залежність тривалості наростання струму збудження від коефіцієнта форсування ($t_H = f(\alpha)$, $\alpha = 1 \div 5$) (рис.3.1).

3.3.3 Враховуючи, що $\frac{dI_B}{dt} = \frac{I_{BH}}{t_H}$, розрахувати та реалізувати необхідний закон $U_B(t)$ при $t_H = 1$ с (рис.3.3).

3.3.4 Проаналізувати отримані результати і зробити висновки.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЛАНЦЮГАХ ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З УРАХУВАННЯМ НАСИЧЕННЯ

4.1 Теоретичні відомості

Процеси в ланцюзі збудження електричних машини без урахування впливу реакції якоря, потоків розсіювання і вихрових струмів можна описати наступними диференціальними рівняннями:

$$U_B = I_B \cdot R_B + W_B \frac{d\Phi_B}{dt}; \quad (4.1)$$

$$\Phi_B = f(I_B), \quad (4.2)$$

де U_B, I_B – відповідно напруга і струм збудження;
 R_B – сумарний опір ланцюга збудження з урахуванням силового ланцюга збудника;
 W_B – сумарне число витків обмотки збудження;
 Φ_B – потік збудження;
 $f(I_B)$ – нелінійна залежність, яка не має аналітичного виразу, звана кривою намагнічування електричної машини.

На рис. 4.1, (крива 1) приведена узагальнена крива намагнічування двигуна у відносних одиницях.

Введемо оператор диференціювання в рівняння (4.1):

$$U_B = I_B \cdot R_B + W_B \cdot \Phi_B \cdot p. \quad (4.3)$$

Звідки:

$$\Phi_B = \frac{R_B}{W_B \cdot p} \left(\frac{U_B}{R_B} - I_B \right) \quad (4.4)$$

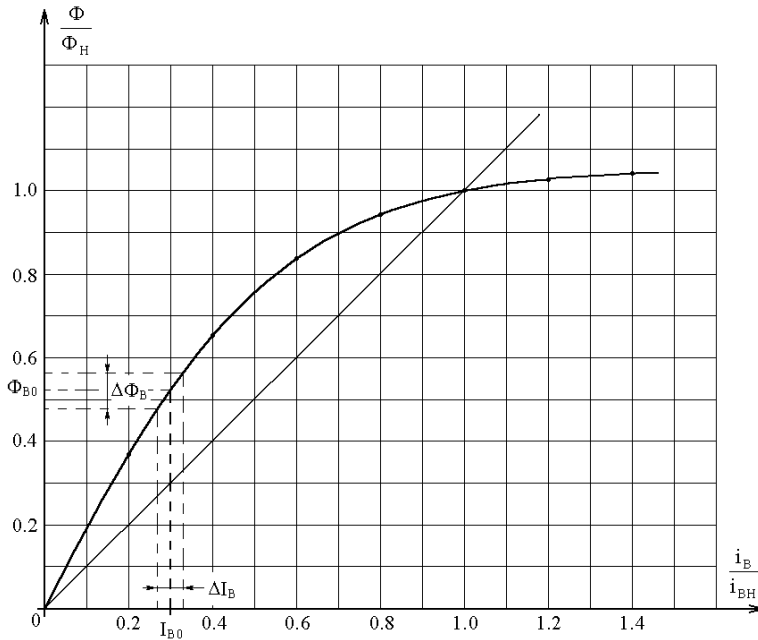


Рисунок 4.1 - Крива намагнічування двигуна

Перетворимо вираз поза дужками в (4.4) до вигляду:

$$\frac{R_B}{W_B \cdot p} = \frac{R_B \cdot \Phi_{BH} \cdot I_{BH}}{W_B \cdot \Phi_{BH} \cdot I_{BH} \cdot p} = \frac{K_{BH}}{T_{BH} \cdot p},$$

$$\text{Де: } K_{BH} = \frac{\Phi_{BH}}{I_{BH}} \text{ та } T_{BH} = \frac{W_B \cdot \Phi_{BH}}{I_{BH} \cdot R_B}.$$

Відповідно коефіцієнт і електромагнітна стала часу ланцюга збудження електричної машини для спрямленої характеристики намагнічування наведені на рис. 4.1 (пряма 2).

Тоді вираз (4.2) перетвориться до виду:

$$\Phi_B = \frac{K_{BH}}{T_{BH} \cdot p} \left(\frac{U_B}{R_B} - I_B \right). \quad (4.5)$$

На основі (4.5) і зворотної кривої намагнічування $I_B = f_1(\Phi_B)$ нелінійний ланцюг збудження може бути представлений структурною схемою виду (рис.4.2).

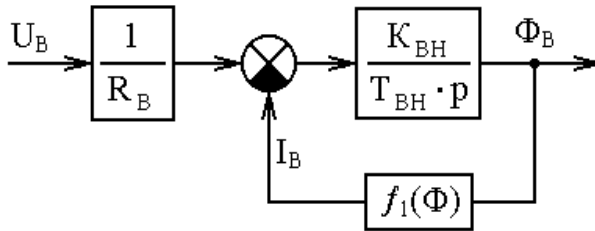


Рисунок 4.2 - Структурна схема нелінійного ланцюга збудження

Якщо провести лінійну апроксимацію кривої намагнічування для будь-якого конкретного значення потоку Φ_{B0} , то структурна схема на рис. 4.2 може бути перетворена до виду (рис. 4.3).

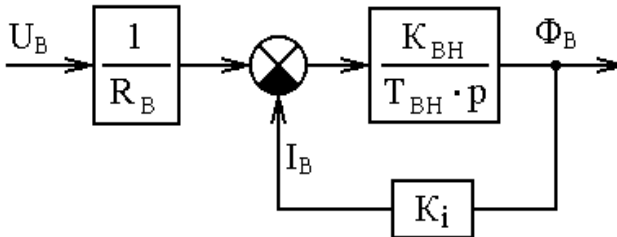


Рисунок 4.3 - Структурна схема нелінійного ланцюга збудження з урахуванням лінійної апроксимації кривої намагнічування

Тут $K_i = \frac{\Delta I_B}{\Delta \Phi_B}$, причому ΔI_B и $\Delta \Phi_B$ - відносно невеликі

збільшення струму і потоку збудження, отримані за кривою намагнічування поблизу апроксимуючої точки I_{B0} (див. рис. 4.1).

