

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

**МЕХАТРОНІКА ТА РОБОТОТЕХНІКА:**

**методичні вказівки  
до виконання практичних робіт**

Запоріжжя, 2024



УДК 62-83-52:621.313  
Мех55

Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 8 від 12.07. 2024 р.)

**Укладач**

Суботін О.В., канд. техн. наук, доцент

Мех  
55

**Мехатроніка** та робототехніка : методичні вказівки до практичних робіт / уклад. О. В. Суботін. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 48 с.

Викладено загальні питання аналізу, синтезу та принципи структурного моделювання мехатронних модулів руху для застосування в робототехнічних та мехатронних системах. Розглянуто особливості моделювання в програмному забезпеченні MatLab.

УДК 62-83-52:621.313

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024



## ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	5
1.1 Структура мехатронного модулю руху на базі електроприводу	5
1.2 Передавальні функції ланок, що входять до мехатронного модулю руху	7
1.3 Синтез САУ ЕП у складі мехатронного модулю руху	12
1.4 Методика побудови перехідних процесів на основі використання структурної схеми мехатронного модулю руху	19
1.5 Моделювання мехатронного модулю руху	22
1.6 Контрольні запитання	28
2 КОРОТКА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПАКЕТ MATLAB	29
2.1 Система MatLab	29
2.2 Структура MatLab	29
2.3 Робота в MatLab	30
3 ПРАКТИКУМ З МОДЕЛЮВАННЯ	35
3.1 Практична робота №1. Моделювання та дослідження одноконтурного мехатронного модулю руху	35
3.2 Практична робота №2. Моделювання та дослідження двоконтурного мехатронного модулю руху	36
3.3 Практична робота №3. Моделювання та дослідження триконтурного мехатронного модулю руху	38
3.4 Практична робота №4. Дослідження впливу нелінійних елементів на якість регулювання у багатоконтурних мехатронних модулях руху	39
3.5 Практична робота №5. Динаміка мехатронного модулю руху	42
3.6 Практична робота №6. Оптимізація структури (синтез) мехатронного модулю руху	43
3.7 Критерії оцінювання	45
ВИСНОВОК	46
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ	47



## ВСТУП

Для забезпечення надійної та якісної роботи мехатронних модулів руху в складі мехатронних та робототехнічних систем потрібно поглиблене вивчення перехідних процесів у складних системах, що складаються з перетворювачів енергії, електродвигунів, виконавчих механізмів та систем керування [1, 2].

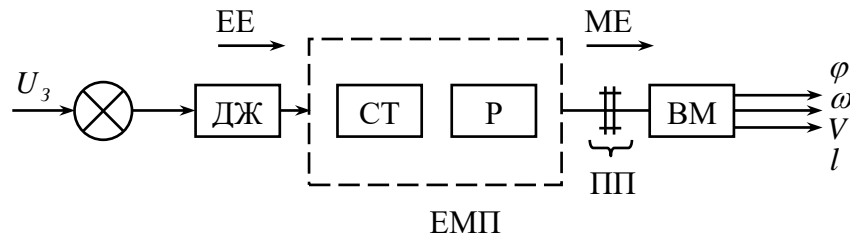
Аналітичний розрахунок перехідних процесів у таких мехатронних модулів руху, навіть при значних спрощеннях та припущеннях, становить великі труднощі. Найбільш швидке і досить точне дослідження перехідних процесів у різних режимах роботи мехатронних модулів руху, що проектується, можна виконати на відповідній моделі з використанням спеціальних систем і програмних пакетів автоматичного проектування на ЕОМ [3].

Моделювання на ЕОМ дає можливість швидко дослідити в ході проектування вплив різних змін параметрів схеми на характер та якість перехідних процесів, знайти оптимальні параметри регуляторів та інших елементів системи, що забезпечують найкращі динамічні характеристики та вищу надійність роботи всього мехатронного модулю руху. Це дозволяє суттєво прискорити процес проектування та підвищити точність розрахунків.

# 1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

## 1.1 Структура мехатронного модулю руху на базі електроприводу

Модуль руху - це система (рис. 1), що складається з джерела живлення (ІП), електромеханічного перетворювача (статор та ротор) та виконавчого механізму (ІМ) [4].

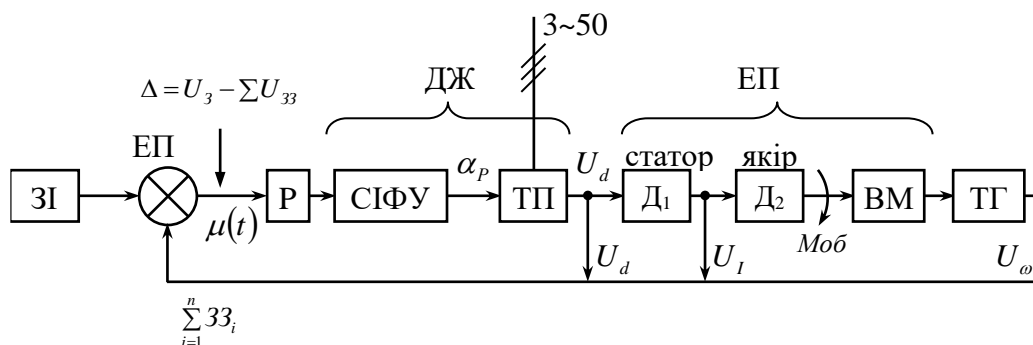


ЕМП – це електродвигун (статор і ротор); ПП – передавальний пристрій належить МВ; ЕЕ - електрична енергія; МВ – механічна енергія (обертання);  $U_3$  – напруга завдання.

Рисунок 1 – Структура модулю руху

Під мехатронним модулем руху (ММР) розуміють сукупність модулю руху (в загальному випадку - електроприводу) та технічних пристроїв (джерело живлення, засоби зворотних зв'язків (ОС) – датчики або вимірювальні перетворювачі, регулятори, коригувальні пристрої, пристрої формування завдання), призначені для реалізації технологічних режимів у статичі та динаміці відповідно до вимог, обумовлених виконанням певних технологічних процесів.

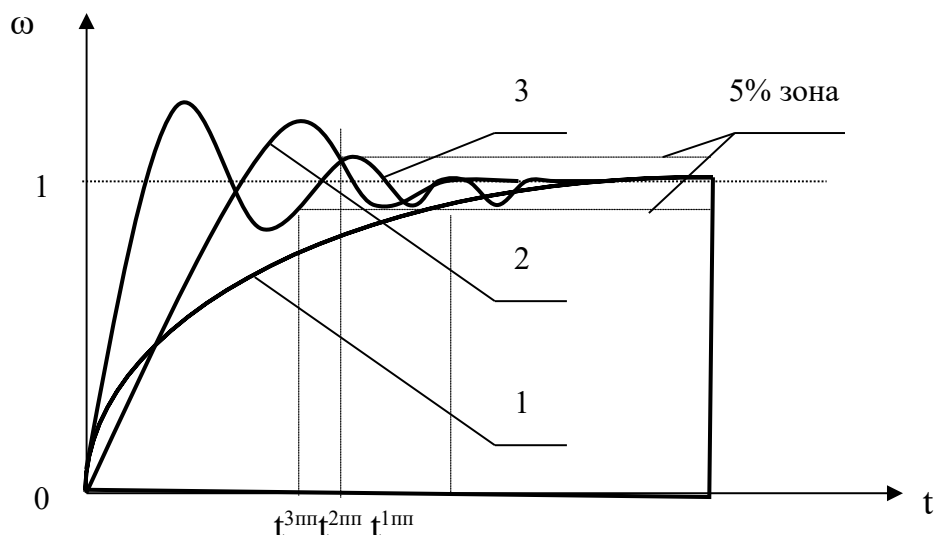
Структурна схема ММР представлена на рис. 2.



ЗІ - задатчик інтенсивності; ЕП - елемент порівняння; Р - регулятор; СІФУ - система імпульсно-фазового управління; ТП - тиристорний перетворювач;  $U_d$  - напруга постійного струму на виході ТП; Д1 - статор; Д2 – якір/ротор, що забезпечує обертання; ТГ - тахогенератор; МВ - виконавчий механізм

Рисунок 2 – Структурна схема ММР

В основу розрахунку ММР покладено ідею оптимального перехідного процесу [3]. Основним завданням створення ММР є синтез оптимальної структури модулю, що забезпечує найбільш прийнятний перехідний процес для певних умов роботи системи (рис. 3).



- 1 – експоненційний процес:  $\zeta=0$ ,  $t_{пп} \rightarrow \max$ ;
- 2 – аперіодичний процес:  $\zeta \leq (5...10)\%$ ;
- 3 – коливальний процес:  $\zeta > (5...10)\%$ ,  $t_{пп} \rightarrow \min$

Рисунок 3 – Види перехідних процесів у САУ ЕП

Що стосується ММР, під оптимальністю розуміється отримання:

- статичної і динамічної точності лише на рівні (5...10)%;
- високої швидкодії ( $t_{пп} = \min$ );
- абсолютної стійкості.

У ММР виділяють два режими роботи:

- статичний режим, коли вихідні параметри є стабільними у часі ( $\omega = f(M)$  - це сталий режим);
- динамічний режим, коли швидкість є функцією навантаження та часу ( $\omega = f(M_{II}, t)$  - тут час у неявному вигляді, як диференціал).

Ці режими ілюструються перехідними процесами, представленими на рис. 4.

Основною метою практикуму з моделювання є вивчення методів структурного моделювання та особливостей ММР, що реалізовані на сучасному електроприводі з підлеглим регулюванням, дослідження впливу параметрів на статичні та динамічні характеристики модулю.

Для забезпечення надійної та якісної роботи ММР потрібно поглиблене вивчення перехідних процесів у складних системах, що складаються з перетворювачів енергії мережі, електродвигунів, виробничих механізмів та систем керування.