Після еквівалентних перетворень структурна схема на рис. 4.3 може бути представлена на рис. 4.4.

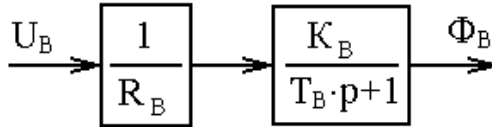


Рисунок 4.4 - Еквівалентна структурна схема нелінійного ланцюга збудження

Тут $K_B = \frac{1}{K_i}$ та $T_B = \frac{T_{BH}}{K_{BH} \cdot K_i}$ - відповідно коефіцієнт і

електромагнітна стала часу ланцюга збудження для обраної точки апроксимації. Очевидно, що в міру зростання струму збудження зростає і величина коефіцієнта K_i , а це, в свою чергу, зменшує значення K_B та T_B в міру насичення магнітної системи електричної машини.

4.2 Завдання до роботи

Параметри досліджуваного ланцюга збудження за варіантами наведені в таблиці 4.1.

Увага! До того, як приступити до виконання лабораторної роботи, необхідно розрахувати реальну криву намагнічування двигуна для свого варіанту, використовуючи для цього рис. 4.1 і номінальні дані з таблиці 4.1.

Після цього розрахувати параметри і реалізувати цифрову модель відповідно до структурної схеми на рис. 4.2.

Таблиця 4.1 - Параметри досліджуваного ланцюга збудження за варіантами

Номер ВАРІАНТА	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
$\Phi_H, \text{В}\cdot\text{с}$	0.146	0.2	0.11	0.12	0.16	0.18	0.22	0.2	0.18	0.16	0.14	0.12
$I_{BH}, \text{А}$	22	23	24	27	30	35	33	31	29	26	23	21
$R_B, \text{Ом}$	10	9.5	9.1	8.15	7.33	6.28	6.66	7.09	7.58	8.46	9.56	10.5
$T_{BH}, \text{с}$	3	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5

4.3 Зміст звіту

4.3.1 Проаналізувати перехідні процеси у ланцюгу збудження, що обумовлені зміною напруги збудження $\Delta U_B = +0,1U_{BH}$ за умови, що до обмотки збудження вже прикладена напруга $U_{B0} = 0,3U_{BH}, 0.6U_{BH}$ та $0.9U_{BH}$.

Для того, щоб виключити перехідні процеси, пов'язані з тим, що до обмотки збудження прикладена початкова напруга U_{B0} , необхідно у інтегруючій ланці на моделі задати початкове значення потоку збудження, розраховане для цього режиму з урахуванням кривої намагнічування;

4.3.2 Для кожного режиму розрахувати значення K_B та T_B , порівняти перехідні процеси в моделях, побудованих згідно рис.4.3 і рис.4.4 для кожного режиму;

4.3.3 Побудувати залежності K_B та T_B від величини $\frac{U_{B0}}{U_{BH}}$;

4.4.4 Зробити висновки за отриманими результатами.

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ОДНОЗОНОВОМУ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ

5.1 Теоретичні відомості

Структурна схема двигуна постійного струму при постійному потоці збудження найчастіше представляється у вигляді, зображеному на рис. 5.1.

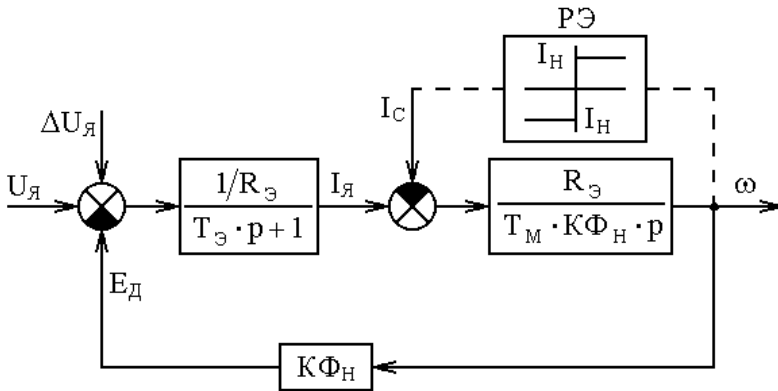


Рисунок 5.1 - Структурна схема двигуна постійного струму при постійному потоці збудження

Тут R_e , T_e – еквівалентні опір та стала часу якірного ланцюга двигуна;

$K\Phi_H$ – коефіцієнт двигуна;

$T_m = J_\Sigma \frac{R_e}{(K\Phi_H)^2}$ – електромеханічна стала часу електроприводу,

J_Σ – сумарний момент інерції електроприводу.

5.2 Завдання до роботи

Вихідні параметри за структурною схемою для кожного варіанту наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Вихідні параметри за структурною схемою по рис. 5.1 за варіантами

Номер ВАРІАНТА	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
парам.												
U_H, B	220	220	220	220	220	220	440	440	440	440	440	440
$K_{ФН}, B \cdot c$	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2
R_e, Ω	1.1	0.73	0.55	0.44	0.36	0.31	0.62	0.72	0.88	1.1	1.46	2.2
T_M, c	0.02	0.017	0.015	0.013	0.012	0.01	0.01	0.015	0.025	0.035	0.045	0.046
I_H, A	20	30	40	50	60	70	70	60	50	40	30	20

Для усіх варіантів $T_e = 0.03$ с.

У процесі виконання лабораторної роботи на основі реалізованої моделі слід розрахувати та проаналізувати перехідні процеси $U_{\alpha}(t)$, $I_{\alpha}(t)$, $\omega(t)$ у наступних режимах:

1) розгін та гальмування двигуна на холостому ходу при змінненні напруги якоря відповідно з рис. 5.2;

2) розгін та гальмування двигуна при прикладанні струму $I_C = I_H$:

а) активного статичного моменту (струму) в інтервалі часу $0 \div t_5$;

б) реактивного статичного моменту, що з'являється при $\omega \neq 0$, (на моделі це реалізується за допомогою релейного елементу РЕ з рівнем обмеження, що дорівнює $I_C = I_H$);

в) статичного моменту, що прикладється у період розгону двигуна ($t=t_1$) та знімається у період гальмування ($t = t_4$);

3) прикладання стрибка напруги якоря $\Delta U_{\alpha} = 0.1 U_{\alpha H}$ при

$$U_{я0} = (0.5 \div 0.8)U_{яН} = \text{const};$$

4) прикладання $I_C = I_{яН}$ при $U_{я0} = (0.5 \div 0.8)U_{яН}$.

Увага! У двох останніх режимах для виключення перехідних процесів, викликаних початковою зміною напруги якоря при $U_{я0}$, необхідно в ланці, що моделює електромеханічну інерцію двигуна, задати початкове значення швидкості $\omega_0 = \frac{U_{я0}}{K\Phi_H}$.

Величини та характер змінення $U_{я}(t)$ и $I_C(t)$ для кожного варіанта наведені на рис. 5.2 та у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 - Величини змінення $U_{я}(t)$ и $I_C(t)$ за варіантами

Номер ВАРІАНТА парам.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$t_1, \text{с}$	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15	0.1	0.1	0.1	0.15	0.2	0.2	0.2
$t_2, \text{с}$	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
$t_3, \text{с}$	1.45	1.4	1.5	1.4	1.3	1.4	1.5	1.3	1.5	1.6	1.45	1.35
$t_4, \text{с}$	1.7	1.6	1.65	1.55	1.45	1.5	1.6	1.4	1.65	1.8	1.6	1.6
$t_5, \text{с}$	1.9	1.8	1.85	1.7	1.55	1.6	1.7	1.55	1.8	1.95	1.85	1.8

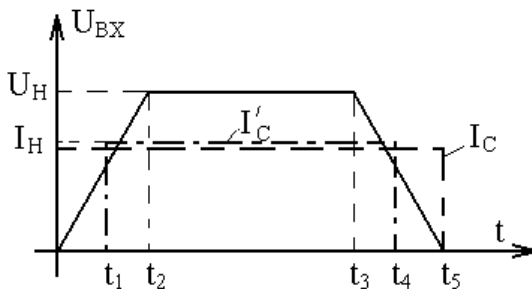


Рисунок 5.2 - Характер змінення $U_{я}(t)$ и $I_C(t)$

5.3 Зміст звіту

5.3.1 Проаналізувати перехідні процеси для всіх, зазначених вище, режимів.

5.3.2 Встановити вплив на характер перехідних процесів і сталих режимів:

- зміни напруги якоря;
- характеру статичного моменту.

5.3.3 Зробити необхідні висновки за отриманими результатами.

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ДВОЗОНОВОМУ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ

6.1 Теоретичні відомості

Структурна схема двигуна постійного струму при регулюванні швидкості у двох зонах може бути представлена у вигляді, зображеному на рис. 6.1.

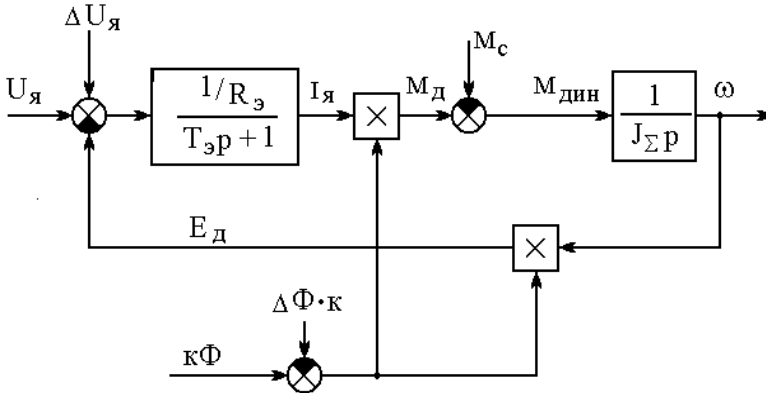


Рисунок 6.1 - Структурна схема двигуна постійного струму при регулюванні швидкості у двох зонах

Усі параметри досліджуваного двигуна слід взяти з лабораторної роботи 5, а величина сумарного моменту інерції розраховується з виразу:

$$J_{\Sigma} = \frac{T_M (K\Phi_H)^2}{R_{\Sigma}}.$$

Для більш повного використання двигуна по потужності і моменту, ослаблення потоку збудження двигуна здійснюється тільки після того, як буде досягнуто номінального значення напруги якоря.

6.2 Завдання до роботи

У процесі виконання лабораторної роботи на основі реалізованої моделі слід розрахувати та проаналізувати перехідні процеси $U_{\text{я}}(t)$, $I_{\text{я}}(t)$, $\omega(t)$ у наступних режимах:

а) розгін двигуна на холостому ході до максимальної швидкості та гальмування до нуля;

б) розгін максимальної швидкості та гальмування, при прикладанні $M_{\text{с}} = K\Phi_{\text{н}} \cdot I_{\text{ян}}$ при розгоні и знятті статичного моменту при гальмування;

в) прикладення стрибка напруги якоря $U_{\text{я}}$ при:

1) $K\Phi_0 = K\Phi_{\text{н}}$, $U_{\text{я}0} = U_{\text{ян}}$,

2) $K\Phi_0 = \gamma \cdot K\Phi_{\text{н}}$, $U_{\text{я}} = U_{\text{ян}}$;

г) прикладення стрибка $M_{\text{с}} = M_{\text{н}}$ при:

1) $K\Phi_0 = K\Phi_{\text{н}}$, $U_{\text{я}0} = U_{\text{ян}}$,

2) $K\Phi_0 = \gamma \cdot K\Phi_{\text{н}}$, $U_{\text{я}} = U_{\text{ян}}$;

д) змінення стрибком потоку збудження двигуна $\Delta K\Phi_0 = +0.1K\Phi_{\text{н}}$ при $U_{\text{я}} = U_{\text{ян}}$, $K\Phi_0 = \gamma \cdot K\Phi_{\text{н}}$.