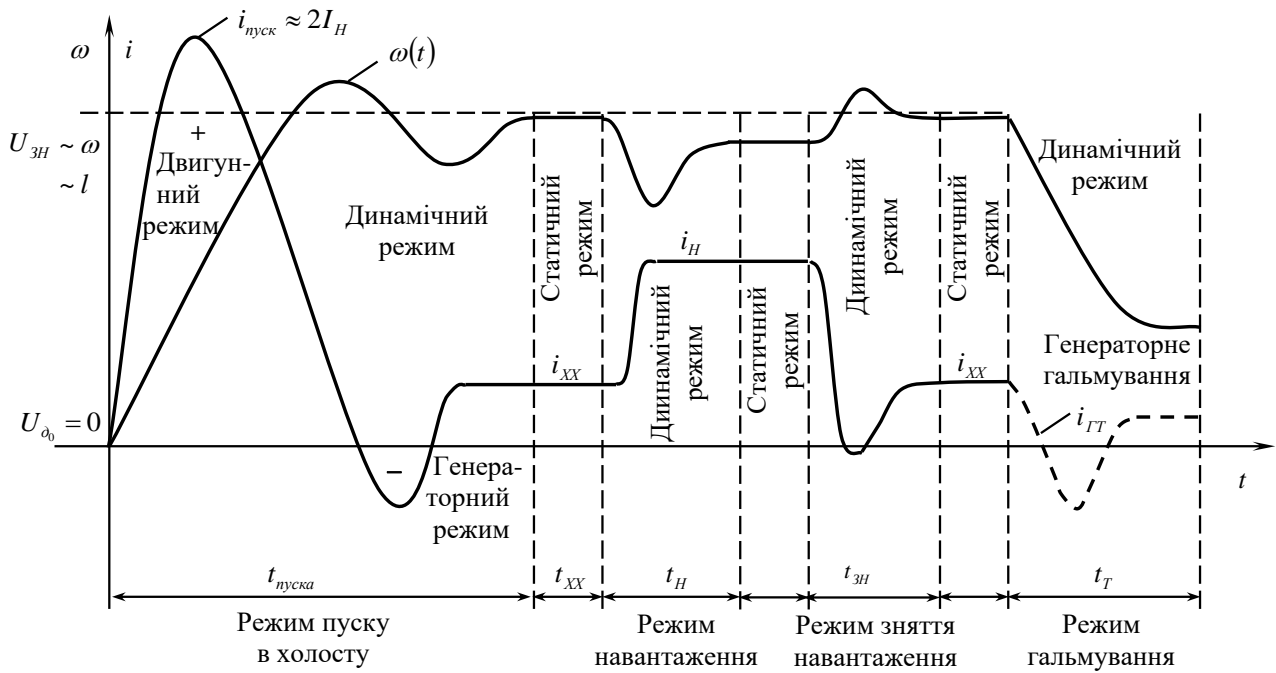


Рисунок 4 – Перехідні процеси в ММР

Аналітичний розрахунок перехідних процесів у таких системах, навіть при значних спрощеннях та припущеннях, становить певні труднощі. Найбільш швидко і досить точно дослідження перехідних процесів у різних режимах роботи системи, що проектується, можна виконати на відповідній моделі з використанням спеціальних систем і програмних пакетів моделювання на ЕОМ [6].

## 1.2 Передавальні функції ланок, що входять до мехатронного модулю руху

Необхідно розрізнити елемент та ланку системи. Ланка системи подається у вигляді передавальної функції (ПФ), а елемент системи визначається за функціональним призначенням і не має ПФ.

Розглянемо складові ланки системи керування автоматизованим електроприводом (АЕП), що входить до мехатронного модулю руху [1,3,7].

*Задатчик інтенсивності 3І:*

$$W(p) = \frac{1}{T_p} = \frac{K}{p};$$

$$\frac{1}{T} = K.$$

Таким чином, задатчик інтенсивності – це інтегруюча ланка. 3І показано на рис 5, де  $T_{ізодр}$  - час ізодрами, після якого закінчується збурююча дія.

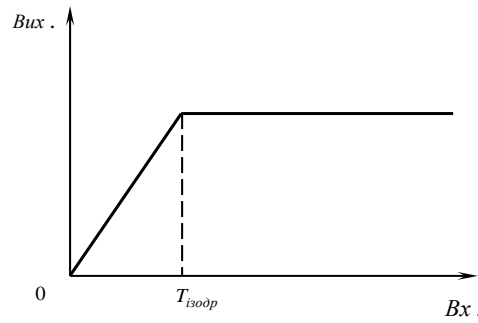


Рисунок 5 – Характеристика задатчика інтенсивності

*Елемент порівняння (ЕП).*

ПФ відсутня, це лише елемент системи.

*Зворотні зв'язки (ЗЗ) за положенням, швидкістю, напругою, струмом.*

ПФ датчиків зворотних зв'язків буде:

$$W(p) = K_i = \frac{\Delta y}{\Delta x},$$

де  $\Delta y, \Delta x$  - збільшення відповідно вихідної та вхідної величин;  $K_i$  - може бути:  $k_{II}$  - ЗЗ за положенням;  $k_H$  - ЗЗ по нарузі;  $k_{ш}$  - ЗЗ за швидкістю;  $k_c$  - ЗЗ за струмом.

Перелічені вище ланки можуть бути підсилювальними, пропорційними, масштабуючими.

*Регулятори (Р).*

Регулятор - пристрій регулювання керуючого впливу у системі. Види регуляторів представлені у табл. 1.

*Тиристорний перетворювач (ТП) може бути представлений:*

а) як підсилювальна ланка:

$$W_{ТП}(p) = k_{ТП},$$

де  $k_{ТП}$  визначається за характеристикою «вхід-вихід» (рис. 6) і дорівнює:

$$k_{ТП} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y}.$$

Для розрахунків приймається робочий діапазон роботи тиристорного перетворювача, не від нульової точки.

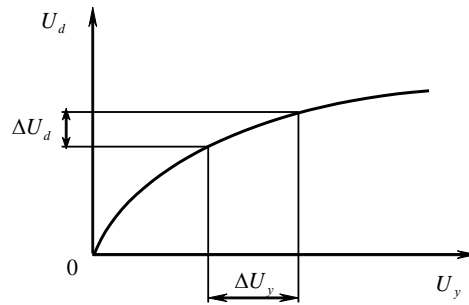


Рисунок 6 – Графічне визначення коефіцієнта передачі перетворювача

Таблиця 1 – Види регуляторів

Закон регулювання	Вид регулятора	Диференціальне рівняння	Передавальна функція $W(p)$	Електронна схема	Примітка
1. Пропорційний закон	$P$	$\Delta y = k \Delta x$	$k$		$k = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}} = \frac{R_{зз}}{R_{вх}}$
2. Інтегральний закон	$I$	$\Delta y = \int_{t_1}^{t_2} \Delta x dt$	$\frac{k}{p}$		$k_{інт} = \frac{1}{T}$ $T = R_{вх} C$
3. Пропорційно-інтегральний закон	$PI$	$\Delta y = k_y \Delta x + k_i \int_{t_1}^{t_2} \Delta x dt$	<p>Структурна схема ПІ-регулятора</p> $W_{PI}(p) = W_{PI}(p) + W_I(p) = k + \frac{1}{Tp} = \frac{kTp + 1}{Tp} = \frac{kp + \frac{1}{T}}{p}$		$T_1 = R_{зз} C$ $T_2 = R_{вх} C$ $R_{вх} = 10 \text{ КОМ,}$ $C = 1 \text{ МКФ - задаються}$

б) як аперіодична ланка:

$$W(p) = \frac{k_{ТП}}{T_{ТП}p + 1},$$

де  $k_{\text{ТП}}$  аналогічно попередньому;  $T_{\text{ТП}} = 0,005 \dots 0,01$  - постійна часу на вході у фільтр та позначається, як мала некомпенсована постійна -  $T_{\text{ТП}} = T_{\mu}$ ;

в) як комбінація підсилювальної ланки та ланки запізнення:

$$W_{\text{ТП}}(p) = ke^{-\tau p},$$

$$\tau = \frac{0,5}{mf},$$

де  $m$  - число фаз;  $f$  - частота мережі живлення.

*Передавальні функції двигунів у складі електроприводу ММР.*

Двигун можна уявити, як показано на рис. 7, де показані:  $\omega$  - кутова швидкість обертання;  $l$  - лінійне переміщення;  $\phi$  - кутове переміщення.

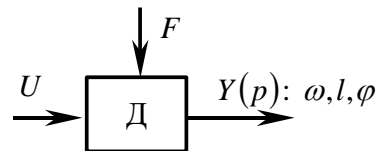


Рисунок 7 – Структурне представлення двигуну

Розглядаються два види передатних функцій:

а) з керуючого впливу -  $W(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)}$ ;

б) по збурюючому впливу -  $W(p) = \frac{\omega(p)}{F(p)}$ .

Двигуни поділяються на такі види:

- двигуни постійного струму ДПС (момент створюється постійним струмом), де вхід -  $U_c$ , вихід -  $\omega$ .

- асинхронні двигуни АД (ротор не синхронно обертається з магнітним потоком), де вихідний параметр -  $\omega$  або  $S$ , вхід -  $U_c$ .

ПФ та основні співвідношення в АД представлені нижче:

$$W(p) = \frac{k_D}{T_D p + 1},$$

$$k_D, T_D = f(U_{\Phi}, R, S),$$

$$T_D = \frac{S_K \omega_c J}{2k_M U_{\Phi}^2},$$

$$S_K = \pm \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_L^2}},$$

$$k_D = f(U_{\Phi}) = \frac{\omega_c}{U_{\Phi}} - \frac{S_K \omega_c U_c}{2k_M U_{\Phi}^2},$$

$$k_M = \frac{1,5}{\omega_c(r_1 \pm \sqrt{r_2^2 + x_{12}^2})},$$

де  $S_k$  - критичне ковзання;  $\omega_c$  - синхронна швидкість.

Двигуни постійного струму можуть бути представлені:

а) як коливальна ланка:

$$W(p) = \frac{k_D}{T_3 T_M p^2 + T_M p + 1},$$

де  $k_D$  - це величина, зворотня  $k\Phi$ ,  $k_D = \frac{1}{k\Phi}$ ;  $T_3 = \frac{L_{Я}}{R_{Я}}$  - механічна постійна, враховує інерційність наростання магнітних потоків у ланцюзі збудження;  $T_M = I \frac{R_{Я}}{(k\Phi)^2}$  - механічна стала, що враховує інерційність механічних частин;  $R_{Я}$  - опір якірного ланцюга;  $J$  - момент інерції електродвигуна;  $L_{Я}$  - індуктивність якірного ланцюга;

б) як інерційна ланка другого порядку:

$$W(p) = \frac{k_D}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

$$(T_1 p + 1) = T_3, \quad (T_2 p + 1) = T_M;$$

в) як ДПС із зворотнім зв'язком по струму, де виділено контур струму (рис.8):

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) = \frac{k_{D1}}{T_3 p + 1} \cdot \frac{k_{D2}}{T_M p},$$

$$k_{D1} k_{D2} = k_D = \frac{1}{k\Phi};$$

$$k_{D2} = \frac{1}{R_{Я}}; \quad k_{D1} = k_D R_{Я};$$

де  $T_M = I \frac{R_{Я}}{(k\Phi)^2}$  - механічна стала двигуна;  $T_{\Pi} = T_{\mu}$  - мала некомпенсована постійна;

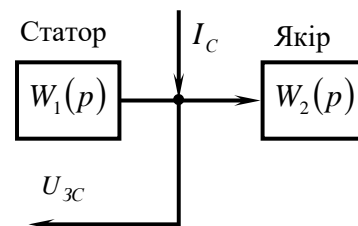


Рисунок 8 – Структурне представлення ДПС з контуром струму

г) як ДПС з вихідним параметром у вигляді кута повороту:

$$W(p) = W_K(p) \cdot W_I(p) = \frac{k_D}{p(T_3 T_M p^2 + T_M p + 1)},$$

де  $W_K(p)$  - передавальна функція коливальної ланки;  $W_I(p)$  - передавальна функція інтегруючої ланки.