Величини та характер змінення $U_{\text{я}}(t)$, $K\Phi(t)$ та $M_{\text{с}}(t)$ для реалізації режимів 1 та 2 наведені на рис. 6.2 та у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 - Величини та характер змінення $U_{\text{я}}(t)$, $K\Phi(t)$ та $M_{\text{с}}(t)$ за варіантами

Номер ВАРІАНТА парам.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
γ	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
t_1	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
t_2	0.3	0.3	0.35	0.4	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.35	0.35
t_3	0.6	0.6	0.65	0.75	0.7	0.7	0.75	0.7	0.75	0.75	0.7	0.7
t_4	1.5	1.5	1.55	1.6	1.6	1.55	1.6	1.55	1.6	1.55	1.55	1.55
t_5	1.8	1.8	1.85	1.9	1.9	1.85	1.9	1.85	1.9	1.85	1.85	1.85
t_6	1.9	1.9	1.95	2.1	2.1	2.0	2.1	2.0	2.1	2.0	2.0	2.0
t_7	2.1	2.1	2.15	2.3	2.3	2.2	2.3	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2

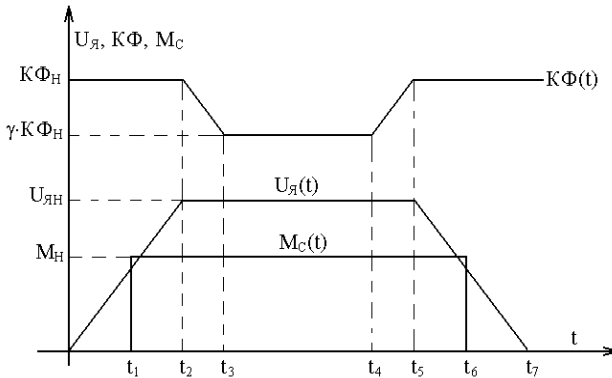


Рисунок 6.2 - Характер змінення $U_{я}(t)$, $K\Phi(t)$ та $M_c(t)$

Увага! Для виключення перехідних процесів, викликаних початковою зміною напруги якоря $U_{я0}$, необхідно, як і в попередньому випадку, в ланці, що моделює електромеханічну інерцію двигуна, задати початкове значення швидкості $\omega_0 = \frac{U_{я0}}{K\Phi_0}$.

6.3 Зміст звіту

6.3.1 Проаналізувати перехідні процеси для всіх, зазначених вище, режимів.

6.3.2 Встановити вплив на характер перехідних процесів і сталих режимів:

- зміни напруги якоря;
- ударного прикладення статичного моменту;
- змінення потоку збудження двигуна.

6.3.3 Провести порівняльний аналіз перехідних процесів в режимах 3, 4 при повному і ослабленому значенні потоку збудження двигуна.

6.3.4 Зробити необхідні висновки за отриманими результатами.

7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7. МОДЕЛЮВАННЯ ДВОМАСОВИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ (ДПС НЗ) В СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK ПАКЕТУ MATLAB

Мета роботи: Вивчити та промодельовати модель двомасової електромеханічної системи з ДПС НЗ в середовищі Simulink пакету Matlab, побудувати перехідні та статичні характеристики моделі.

7.1 Теоретичні відомості

7.1.1 Диференційні рівняння електромеханічної системи

Електромеханічна система сучасних промислових машин та агрегатів (прокатні стани, безперервно-технологічні агрегати текстильної і хімічної промисловості, конвеєри, скіпи, ліфти та багато інших механізмів) характеризується досить складною структурою механічної та електричної частин. Механічна частина являє собою багатомасову механічну систему з жорсткими та пружними передачами. Електрична частина також є досить складною системою, в залежності від способу керування, схеми з'єднань, діапазону і точності регулювання і таке інше. Тому такі електромеханічні системи характеризуються взаємозв'язком електромагнітних процесів, механічних явищ і технологічних факторів, дією зовнішніх (зміна моменту опору, напруги живлення, температури навколишнього середовища та інш.) і внутрішніх (зміна електромеханічних параметрів системи) збурень. Вказані аспекти повинні бути враховані при математичному описі електромеханічного об'єкта.

В реальний електромеханічних системах уявлення про жорсткий зв'язок вала двигуна з механізмом є припущення, яке в ряді випадків виявляється недоцільним. Практично любий зв'язок двигуна з виконавчим органом не є абсолютно жорсткою, і можливість припущення явищем пружності часто пов'язане з тим, що особиста частота пружних коливань системи двигун – виконавчий механізм (Д –

ВМ) виявляється значно більшою частот, істотних для автоматичної системи керуванням електроприводом. Тому підвищення швидкодії автоматичної системи, обумовлене використанням перетворювачів на базі сучасних напівпровідникових елементів та високоякісних мікропроцесорних систем регулювання, часто не вдається реалізувати із-за впливу пружності.

Розглянемо електромеханічну систему Д – ВМ, в якій зосереджені обертові маси ротора й механізму зв'язані між собою довгим валом (рисунок 7.1). Прийmemo за J_1 момент інерції ротора двигуна, а за J_2 – момент інерції обертових частин ВМ.

При аналізі таких систем роблять наступні основні припущення:

а) сили й моменти в системі прикладені до зосереджених мас, які не деформуються;

б) пружні зв'язки невагомі і характеризуються постійною пружністю зв'язки, тобто коефіцієнтом пропорційності між моментом й деформацією;

в) деформація пружних зв'язків лінійна і підпорядковується закону Гука;

г) хвильовим рухом деформації знехтуємо.

При складанні диференціальних рівнянь не будемо виходити за рамки лінійної теорії, процеси в електромагнітній й механічній частині багатомасового електропривода розглядати вкупі, про що свідчить модель, наведена на рисунку 7.1. На рисунках 7.1 і 7.2 позначено: E_{Π} , R_{Π} , L_{Π} – ЕРС, внутрішній опір та індуктивність перетворювача, який живить якорь двигуна (B , Om , Gn); U_{Π} , $U_{дв}$ – напруга живлення перетворювача і двигуна (B); $E_{дв}$, $R_{дв}$, $L_{дв}$ – ЕРС, активний опір та індуктивність якорного кола двигуна (B , Om , Gn); I_E – струм якорного кола (A); U_3 , I_3 , R_3 , L_3 – напруга, струм, активний опір та індуктивність кола збудження двигуна (B , A , Om , Gn); J_1 , J_2 – приведені моменти інерції першої (двигун) й другої (механізм) мас ($kg \cdot m^2$); ω_1 , ω_2 – відповідно швидкості обох мас (c^{-1}); $M_{дв}$ – електромагнітний момент двигуна ($H \cdot m$); M_C – статичний момент опору з боку виконавчого механізму ($H \cdot m$); C_{12} – коефіцієнт жорсткості ($H \cdot m / rad$); $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ – кутова деформація пружного зв'язку, або різниця кутових переміщень першої і другої маси, відповідно φ_1 , φ_2 (rad).

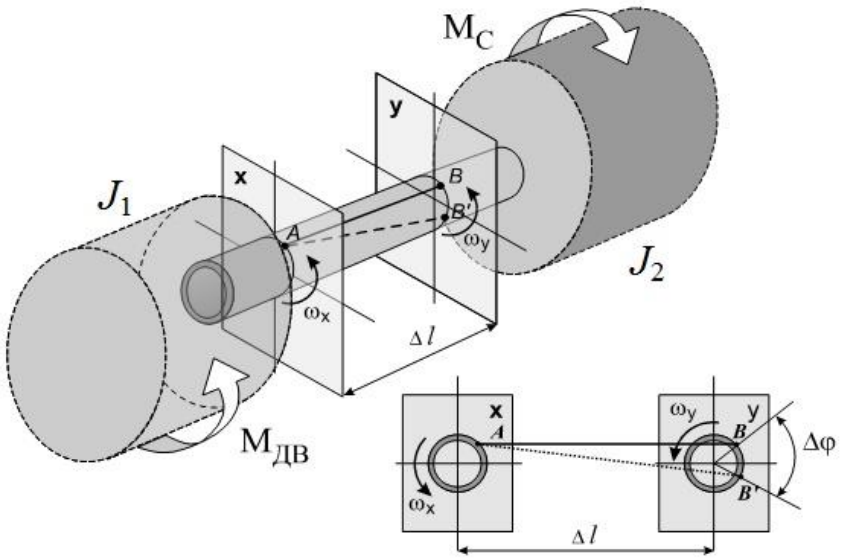


Рисунок 7.1 - Пружний зв'язок системи Д - ВМ

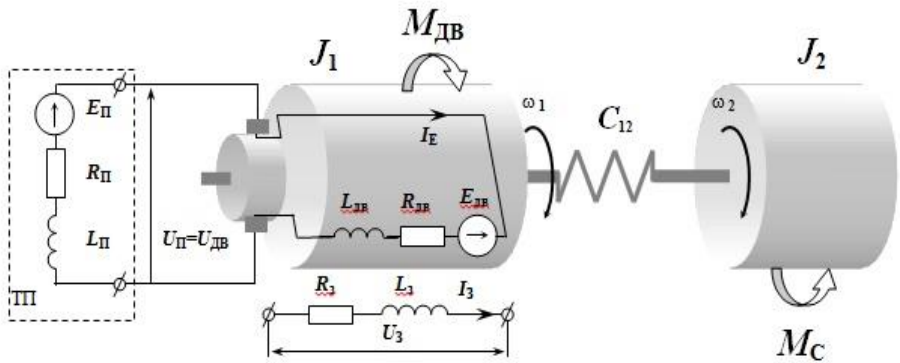


Рисунок 7.2 - Двомасова модель електропривода з двигуном постійного струму незалежного збудження

При математичному описі електромеханічної системи складемо диференційні рівняння для окремих вузлів схеми.

7.1.1.1 Рівняння якірного кола ДПС НЗ

$$E_{\Pi} = E_{ДВ} + I_E R_E + L_E \frac{dI_E}{dt}; \quad (7.1)$$

або

$$E_{\Pi} - E_{ДВ} = I_E R_E (T_E p + 1); \quad (7.2)$$

де: $R_E = R_{\Pi} + R_{ДВ}$ – еквівалентний опір якірного кола, Ом;
 $L_E = L_{\Pi} + L_{ДВ}$ – еквівалентна індуктивність якірного кола, Гн;
 $T_E = \frac{L_E}{R_E}$ – електромагнітна стала часу якірного кола, с.

Зробимо припущення, будемо вважати, що в ДПС НЗ магнітний потік незмінний і дорівнює номінальному, тому ЕРС знайдемо за формулою:

$$E_{ДВ} = C_E \cdot \omega_1, \quad (7.3)$$

де: C_E – конструктивний коефіцієнт двигуна, В·с.

Розрахунки електромагнітного моменту двигуна ведемо за формулою:

$$M_{ДВ} = C_M \cdot I_E, \quad (7.4)$$

де: C_M – механічна стала двигуна, Н·м/А.

7.1.1.2 Рівняння механічної частини електропривода

Рівняння руху записується у наступному вигляді

$$M_{дв} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \quad (7.5)$$

$$M_{12} - M_C = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \quad (7.6)$$

$$M_{12} = C_{12} \Delta\varphi = C_{12} (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (7.7)$$

де: M_{12} – момент пружного зв'язку (пружний момент), Н·м.

Перепишемо рівняння в більш зручному вигляді:

$$M_{дв} - M_{12} = J_1 p \omega_1; \quad (7.8)$$

$$M_{12} = \frac{C_{12}}{p} (\omega_1 - \omega_2); \quad (7.9)$$

$$M_{12} - M_C = J_2 p \omega_2. \quad (7.10)$$

За формулами (7.2) - (7.4) та (7.8) - (7.10) побудуємо структурну схему двомасового електромеханічного об'єкту (ДЕМО), ця схема зображена на рисунку 7.3.