Вплив порядку астатизму системи на вигляд перехідного процесу в АЕП, включаючи двигун, може бути пояснено, як зображено на рис. 9.

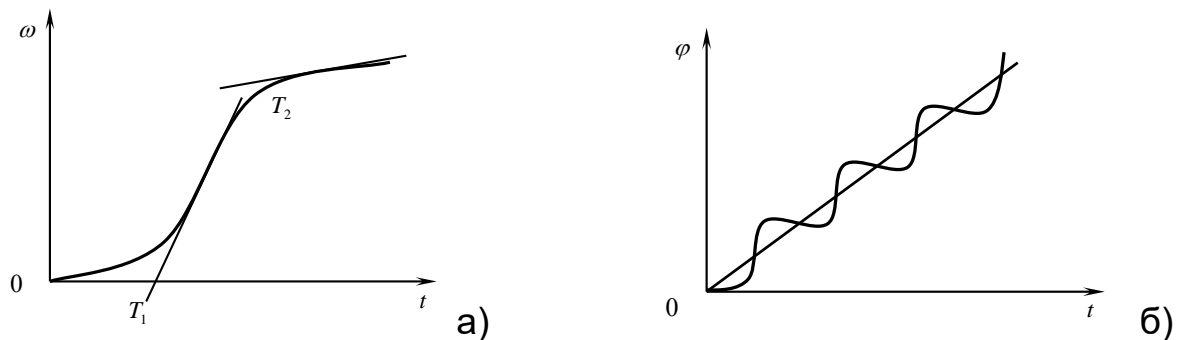


Рисунок 9 – Характеристика системи із дворазовим (а) і триразовим (б) інтегруванням

Передавальний механізм або редуктор (Р).

Якщо вихідний параметр – кутова швидкість  $\omega$  тоді ПФ редуктора:

$$W(p) = k_p;$$

$$k_p = \frac{1}{u},$$

де  $u$  - передавальне відношення.

Якщо вихідний параметр кут повороту -  $\varphi$  , тоді ПФ редуктора:

$$W(p) = \frac{k_p}{p} = \frac{1}{T_p p}.$$

### 1.3 Синтез САУ ЕП у складі мехатронного модулю руху

Під синтезом розуміють цілеспрямований розрахунок системи управління приводом або її елементів з метою отримання оптимальних значень параметрів, що регулюються (оптимальний — найкращий для даних параметрів) [3,4].

Як оптимальні для САУ ЕП приймають, як правило, такі умови:

- мінімальна статична похибка  $\sigma_{CT_{min}} \leq (5...10)\%$ ;
- $t_{пп}$  має бути мінімальним, швидкодія має бути максимальною;
- абсолютна стійкість.



## Оптимізація САУ ЕП

Оптимізація заснована на використанні бажаних передавальних функцій, послідовної корекції:

$$W_{\text{баж}}(p) = W_{\text{зм}}(p) \cdot W_{\text{нз}}(p).$$

У зв'язку з цим реальна (бажана) передатна функція системи  $W_{\text{баж}}(p)$  визначається множенням величини незмінної частини  $W_{\text{нз}}(p)$  на передавальну функцію частини системи, що змінюється  $W_{\text{зм}}(p)$ . Для того щоб передавальна функція реальної системи дорівнювала бажаній, необхідно оперувати змінною частиною, якою виступає регулятор зі змінними параметрами і структурою.

Тоді для визначення структури і параметрів регулятора, відповідно до теорії послідовної корекції, треба бажану ПФ розділити на ПФ незмінної частини:

$$W_{\text{р}}(p) = W_{\text{баж}}(p),$$

$$W_{\text{зм}}(p) = W_{\text{р}}(p) = \frac{W_{\text{баж}}(p)}{W_{\text{нз}}(p)}.$$

Незмінна частина визначається передатною функцією тиристорного перетворювача та двигуна.

Структурна схема двоконтурного ММР (з регульованим приводом) представлена на рис. 10.

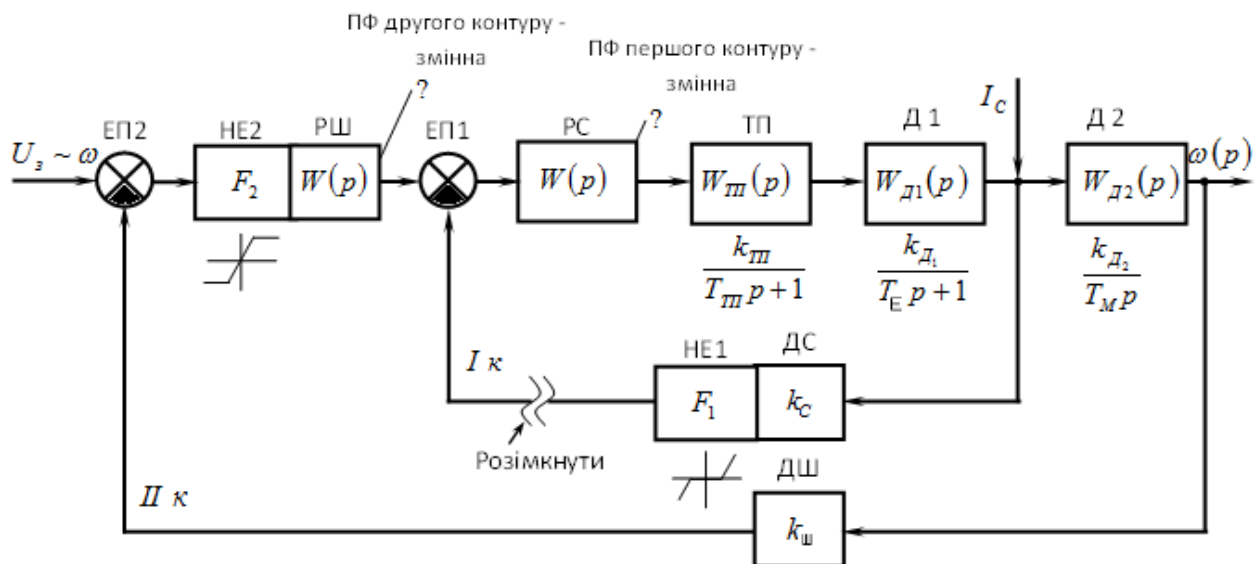


Рисунок 10 – Структурна схема двоконтурного ММР

У такій системі необхідно:

- визначити ПФ змінної частини у першому контурі  $W_{PC}(p)$ :

$$W_{3M_I}(p) = W_{PC}(p) - \text{в I к.};$$

- знайти ПФ змінної частини у другому контурі  $W_{PШ}(p)$ :

$$W_{3M_{II}}(p) = W_{PШ}(p) - \text{в II к.}$$

Для вирішення задачі синтезу (знаходження структури регулятора – змінної частини контуру) визначають вирази бажаних передавальних функцій для першого та другого контуру:

$$W_P(p) = \frac{W_{\text{баж}}(p)}{W_{\text{нз}}(p)} = W_{3M}(p).$$

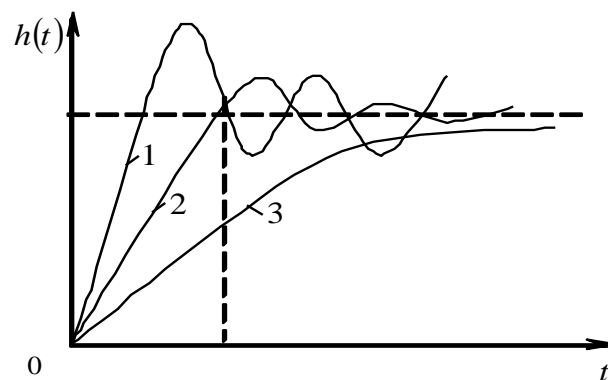
Для цього використовують такі підходи:

- технічний оптимум (модульний принцип), що забезпечує  $t_{\text{ПП}} \rightarrow \min$ , статичну похибку  $\sigma = (5...10)\%$  та абсолютну стійкість;
- симетричний оптимум, який забезпечує похибку, що прагне до нуля ( $\sigma \rightarrow 0$ ).

Прийнято, що бажана передатна функція  $W_{\text{баж}}(p)$  складається з двох ідеальних ланок: інтегруючої та аперіодичної:

$$W_{Ж}(p) = W_H(p) \cdot W_{Ap}(p) = \frac{k_H}{T_H p} \frac{k_\alpha}{T_\alpha p + 1}.$$

Відношення  $a = T_i / T_\alpha$  визначає вид перехідного процесу (рис. 11). За вибраним бажаним перехідним процесом оцінюються оптимальні параметри регулювання електроприводу у складі ММР.



- 1 - коливальний перехідний процес ( $\alpha = 1$ ;  $\xi = 0,5$ ;  $\sigma \gg 5\%$ );
- 2 - аперіодичний перехідний процес ( $\alpha = 2$ ;  $\xi = 0,707$ ;  $\sigma = 5\%$ );
- 3 - експоненціальний перехідний процес ( $\alpha = 4$ ;  $\xi = 1$ ;  $\sigma \rightarrow 0$ )

Рисунок 11 – Види перехідного процесу у ММР



Для аперіодичної ланки при припущенні, що  $k_H = k_\alpha = 1$ ,

$$W_{\text{бах апер}}(p) = \frac{1}{2T_\alpha p} \cdot \frac{1}{T_\alpha p + 1}.$$

Різновиди бажаних передавальних функцій різного виду перехідних процесів представлені в табл. 2. У таблиці вказано оптимальні ПФ розімкнених контурів регулювання відповідно до бажаного перехідного процесу в контурі.