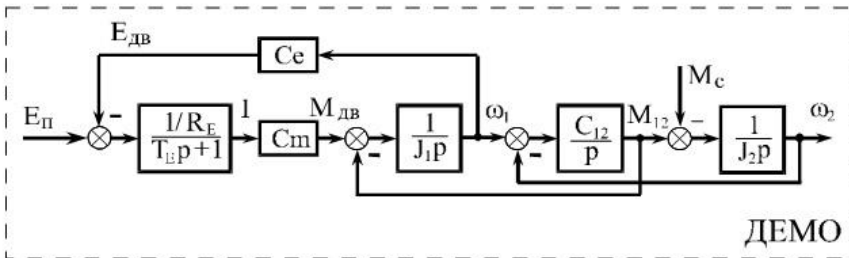


Рисунок 7.3 - Структурна схема двомасової електромеханічної системи

ДЕМО має дві вхідні координати: зі сторони керування – напруга подана на двигун від перетворювача, зі сторони збурення – статичний момент опору, механічними втратами в двигуні знехтуємо.

7.1.2 Узагальнені параметри двомасової пружної електромеханічної системи

Співвідношення мас:

$$\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1} = \frac{J_\Sigma}{J_1}. \quad (7.11)$$

Резонансна частота пружних коливань системи, с^{-1} :

$$\Omega_{12} = \sqrt{C_{12} \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}} = \sqrt{\frac{C_{12} \cdot \gamma}{J_2}}. \quad (7.12)$$

Резонансна частота першої маси, коли друга нерухома ($J_2 \rightarrow \infty$), с^{-1} :

$$\Omega_{01} = \sqrt{C_{12} / J_1}. \quad (7.13)$$

Резонансна частота другої маси, коли перша нерухома ($J_1 \rightarrow \infty$), с^{-1} :

$$\Omega_{02} = \sqrt{C_{12} / J_2} = \Omega_{12} / \sqrt{\gamma}. \quad (7.14)$$

Передавальна функція механічної частини електропривода:

$$W_{\text{мех}}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M_{\text{ДВ}}(p)} = \frac{C_{12}}{p[J_1 J_2 p^2 + C_{12}(J_1 + J_2)]} \quad (7.15)$$

Жорсткість механічної характеристики двигуна, $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$:

$$\beta = C_e^2 / R_E. \quad (7.16)$$

Електромеханічна стала часу, с :

$$T_M = \frac{(J_1 + J_2) R_E}{(C\Phi)^2} = \frac{J_1 + J_2}{\beta}. \quad (7.17)$$

Механічна стала часу, с :

$$T_C = \frac{J_1 + J_2}{|\beta_C|}, \quad (7.18)$$

де β_C - жорсткість механічної характеристики робочого механізму, Н·м·с.

Параметр співвідношення сталей:

$$m = T_M / T_E. \quad (7.19)$$

7.2 Завдання до роботи

7.2.1. Скласти систему диференційних рівнянь для двомасової електромеханічної системи з ДПС НЗ, побудувати за цими рівняннями динамічну модель у вигляді структурної схеми.

7.2.2 Розрахувати за паспортним даним параметри структурної схеми моделі (у відповідності до свого варіанту).

7.2.3 Розрахувати узагальнені параметри двомасової пружної електромеханічної системи.

7.2.4 Створити в середовищі Simulink пакету Matlab модель для дослідження.

7.2.5 Дослідити динамічні та статичні характеристики моделі.

7.2.6 Оформити звіт про виконання лабораторної роботи.

7.3 Порядок виконання роботи

7.3.1 Підготовка до виконання лабораторної роботи

7.3.1.1 Ознайомитись з теоретичними посилками.

7.3.1.2 У відповідності зі своїм варіантом (таблиця 7.2 і А.1) розрахувати основні параметри електромеханічної системи та структурної схеми.

7.3.1.3 Заповнити таблицю 7.1.

7.3.1.4 Скласти структурну схему двомасової електромеханічної системи.

Паспортні дані електродвигунів постійного струму серії 2П наведені у табл. А.1 додатку А.

Таблиця 7.1 - Основні параметри двомасової електромеханічної системи

Величина	Формула	Значення
1. Номінальний струм якоря, A	$I_n = \frac{P_n}{U_n \cdot \eta_n}$	
2. Номінальна швидкість: $\omega_{ном}, рад/с$	$\omega_n = \pi \frac{n_n}{30}$	
3. Номінальний момент: $M_{ном}, Н \cdot м$	$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$	
4. Еквівалентний опір якірного кола: $R_E, Ом$ (умовно прийємо $R_{II} = R_{Я}$)	$R_E = (R_{Я} + R_{ДОД}) + R_{II}$	
5. Еквівалентна індуктивність якірного кола: $L_E, Гн$ (умовно прийємо $L_{II} = L_{Я}$)	$L_E = L_{II} + L_{Я}$	
6. Конструктивний коефіцієнт двигуна: $C_e, В \cdot с$	$C_e = \frac{U_n - I_n \cdot R_{Я}}{\omega_n}$	
7. Механічна постійна: $C_m, Н \cdot м / А$	$C_m = \frac{M_n}{I_n}$	
8. Еквівалентна електромагнітна стала часу якірного кола: $T_E, с$	$T_E = L_E / R_E$	
9. Приведений момент інерції першої маси: $J_1, кг \cdot м^2$	$J_1 = J_{ДВ}$	
10. Приведений момент інерції другої маси: $J_2, кг \cdot м^2$	$J_2 = 1.5 J_{ДВ}$	
11. Співвідношення мас: γ	(11)	
12. Резонансна частота пружних коливань системи: $\Omega_{12}, с^{-1}$	(12)	
13. Резонансна частота першої маси: $\Omega_{01}, с^{-1}$	(13)	
14. Резонансна частота другої маси: $\Omega_{02}, с^{-1}$	(14)	
15. Жорсткість механічної характеристики двигуна: $\beta, Н \cdot м \cdot с$	(16)	
16. Електромеханічна стала часу: $T_M, с$	(17)	
17. Параметр співвідношення сталих: m	(19)	

Таблиця 7.2 – Пружність двомасової електромеханічної системи

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C_{12}, \text{Н-м/рад}$	10	10	10	12	12	12	12	12	10
Варіант	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$C_{12}, \text{Н-м/рад}$	10	10	10	12	12	12	12	12	8
Варіант	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$C_{12}, \text{Н-м/рад}$	8	10	10	10	8	12	12	12	15
Варіант	28	29	30	31	32	33	34	35	
$C_{12}, \text{Н-м/рад}$	15	15	15	12	12	12	15	15	

7.3.2 Експериментальна частина

Для виконання експериментальної частини лабораторної роботи потрібно в середовищі Simulink пакету MATLAB згідно розрахованій структурній схеми двомасової електромеханічної системи створити комп'ютерну модель, приклад такої моделі зображений на рисунку 7.4 .