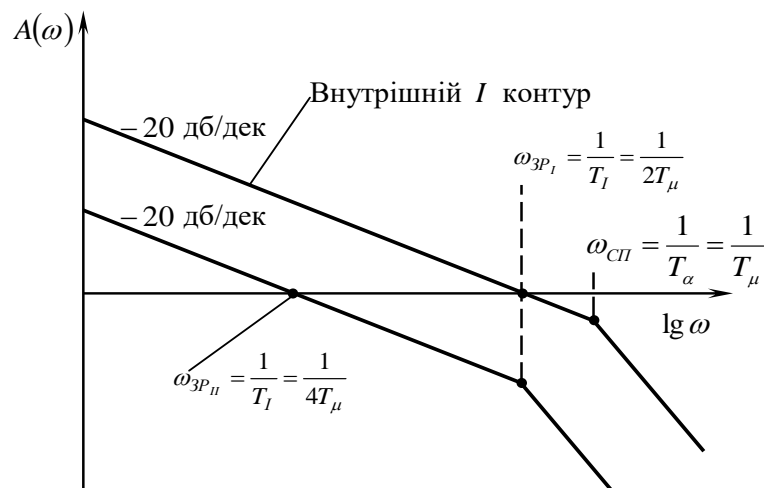
Таблиця 2 - Бажані передавальні функції розімкнених контурів управління для різного виду перехідних процесів

Вид перехідного процесу	$\alpha$	I к	II к	III к
1 Експонентний	4	$\frac{1}{4T_\alpha p(T_\alpha p + 1)}$	$\frac{1}{8T_\mu p(2T_\mu p + 1)}$	$\frac{1}{16T_\mu p(4T_\mu p + 1)}$
2 Аперіодичний	2	$\frac{1}{2T_\alpha p(T_\alpha p + 1)}$	$\frac{1}{4T_\mu p(2T_\mu p + 1)}$	$\frac{1}{8T_\mu p(4T_\mu p + 1)}$
3 Коливальний	1	$\frac{1}{T_\alpha p(T_\alpha p + 1)}$	$\frac{1}{2T_\mu p(2T_\mu p + 1)}$	$\frac{1}{4T_\mu p(4T_\mu p + 1)}$

*Примітка.* У зовнішніх контурах або під час переходу до зовнішніх контурів постійні часу інтегруючого та аперіодичного ланок збільшуються в 2 рази з метою зміщення ЛАЧХ зовнішніх контурів в область низьких частот (рис. 12).  $T_\alpha = T_\mu = T_{\text{ТП}}$  знаходяться в межах від однієї соті до п'яти тисячних - мала некомпенсована постійна. Частота сполучення  $f_c = 1/T$ .

Якщо система оптимізується за технічним оптимумом, то в системі до точки застосування навантаження з'являється одна інтегруюча ланка, тобто шуканий регулятор струму є ПІ-регулятором. Такі системи називаються астатичними чи системами з одноразовим інтегруванням. Якщо необхідно збільшити точність регулювання, застосовують системи астатичні другого порядку або з дворазовим інтегруванням. Тоді і в першому і другому контурах утворюються регулятори типу ПІ. Таким чином, в системі починають діяти дві інтегруючі ланки, вихідний сигнал буде в протифазі з вхідним при зсуві фаз  $180^\circ$ , і система абсолютно нестійка.

Для забезпечення стійкості необхідно деформувати вихідну ЛАЧХ шляхом введення в систему форсуючої або диференціюючої ланки (створюють зсув фаз - випередження). При цьому ЛАЧХ бажаної передавальної функції цієї системи набуде симетричного вигляду по відношенню до осі частот. Цей метод отримав назву симетричний оптимум.



$\omega_{зр}$  - частота зрізу;  $\omega_{сп}$  - частота сполучення

Рисунок 12 – ЛАЧХ для двоконтурної системи

Таким чином, методика оптимізації буде мати наступні етапи [3].

- 1 Складається структурна схема двоконтурного або на його основі триконтурного ММР.
- 2 На схемі виділяються змінні та незмінні частини. Частина, що змінюється, представлена регуляторами, структура яких може змінюватися. Незмінна частини представлена реальними ланками системи.
- 3 Вибирається вид бажаного оптимального перехідного процесу для кожного контуру регулювання:
  - для внутрішнього контуру струму – коливальний перехідний процес;
  - для другого контуру (регульованого приводу) - аперіодичний перехідний процес;
  - для третього контуру (електроприводу, що стежить) - монотонний (експоненційний перехідний процес).
- 4 Вибирається вид бажаної передавальної функції за видом перехідного процесу та за видом приводу.
- 5 Оптимізація починається з внутрішнього контуру відповідно до принципу послідовної корекції.
- 6 В результаті перетворень виходить передатна функція частини, що змінюється, в якості якої виступають регулятори:
  - у внутрішньому контурі – регулятор струму (зазвичай, ПІ-регулятор);
  - у зовнішньому контурі – регулятор швидкості (зазвичай, П-регулятор);
  - у контурі положення регулятор має бути пропорційним.



Розглянемо приклад оптимізації ММР як двоконтурної системи.

Оптимізація внутрішнього контуру (I к) (синтез регулятора струму):

$$W_{\text{баж I РОЗ}}(p) = W_{\text{РОЗ P I}}(p) = W_{\text{РС}}(p)W_{\text{ТП}}(p)W_{\text{Д1}}(p)W_{\text{ДС}}(p),$$

де  $W_{\text{РС}}(p)$ - невідома передатна функція регулятора струму;  $W_{\text{баж I РОЗ}}(p)$  - бажана передатна функція першого контуру, розімкнутого;  $W_{\text{РОЗ P I}}(p)$ - передавальна функція, що складається з реальних ланок у розімкнутій системі;  $W_{\text{ДС}}(p)$  - передатна функція датчика струму.

Виходячи з принципу послідовної корекції знаходимо передатну функцію регулятора струму (частина, що змінюється):

$$W_{\text{ЗМ.ч}}(p) = W_{\text{РС}}(p) = \frac{W_{\text{баж}}(p)}{W_{\text{ТП}}(p)W_{\text{Д1}}(p)W_{\text{ДС}}(p)}$$

Знаходимо бажану передатну функцію для аперіодичного процесу:

$$W_{\text{ЗМ.ч}}(p) = \frac{1}{\frac{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}{k_{\text{ТП}} \frac{k_{\text{Д1}}}{T_{\mu}p+1} k_{\text{ДС}}}}$$

де  $k_{\text{ДС}} = 1$ ;  $T_{\alpha} = T_{\mu} = T_{\text{ТП}} = 0,01 \dots 0,005$ ;  $T_{\text{Я}} = T_{\text{Е}} = \frac{L_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}}$ .

Приймаємо:  $k_{\text{ДС}} = 1$  або  $k_{\text{С}} = k_{\text{ДС}}$ , що те саме.

$$W_{\text{ЗМ.ч}}(p) = \frac{T_{\text{Е}}p+1}{2T_{\mu}pk_{\text{ТП}}k_{\text{Д1}}} = \frac{T_1p+1}{T_2p},$$

де  $\frac{T_1p+1}{T_2p}$  - пропорційно-інтегруючий (ПІ) регулятор.

Нехай  $T_{\text{Е}} = T_1$ , а  $2T_{\mu}pk_{\text{ТП}}k_{\text{Д1}} = T_2$  тоді

$$W_{\text{ЗМ.ч}}(p) = k_{\text{С}}\Delta x + k_{\text{ТІ}} \int_{T_1}^{T_2} \Delta x dt,$$

Де  $k_{\text{С}}\Delta x$  - пропорційна частина (П),  $k_{\text{ТІ}} \int_{T_1}^{T_2} \Delta x dt$  - інтегруюча частина (І).

Таким чином, регулятор струму – це ПІ-регулятор, який розташований до точки застосування навантаження.

Перший контур є астатична система першого порядку (з одноразовим інтегруванням).

Оптимізація зовнішнього контуру (синтез регулятора швидкості).

Передаточну функцію замкнутого першого контуру  $W_{I\text{КЗ}}$  (див. рис. 13) знаходимо за відомими правилами для знаходження передавальних функцій замкнутих систем:

$$W_{I\text{КЗ}}(p) = \frac{W_{\text{баз I}}(p)}{1 + W_{\text{баз I}}(p)W_{\text{ДС}}(p)},$$

$$W_{I\text{КЗ}}(p) = \frac{\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}}{1 + \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)}} = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)+1} = \frac{1}{2T_{\mu}^2p^2+2T_{\mu}p+1} \approx \frac{1}{2T_{\mu}p+1}$$

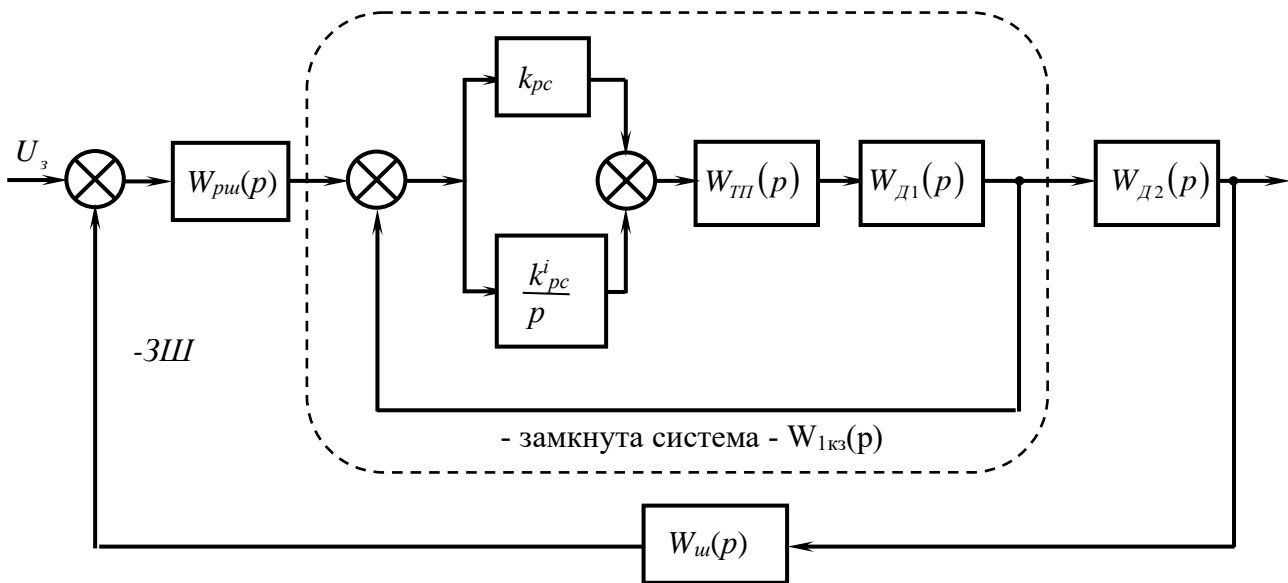


Рисунок 13 – Структурна схема контуру швидкості

Синтез невідомої незмінної частини (регулятора швидкості) виробляємо відповідно до методики для контуру струму (рис. 14).

$$W_{\text{баз II роз}}(p) = W_{\text{Р II роз}}(p) = W_{\text{РШ}}(p)W_{I\text{КЗ}}(p)W_{\text{Д2}}(p)W_{\text{ДШ}}(p),$$

$$W_{\text{РШ}}(p) = \frac{W_{\text{баз II аперіод.роз.сист}}(p)}{W_{I\text{КЗ}}(p)W_{\text{Д2}}(p)W_{\text{ДШ}}(p)} = \frac{W_{\text{баз II аперіод.роз.сист}}(p)}{W_{I\text{КЗ}}(p)W_{\text{Д2}}(p) \cdot 1},$$

де приймається, що  $W_{\text{ДШ}}(p) = 1$ .

$$W_{\text{РШ}}(p) = \frac{\frac{1}{4T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)}}{\frac{1}{2T_{\mu}p+1} \cdot \frac{k_{\text{Д2}}}{1}} = \frac{T_{\text{М}}p}{4T_{\mu}pk_{\text{Д2}}} = \frac{T_1}{T_2} = k^{\square},$$

$$\text{де } T_{\mu} = T_{\text{ТП}}; T_{\text{М}} = \frac{J\text{R}}{(k\Phi)^2}; T_1 = T_{\text{М}}; T_2 = 4T_{\mu}k_{\text{Д2}}.$$

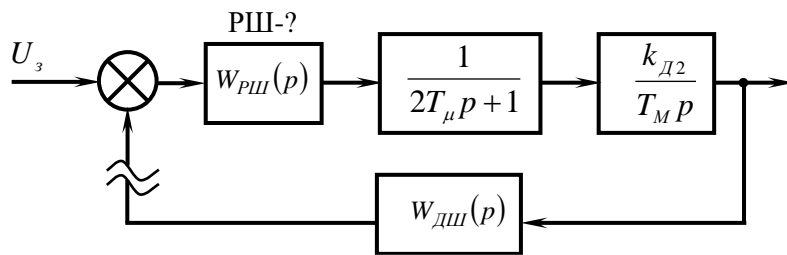


Рисунок 14 – Оптимізація контуру швидкості

Отже, у процесі синтезу контуру швидкості ми отримали структуру П-регулятора.

#### 1.4 Методика побудови перехідних процесів на основі використання структурної схеми мехатронного модулю руху

Етапи побудови перехідних процесів такі [3]:

- 1 Складається структурна схема ММР з електроприводом для підлеглого регулювання (на рис. 15 наведено приклад двоконтурної системи).
- 2 Виділяються та нумеруються динамічні ланки системи, в передавальних функціях яких містяться оператори диференціювання  $p$  (Або комплексні числа).
- 3 Нумеруються вхідні та вихідні сигнали кожної ланки.
- 4 Нумеруються коефіцієнти та постійні часу відповідно до номера ланки.

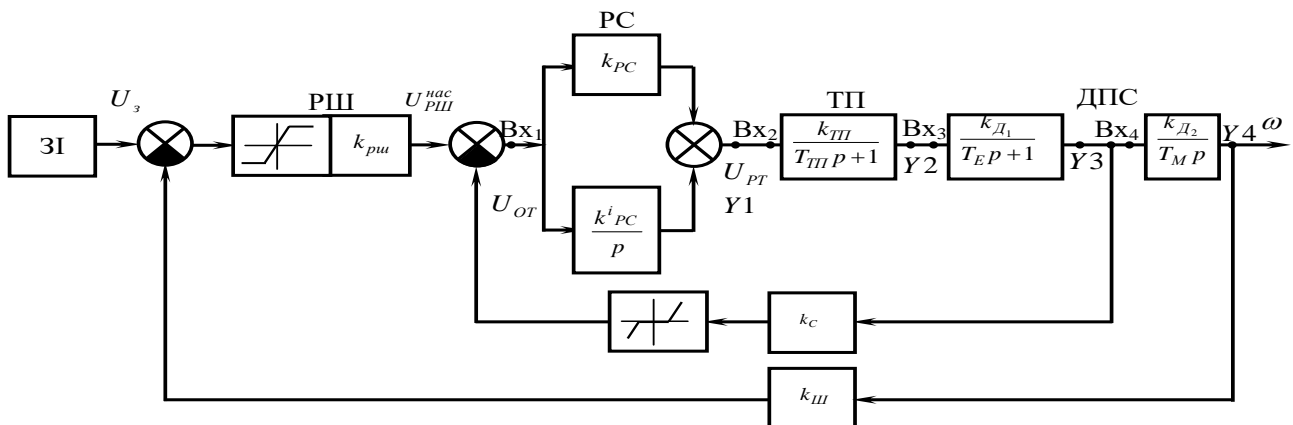


Рисунок 15 – Структурна схема двоконтурної САУ ЕП

- 5 Використовуються передавальні функції ланок для складання диференціальних рівнянь у формі рівнянь Коші:

$\Delta y = f(k, T)$ - звичайне диференціальне рівняння;

$\frac{dy}{dt} = f(k, T)$ - Диференційне рівняння у формі рівнянь Коші.

Диференціальне рівняння у формі рівнянь Коші передбачає знаходження похідної регульованого параметра.

- 6 Складаються рівняння алгебри зв'язку для вхідних сигналів.  
 7 Складається таблиця вихідних даних для машинної обробки диференціальних рівнянь у формі рівнянь Коші та рівнянь зв'язку з метою графічного представлення цих рішень (криві перехідних процесів для сили струму та швидкості-  $i(t)$ ,  $\omega(t)$ ).

Розглянемо приклад.

1, 2, 3 та 4-й пункти представлені на рис. 16.

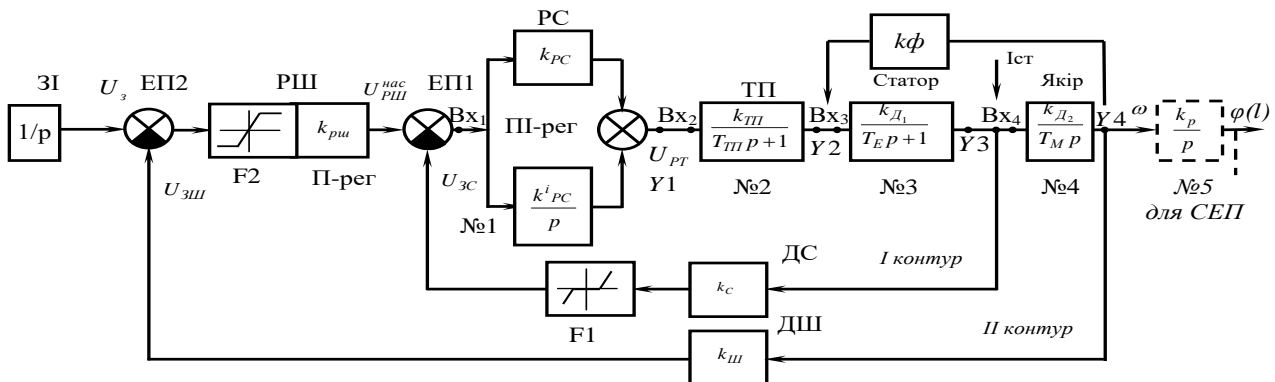


Рисунок 16 – Структурна схема двоконтурного ММР

5 Складаємо рівняння Коші для регулятора струму, ланка № 1 (РС):

$$W(p) = \frac{\Delta Y_1(p)}{V_{X1}(p)} = \frac{k_{pc}^i}{p}$$

Знаходимо  $\Delta y_1(p)$ :

$$\Delta Y_1(p) = \frac{k_{pc}^i \cdot V_{X1}(p)}{p},$$

$$\Delta Y_1(p)p = Y_1(p)p = k_{pc}^i \cdot V_{X1}(p),$$

$$Y_1 p = Y_1',$$

де  $p$  - оператор диференціювання.

$$p = \frac{d}{dt}$$

Диференціальні рівняння Коші:

$$Y_1 p = Y_1' = k_{pc}^i \cdot B_{X1}$$

Складаємо рівняння Коші для тиристорного перетворювача, ланка №2:

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{k_{\text{ТП}}}{T_{\mu}p+1} = \frac{Y_2}{Bx_2};$$

$$T_{\text{ТП}} = T_{\mu}; Y_2 = \frac{k_{\text{ТП}}Bx_2}{T_{\mu}p+1},$$

$$Y_2(T_{\mu}p + 1) = k_{\text{ТП}}Bx_2,$$

$$Y_2T_{\mu}p + Y_2 = k_{\text{ТП}}Bx_2,$$

$$Y_2p = \frac{k_{\text{ТП}}Bx_2 - Y_2}{T_{\mu}}.$$

Перейдемо до третьої ланки (Д1):

$$W_{\text{Д1}}(p) = \frac{k_{\text{Д1}}}{T_{\text{Э}}p+1} = \frac{Y_3}{Bx_3},$$

$$Y_3 = \frac{k_{\text{Д1}}Bx_3}{T_{\text{Э}}p+1},$$

$$Y_3p = \frac{k_{\text{Д1}}Bx_3 - Y_3}{T_{\text{Э}}}.$$

Проаналізуємо ланку № 4 (Д2):

$$W_{\text{Д2}}(p) = \frac{k_{\text{Д2}}}{T_{\text{М}}p} = \frac{Y_4}{Bx_4},$$

$$\frac{Bx_4k_{\text{Д2}}}{T_{\text{М}}p} = Y_4,$$

$$pY_4 = \frac{Bx_4k_{\text{Д2}}}{T_{\text{М}}}.$$

6 Визначаємо входи та складаємо рівняння зв'язків.


Складемо рівняння зв'язку для  $Bx_1$ :

$$(U_3 - U_{3\text{Ш}})k_{\text{РШ}} - U_{3\text{С}} = Bx_1,$$

де  $(U_3 - U_{3\text{Ш}})k_{\text{РШ}} = U_{\text{РШ}}$ ;  $U_{\text{ОС}} = I_{\text{Д}}k_{\text{С}} - U_{3\text{Р1}}$ .

$$Bx_1 = (U_3 - U_{3\text{Ш}})k_{\text{РШ}} - (I_{\text{Д}}k_{\text{С}} - U_{3\text{Р1}}).$$

Складемо рівняння зв'язку для  $Bx_2$ :


$$Bx_2 = Y_1 + Bx_1 \cdot k_{PC}.$$

Складемо рівняння зв'язку для  $Bx_3$ :

$$Bx_3 = Y_2 - k\Phi\omega.$$

Складемо рівняння зв'язку для  $Bx_4$ :

$$Bx_4 = y_3 + I_{CT}.$$

## 1.5 Моделювання мехатронного модулю руху

Системи електроприводів із підлеглим регулюванням знайшли широке застосування в мехатронних модулях руху. Регулятори швидкості, струму, напруги та інших змінних параметрів у таких системах зазвичай виконуються на базі операційних підсилювачів, що дозволяють порівняно легко створити велику різноманітність ланок, що коригують.

Структурні схеми систем підлеглого регулювання містять типові ланки САК, у зв'язку з чим їхнє моделювання доцільно здійснювати структурним методом. Суть структурного моделювання у тому, що типові ланки з'єднуються у моделі у тому ж порядку, як у структурній схемі модулю або системи.