На рисунку 7.4 для зміни масштабу координат системи використані блоки типу Gain ().

В ході експериментальної частини провести наступні експерименти.

7.3.2.1 Подати вхідний сигнал в вигляді сходинки (**Step**), синусоїди (**Sine Wave**) та трапеції (**Sine Wave1** та **Saturation**), як без навантаження ($M_C = 0$), так і з навантаженням ($M_C = M_{HOM}$).

7.3.2.2 При цьому спостерігати необхідні координати системи (**Scope** та **Scope1**).

7.3.2.3 Перехідні процеси відобразити в звіті до лабораторної роботи.

7.3.2.4 Провести динамічний аналіз системи (**Input Point** і **Output Point**).

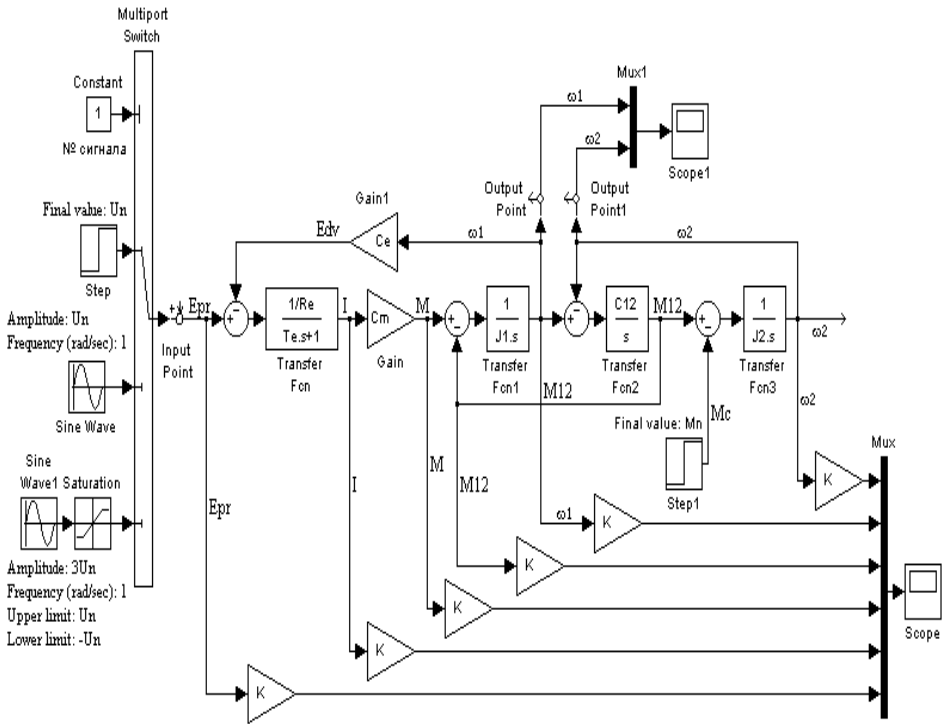


Рисунок 7.4 - Комп'ютерна модель двомасової електромеханічної системи в середовищі Simulink пакету MATLAB

7.4 Зміст звіту

7.4.1 Тема та мета роботи.

7.4.2 Законспектовані теоретичні відомості: основні диференційні рівняння електромеханічної системи, структурну схему, рисунки.

7.4.3 Початкові дані згідно свого варіанту.

7.4.4 Розрахунки основних параметрів електромеханічної системи, заповнена таблиця 7.1.

7.4.5 Комп'ютерна модель двомасової електромеханічної системи в середовищі Simulink пакету MATLAB.

7.4.6 Шість перехідних характеристик при різноманітних режимах роботи електропривода (згідно опису експериментальної частини).

7.4.7 Результати динамічного аналізу системи: ЛАЧХ, корні та нулі, діаграми.

7.4.8 Висновки до роботи.

7.5 Контрольні запитання

7.5.1 Як записати рівняння руху привода при жорстких кінематичних зв'язках?

7.5.2 Як записати рівняння руху привода при пружній кінематиці?

7.5.3 Запишіть диференційні рівняння, які використовують при описі ДПТ НЗ?

7.5.4 Поясніть пружний момент?

7.5.5 Що таке електромагнітна стала часу?

7.5.6 Що таке електромеханічна стала часу?

7.5.7 Розтлумачте суть резонансної частоти Ω_{12} .

7.5.8 Розкажіть про Ω_{01} .

7.5.9 Розкажіть про Ω_{02} .

7.2.10 Опишіть один із перехідних процесів зображений у звіті.

7.5.11 На що впливає величина моментів інерції електромеханічної системи?

7.5.12 На що впливає величина пружності електромеханічної системи?

7.5.13 Як впливає індуктивність якірного кола на перехідні процеси в електроприводі?

7.5.14 Як будуть змінюватись швидкості реверсивного привода при зміні знака вхідної напруги?

7.5.15 Як будуть змінюватись швидкості привода при ударному навантаженні?

ЛІТЕРАТУРА

1 Лозинський А., Мороз В., Паранчук Я. Розв'язування задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво НТУ “Львівська політехніка”, 2000. – 166 с.

2 Гулятьев А.К. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие. - СПб.: КОРОНАпринт, 1999. - 288 с.

3 Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MATLAB 5.0/5.3. Системы символьной математики. М.: Нолидж, 1999. – 640 с.

4 Потемкин В.Г., Рудаков П.М. Система МАТЛАБ 5 для студентов. – 2-е изд., испр. и дополн. – М.: Диалог-МИФИ, 1999 – 448 с.

5 Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: Учеб. для ВУЗов.- М.: Машиностроение, 1990. - 304 с.

6 Справочник по автоматизированному электроприводу /Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 613 с.

7 Справочник по электрическим машинам: В 2 т./ Под общ. Ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. ил.

8 Егоров В.Н., Шестаков В.М. Динамика систем электропривода. – Л.: Энергоатомиздат. 1983. – 216 с.

9 Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия. 1979. – 160 с.