Практикум з моделювання проводиться за допомогою програмного забезпечення MATLAB [6,8].

Структурну схему моделі такого мехатронного модулю руху та бази системи регульованого електроприводу показано на рис. 17. Вона включає два контури регулювання: контур регулювання струму, що складається з регулятора струму, тиристорного перетворювача (ТП) і ланцюга якоря двигуна; контур регулювання швидкості, що включає регулятор швидкості, контур струму і інтегруюча ланка, що відображає в структурній схемі механічну частину електродвигуна.

На схемі двигун постійного струму представлений у вигляді двох послідовно включених ланок - аперіодичного та інтегруючого, охоплених негативним зворотним зв'язком по е.р.с. Аперіодична ланка відповідає ланцюгу ТП-якір, включаючи електромеханічне перетворення енергії:

$$W_{я}(p) = \frac{M(p)}{e_{п}(p) - e_{дв}(p)} = \frac{c i_{я}(p)}{e_{п}(p) - e_{дв}(p)} = \frac{c R_{я}}{T_{я} p + 1},$$

де  $e_{п}(p)$ ,  $M(p)$ ,  $e_{дв}(p)$ ,  $i_{я}(p)$  — зображення е.р.с. ТП, а також моменту, е.р.с. і струму якоря двигуна;  $T_{я}$  - постійна часу ланцюга якоря.

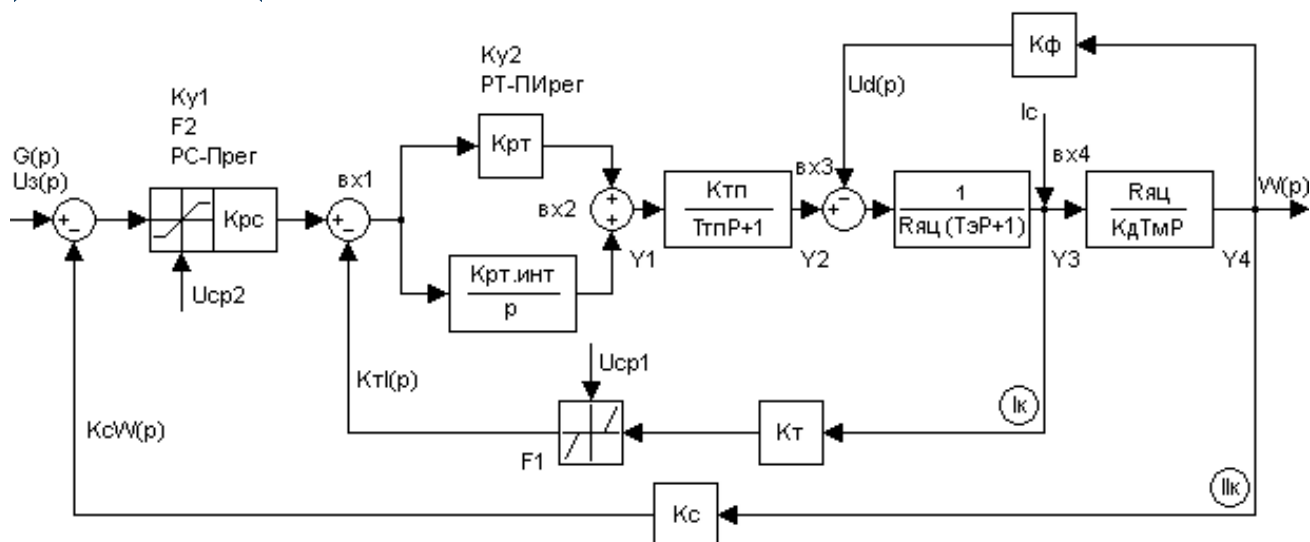


Рисунок 17 - Структурна схема моделі ММР

Інтегруюча ланка відповідає жорсткій механічній ланці електроприводу. Його передатна функція:

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{M_{ДВ}(p) - M_{МЕХ}(p)} = \frac{1}{Jp} = \frac{R_Я}{T_M c^2 p'}$$

де  $M_{МЕХ}(p)$  - зображення приведенного до валу двигуна моменту опору механізму;  $\omega(p)$  - зображення кутової швидкості двигуна;  $J$ ,  $T_M$  - момент інерції та електромеханічна постійна часу електроприводу;  $R_Я$  - опір ланцюга "ТП - якір двигуна".

Тиристорний перетворювач разом із системою управління подається у вигляді аперіодичної ланки з коефіцієнтом посилення  $k_{П}$  і постійної часу  $T_{П}$ :

$$W_{Т.П.}(p) = \frac{k_{П}}{T_{П}p + 1}$$

Розглянута схема забезпечує можливість налаштування ММР з мінімальною величиною перерегулювання в кривих струму та швидкості (близько 5%), при статичному перепаді кутової швидкості, що визначається параметрами системи за такою формулою:

$$\Delta\omega_C = \frac{4T_{П}}{T_M} \Delta\omega_{СРАЗ}$$

де  $\Delta\omega_{СРАЗ}$  - перепад швидкості в розімкнутій системі;  $T_{П}$ ,  $T_M$  - постійні часу відповідно перетворювача та електромеханічна.



Статичний перепад швидкості залежить від співвідношення  $4T_p/T_m$ . Для зменшення статизму у ряді випадків використовують системи з дво-разовим інтегруванням, коли регулятор швидкості виконується також пропорційно-інтегральним. І тут має місце астатична система, але характер перехідного процесу погіршується. Перерегулювання в кривій струму досягає 30-40%.

Для обмеження величини струму ланцюга якоря двигуна регулятор швидкості шунтують стабілітронами або спеціальними блоками обмеження. Налаштування параметрів електроприводу в системах підпорядкованого регулювання відрізняється переважно тим, що можна проводити налаштування окремих контурів послідовно одного за іншим. У двоконтурних системах спочатку настроюють контур струму при відключеному збудженні двигуна. У цьому випадку двигун розглядається як інерційна ланка. При подачі стрибкоподібного сигналу вхід  $P_c$  налаштовується бажаний характер перехідного процесу струму  $i(t)$ . Потім включається збудження двигуна та налаштовується контур швидкості -  $P_{ш}$ .

Такий самий порядок рекомендується для налаштування системи на моделі. Спочатку моделюється контур струму та перевіряється характер перехідного процесу. Після перевірки правильності контуру струму збирається вся схема моделі.

У системі електроприводу, що входить до ММР, застосовуються затримані зворотні зв'язки (з відсіченнями), які вступають у дію за певних значеннях контрольованих параметрів. Вимкнення або включення зворотних зв'язків здійснюється за допомогою спеціальних ключів у вигляді нелінійних елементів (НЕ).

Реалізація нелінійних елементів НЕ1 (у регуляторі струму) та НЕ2 (у регуляторі швидкості) показана на рис. 18 і 19 відповідно.

Розглянемо моделювання ММР на базі слідкуючого електроприводу. Завданням таких модулів є робота з механізмами, що забезпечують переміщення виконавчого органу (ВО) відповідно до керуючого (вхідного) сигналу, що змінюється за довільним законом [3,9].

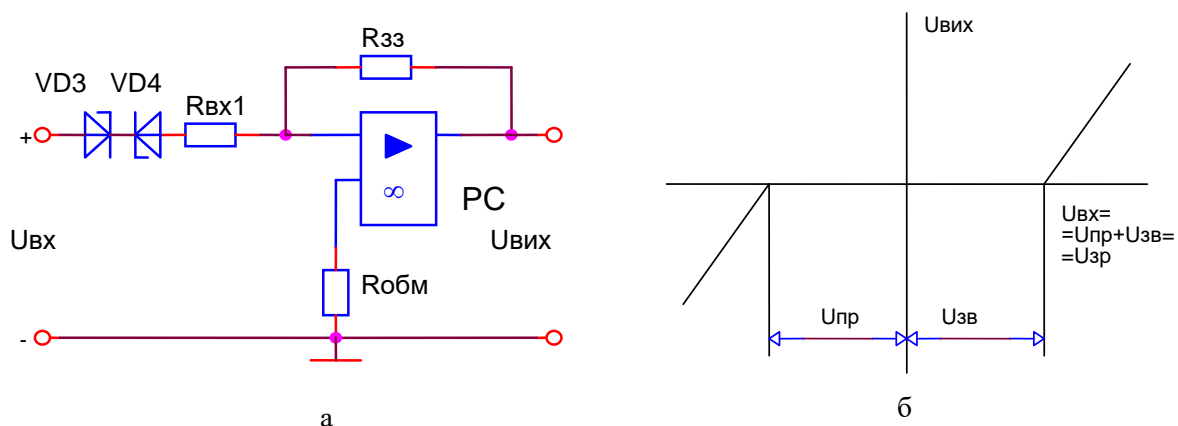


Рисунок 18 – Схемна реалізація регулятора струму (а) та статична характеристика НЕ1 – зони нечутливості (б)

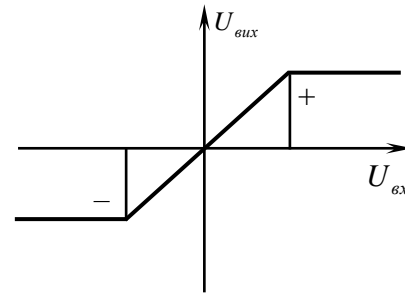
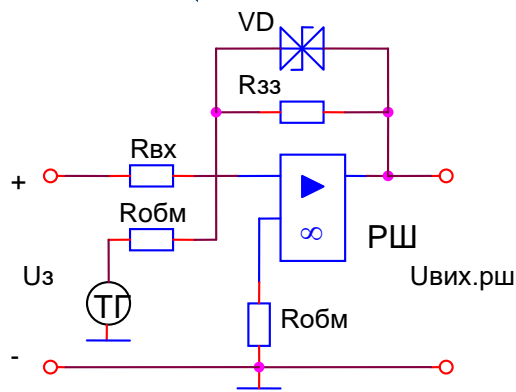
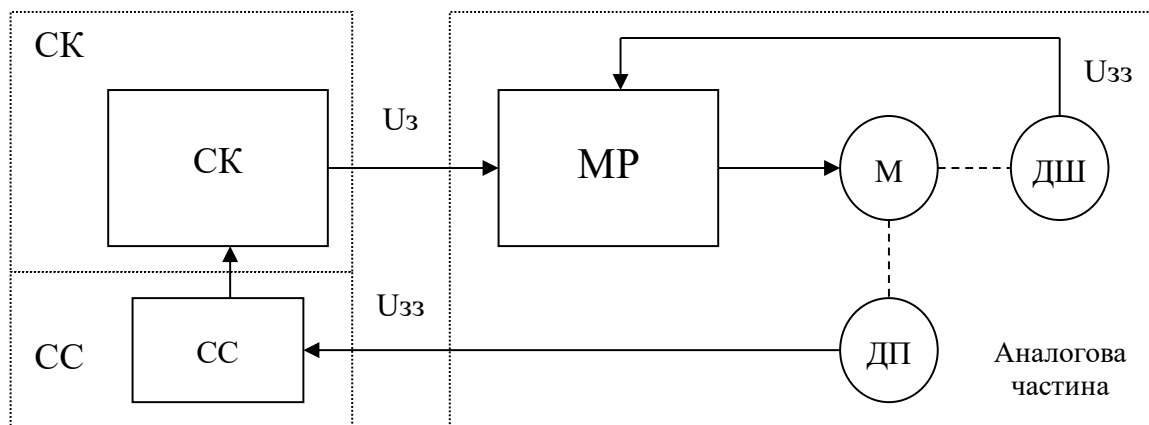


Рисунок 19 – Схемна реалізація регулятора швидкості (а) та статична характеристика НЕ2 – зони насичення (б)

Функціональна схема мехатронного модулю наведена на рис. 20.