10 Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. - СПб.: КОРОНА принт. 2001. – 320 с.

11 Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 560 с.

12 Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния: Монография/ Л.В. Акимов, В.И. Колотило, В.С. Марков; ред. В.Б. Клепикова, Л.В. Акимова - Харьков: ХГПУ, 2000.-93 с.

13 Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой/ Л.В. Акимов, В.Т. Долбня,

В.Б. Клепиков, А.В. Пирожок / Под общей ред. В.Б. Клепикова. - Харьков: НТУ «ХПИ», Запорожье: ЗНТУ, 2002. - 160 с.

14 Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. □ М.: Энергия, 1976 □ 615 с.

15 Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

16 Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб: Питер, 2002. – 528 с.

17 Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя. М.: СОЛОН-Пресс. – 2003. - 576 с.

18 Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. -С-Пб.: Энергоатомиздат, 1992. - 288 с.

19 Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 560 с.

20 Тиристорный следящий электропривод / А.М. Лебедев, В.А. Найдис и др. - М.: Энергия, 1972. - 127 с.

21 Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристор-ными электроприводами постоянного тока. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 303 с.

Додаток А

Таблиця А.1 - Паспортні дані електродвигунів постійного струму серії 2П

Варіант	Тип	Потужність, кВт	Напру- га, В	Частота обертання, об/хв		ККД, %	Опір обмоток при 15 °С, Ом			Індуктив- ність якірного кола, мГн	Момент інерції, кг·м ²
				номіна льна	максима льна		якоря	додат- кових полюсів	збурен ня		
		P_n	U_n	n_n	n_{max}	η_n	$R_{я}$	$R_{дод}$	R_z	$L_{я}$	$J_{дв}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2ПН90МУХЛ4	0,71	220	2360	3540	70,0	3,99	2,55	470	79	0,004
2	2ПН90ЛУХЛ4	0,55	110	1500	4000	67,5	1,3	0,932	432	33	0,005
3	2ПБ90МУХЛ4	0,55	220	3000	4000	71,0	3,99	2,55	810	82	0,004
4	2ПН100МУХЛ4	2,00	110	3000	4000	78,5	0,201	0,135	265	6,6	0,011
5	2ПН100ЛУХЛ4	1,10	220	1500	4300	74,0	2,2	1,57	295	83	0,012
6	2ПБ100МУХЛ4	0,60	110	1500	4000	72,0	1,083	0,659	595	40	0,011

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	2ПН112МУХЛ4	0,85	220	950	3500	64,0	3,85	3,08	233	44	0,015
8	2ПН112МУХЛ4	1,50	110	1500	4000	70,0	0,42	0,355	181	4,8	0,015
9	2ПН112ЛУХЛ4	2,20	220	1500	4000	75,0	0,968	0,848	168	14	0,018
10	2ПН112ЛУХЛ4	5,3	110	3350	4000	79,5	0,46	0,051	96,3	15	0,018
11	2ПБ112ЛУХЛ4	1,5	220	2240	4000	80,0	0,74	0,74	303	12	0,018
12	2ПН112МУХЛ4	10,5	440	3000	4000	85,0	0,564	0,336	111	11	0,015
13	2ПН132ЛУХЛ4	14,0	220	3150	4000	86,0	0,08	0,066	76	1,8	0,048
14	2ПБ132ЛУХЛ4	1,9	440	1120	2500	78,0	4,05	2,82	216	99	0,048
15	2ПБ132ЛУХЛ4	5,3	220	3000	4000	85,5	0,167	0,124	216	4	0,048
16	2ПБ132МУХЛ4	5,5	440	3000	4000	83,5	0,74	0,486	175	16,7	0,038
17	2ПО132ЛУХЛ4	2,2	110	1000	4000	74,0	0,22	0,196	138	5,2	0,048
18	2ПФ132МУХЛ4	6,0	220	2360	4000	83,5	0,226	0,166	111	1,6	0,038

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
19	2ПФ132ЛУХЛ4	11,0	440	3150	4000	86,5	0,322	0,27	76	7,1	0,048
20	2ПН160МУХЛ4	3,0	110	750	3000	75,5	0,138	0,135	128	5,04	0,083
21	2ПН160МУХЛ4	18,0	220	3150	4000	87,0	0,037	0,024	53,1	1	0,083
22	2ПН160ЛУХЛ4	4,0	440	750	1850	78,5	2,02	1,8	117	63	0,1
23	2ПБ160МУХЛ4	2,1	110	800	3000	77,0	0,235	0,151	177	7,1	0,083
24	2ПБ160ЛУХЛ4	3,2	220	1060	3000	82,5	0,385	0,364	181	14	0,1
25	2ПО160МУХЛ4	8,0	440	2200	4000	86,5	0,51	0,407	148	16	0,083
26	2ПО160ЛУХЛ4	10,0	220	2360	4000	88,5	0,069	0,049	117	2,5	0,1
27	2ПФ160МУХЛ4	16,0	440	3150	4000	88,0	0,145	0,101	53,1	4	0,083
28	2ПН180МУХЛ4	8,0	220	1060	3000	83,0	0,181	0,122	74,8	6,1	0,2
29	2ПО180МУХЛ4	17,0	440	3000	3500	90,0	0,15	0,092	132	5,6	0,2
30	2ПФ180ЛУХЛ4	25,0	220	2120	3500	89,0	0,042	0,03	86	0,81	0,23

Продовження табл. А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
31	2ПН200МУХЛ4	60	440	3150	3500	90,5	0,047	0,029	35	1,6	0,25
32	2ПФ200МУХЛ4	22,0	220	1600	3500	87,5	0,047	0,029	46	1,6	0,25
33	2ПФ200МУХЛ4	40,0	440	3000	3500	90,5	0,071	0,041	96	2,5	0,25
34	2ПФ200ЛУХЛ4	15,0	110	750	3300	82,0	0,031	0,02	42	1,2	0,3
35	2ПФ200ЛУХЛ4	15,0	440	800	1850	83,5	0,5	0,264	42	18,6	0,3

Примітка. Двигуни виконані з повною кількістю додаткових полюсів, з висотою осі обертання 90 і 100 мм – двохполюсні, 112 мм – чотириполюсні.