СК – система керування; МР – модуль руху; СС - схема сполучення; ДП – датчик положення; ДШ – датчик швидкості; М – двигун

Рисунок 20 – Реалізація слідкуючого ММР

При цьому виділяють 2 групи систем, що стежать:

- системи позиціонування, здійснюють режим управління положенням (лінійним  $L$  або кутовим  $\varphi$ ), при якому завданням системи є переміщення робочого органу з одного фіксованого положення в інше. Вхідна дія при цьому є одиничним стрибком:  $g(t) = Qv_x(t) = 1(t)$ ;

- системи, що стежать, здійснюють відтворення вхідного сигналу, що наростає з постійною швидкістю  $[g(t)=V(t)]$ , з постійним прискоренням  $[g(t)=at^2/2]$ , або гармонійного сигналу  $[g(t)=\theta\sin\omega t]$ . У цьому  $g(t)=Vt$  називають лінійно наростаючим, а  $g(t)=at^2/2$  - квадратичним сигналом.

ММР слідкуючого типу розглядається з позиції теорії підлеглого регулювання з послідовною корекцією (послідовним включенням регуляторів). Як відомо, величина помилки в режимі, що встановився, залежить від порядку астатизму (числа інтегруючих ланок у системі) -  $u$ .

Статичні системи ( $u=0$ ) під час управління положенням робочого органу [ $g(t)=\theta_{\text{вх}}(t) = \text{const}$ ] мають помилку, що встановилася, звану статичною або помилкою за положенням:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{\theta_{\text{вх}}}{1+K_c},$$

де  $K_c$  - коефіцієнт передачі розімкнутої САУ.

При управлінні швидкістю переміщення робочого органу  $g(t)=Vt$  або прискоренням  $g(t)=at^2/2$  в статичних системах помилки, що встановилися, зростають необмежено  $\sigma_{\text{ст}} \rightarrow \infty$ .

У астатичних системах I порядку ( $u = 1$ ) при управлінні положенням, швидкістю та прискоренням робочого органу помилки визначаються:

- за положенням  $-\sigma_{\text{ст}} = 0$ ;
- за швидкістю  $-\sigma_{\text{ст}}=a1V/K_v$ ;
- по прискоренню  $-\sigma_{\text{ст}} \rightarrow \infty$ .

Тут  $V$  - швидкість зміни вхідного сигналу;  $K_v$  - коефіцієнт передачі розімкнутої системи за швидкістю (добротність системи за швидкістю);  $a1$  - коефіцієнт передавальної функції розімкнутої системи.

В астатичних системах II порядку ( $u = 2$ ) помилки, що встановилися, за положенням і швидкістю компенсуються ( $\sigma_{\text{ст}} = 0$ ), а прискорення при квадратичному сигналі дорівнює  $\sigma_{\text{ст}} = a/K_a$ , де  $a$  - прискорення зміни вхідного сигналу;  $K_a$  - добротність системи прискорення.

Як випливає з наведеного, величини помилок при порядку астатизму визначаються також величиною, швидкістю та прискоренням вхідного сигналу і знаходяться у зворотній залежності від коефіцієнта передачі системи  $K_c$ . Останній визначає стійкість САУ – при необмеженому зростанні похибка може бути повністю компенсована, проте стійкість буде порушена. Тому між якістю (величиною  $\sigma_{\text{ст}}$ ) та стійкістю існує протиріччя, яке вирішується вибором компромісного значення.

Апаратне рішення ММР, що стежать, зазвичай складається з системи ТП-Д з активними коригуючими ланками послідовного впливу – регуляторами на операційних підсилювачах [9,10]. На відміну від схеми регулювання швидкості в системі стеження є ще одна інтегруюча ланка, що відповідає перетворенню кутової швидкості двигуна  $\omega_{\text{дв}}$  в кут повороту об'єкта регулювання  $\varphi_{\text{вих}}$ . Його передатна функція за відсутності проміжків у редукторі має вигляд

$$W_{\text{РЕД}}(p) = \frac{Q_{\text{ВИХ}}(p)}{\omega_{\text{ВИХ}}(p)} = \frac{k_p}{p} = \frac{i}{ip},$$

де  $i$  - передатне відношення редуктора.

Пристрої для вимірювання кута неузгодженості (СС)  $-\delta = Q_{\text{ВХ}} - Q_{\text{ВИХ}}$  і фазовий детектор, що виконує функції регулятора положення, відповідає пропорційне ланка з коефіцієнтом посилення  $k$  (у разі  $k = K_{\text{рп}}$ ), тобто.

$$W_{\text{ВИМ}}(p) = \frac{u\delta(p)}{\delta(p)} = k_{\delta}.$$

У ММР, що стежить, де не використовуються контури регулювання струму і швидкості, передавальна функція регулятора кута повинна вибиратися з умови забезпечення заданих значень добротності за швидкістю, прискоренням і ривком. В цьому випадку необхідне використання ПІД - регулятора з функцією передавання

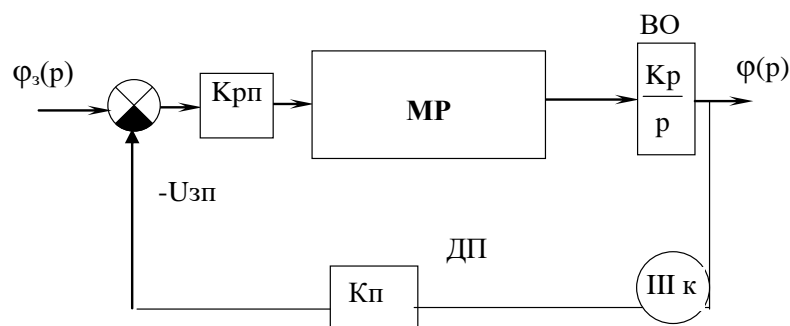
$$W_{K1} = \frac{(T_{K1}p + 1)(T_{K2} + 1)}{T_{Ka}p},$$

де  $T_{K1}$  - низькочастотна постійна часу диференціювання, що забезпечує стійкість системи;  $T_{K2}$  - високочастотна постійна часу диференціювання, що підвищує динамічні властивості системи;  $T_{K3}$  - постійна часу інтегрування, що забезпечує обмеження прискорення приводу та компенсує швидкісну помилку системи.

На практиці для забезпечення заданих значень кута неузгодженості у статичних та динамічних режимах достатньо використовувати ПІ – регулятор з передатною функцією

$$W_{K\Gamma}(p) = \frac{T_{K1}p + 1}{T_{Ka}p}.$$

Відповідно до структурної схеми на рис. 20 та передатними функціями її ланок на рис. 17 представлена схема моделі ММР на базі електроприводу, що стежить, реалізованого на базі моделі модулю руху (рис. 21).



ВО – виконавчий орган;  $\varphi_z(p), \varphi(p)$  – кут завдання та фактично відпрацьований відповідно; ДП – датчик положення;  $K_{рп}, K_{р}, K_{п}$  - коефіцієнти передачі регулятора положення, редуктора і датчика положення відповідно;  $U_{зп}$  – значення напруги у зворотному зв'язку за положенням

Рисунок 21 – Схема моделі ММР, що стежить



## 1.6 Контрольні запитання

1. Мехатронний підхід в автоматизації технологічних процесів
2. Узагальнена схема машин з комп'ютерним керуванням руху.
3. Апаратні та технічні засоби мехатронних систем.
4. Відмінності та схожість схем системи електроприводу та мехатронної системи.
5. Відмінності та схожість структурних схем систем керування та регулювання.
6. Проектування ММР.
7. Фізична реалізація ММР.
8. Особливості кінематики ММР.
9. Ієрархія керування в мехатронних системах.
10. Інтелектуальне керування в мехатронних системах.
11. Особливості синтезу багатоконтурних систем автоматичного керування електроприводом у складі ММР.



## 2 КОРОТКА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПАКЕТ MATLAB

### 2.1 Система MatLab

*MatLab* - це високопродуктивна мова для технічних розрахунків. Він включає обчислення, візуалізацію та програмування у зручному середовищі, де завдання та рішення виражаються у формі, близькій до математичної. Типове використання *MatLab*: математичні обчислення; створення алгоритмів; моделювання; аналіз даних, дослідження та візуалізація; наукова та інженерна графіка; розробка програм, включаючи створення графічного інтерфейсу.

Слово *MatLab* означає матричну лабораторію (matrix laboratory). *MatLab* був спеціально написаний для забезпечення легкого доступу до LINPACK та EIS PACK, які є сучасними програмними засобами для матричних обчислень. Він розвивався, орієнтуючись на різних користувачів. В університетському середовищі він є стандартним інструментом для роботи в різних галузях науки. У промисловості *MatLab* - це інструмент для високопродуктивних досліджень, розробок та аналізу даних.

У *MatLab* важлива роль відводиться спеціалізованим групам програм, які називаються інструментами. Вони дуже важливі для більшості користувачів *MatLab*, оскільки дозволяють вивчати та застосовувати спеціалізовані методи. Toolboxes – це всебічна колекція функцій *MatLab* (М-файлів), які дозволяють вирішувати приватні класи завдань. Toolboxes застосовуються для обробки сигналів, систем контролю, нейронних мереж, нечіткої логіки, вейвлетів, моделювання тощо.

### 2.2 Структура MatLab

Система *MatLab* складається з п'яти основних частин:

- *Мова MatLab* - це мова матриць і масивів високого рівня з управлінням струмами, функціями, структурами даних, введенням-виводом та особливостями об'єктно-орієнтованого програмування. Це дозволяє програмувати як у "невеликому масштабі", для швидкого створення чорнових програм, так і у "великому" – для створення великих та складних програм.
- *Середа MatLab* - це набір інструментів та пристроїв, з якими працює користувач або програміст *MatLab*. Вона включає засоби для управління змінними в робочому просторі *MatLab*, введенням та виведенням даних, а також для створення, контролю та налагодження М-файлів та додатків *MatLab*.
- *Керована графіка* - це графічна система *MatLab*, яка включає команди високого рівня для візуалізації двох- і тривимірних даних, обробки зображень, анімації та ілюстрованої графіки. Вона також включає команди низького рівня, що дозволяють повністю редагувати зовнішній вигляд графіки, як при створенні Графічного Інтерфейсу користувача (GUI) для *MatLab*-додатків.

• *Бібліотека математичних функцій* - це велика колекція обчислювальних алгоритмів від елементарних функцій, як-от сума, синус, косинус, комплексна арифметика, до складніших, як-от звернення матриць, знаходження власних значень, функції Бесселя, швидке перетворення Фур'є.

• *Програмний інтерфейс* - це бібліотека, що дозволяє писати програми на Сі та Фортрані, які взаємодіють з *MatLab*. Вона включає засоби для виклику програм з *MatLab* (динамічний зв'язок), для виклику *MatLab* як обчислювальний інструмент і для читання-запису MAT-файлів і програм Simulink і Real-Time Workshop.

*Simulink* – супутня *MatLab* програма, інтерактивна система моделювання нелінійних динамічних систем. Вона являє собою середовище, кероване мишею, яке дозволяє моделювати процес шляхом перетягування блоків діаграм на екрані та їх маніпуляції. Simulink працює з лінійними, нелінійними, безперервними, дискретними, багатовимірними системами.

*Blocksets* - доповнення Simulink, які забезпечують бібліотеки блоків для спеціальних програм - зв'язок, обробка сигналів, енергетичні системи.

*Real-Time Workshop* - програма, що генерує С-код із блоків діаграм та запускати їх на виконання на різних системах реального часу.

## 2.3 Робота в MatLab

У цьому практичному курсі з моделювання будемо проводити дослідження в середовищі програми Simulink. Для роботи з програмою Simulink необхідно запустити *MatLab*, у результаті відкриється вікно (рис.22).

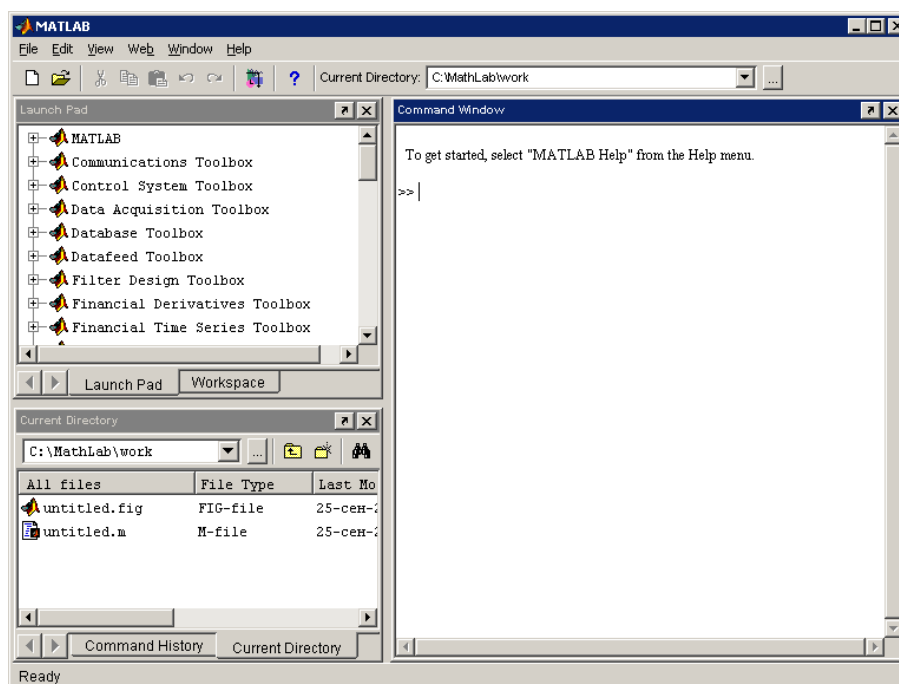


Рисунок 22 – Вікно MatLab

Для переходу до Simulink виконується команда: File-New-Model. З'явиться наступне вікно (рис. 23).

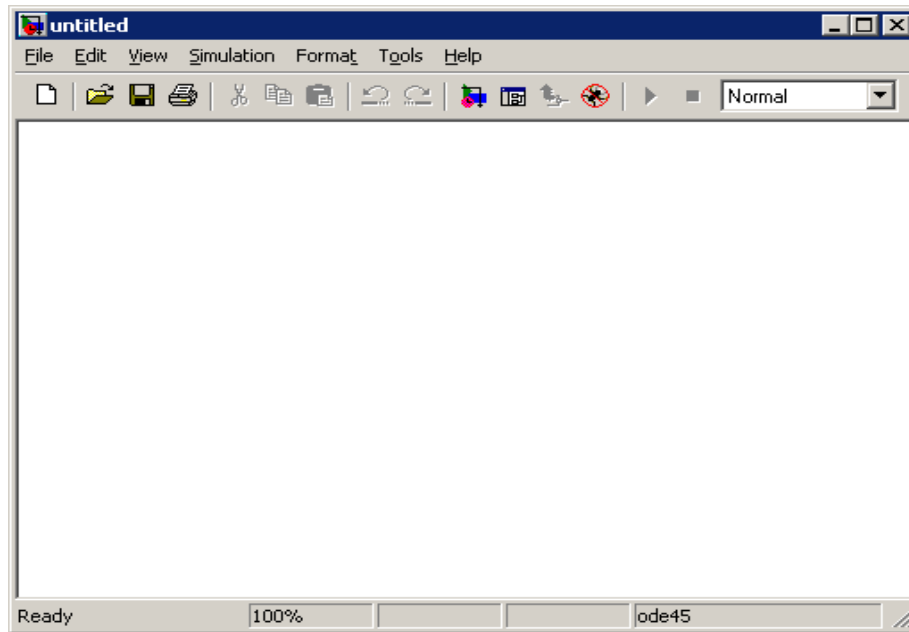





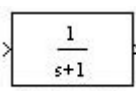



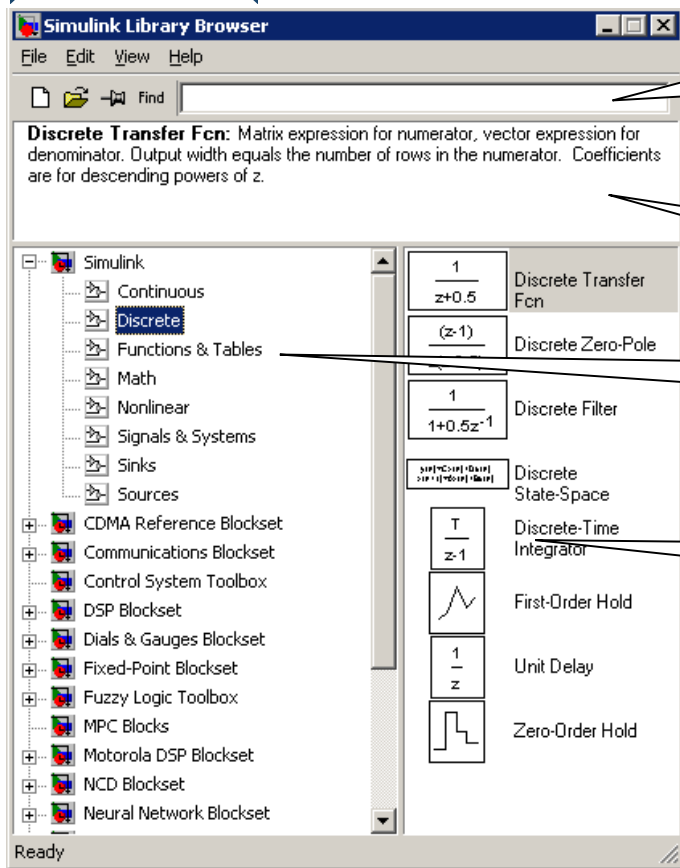


Рисунок 23 – Вікно MatLab з новою моделлю

Це і є робоча область, куди переміщатимуться готові блоки для моделювання систем. Всі блоки розміщуються в Library Browser (  - Перебувати на панелі інструментів). Library Browser являє собою провідник, що складається з трьох частин і панелі інструментів (рис. 24).

У ході виконання практичних робіт будуть використовуватися блоки:

- Constant* 
- Saturation* 
- Gain* 
- Scope* 
- Transfer Fcn* 
- Mux* 
- Dead Zone* 
- Sum* 



Поле пошуку блоку за ключовим виразом (наприклад, назва блоку) або символами (деякі літери з назви)

У цій частині наводиться опис обраного блоку

У цій галузі відбувається вибір потрібної вам категорії блоків

А тут безпосередньо вибирається необхідний блок

Рисунок 24 – Вікно Library Browser

Переміщення об'єктів на робочу область проводиться шляхом перетягування блоку за допомогою мишки (утримуючи ліву клавішу) або з контекстного меню правої кнопки Add to 'найменування\_проекту'. Для операцій з блоками (обертання, зміна напрямку блоку) використовується контекстне меню правої кнопки миші на робочій області *Формат* (рис. 25).

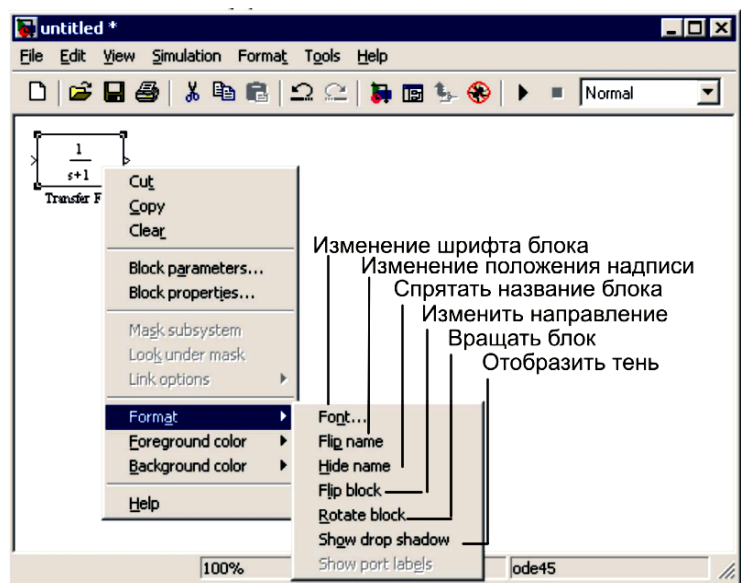


Рисунок 25 – Область *Формат*

Для зміни параметрів блоку використовується або контекстне меню правої кнопки миші *Block Parameters* (рис. 26), або подвійне клацання лівою кнопкою на блоці (приклад для блоку Transfer Fcn).

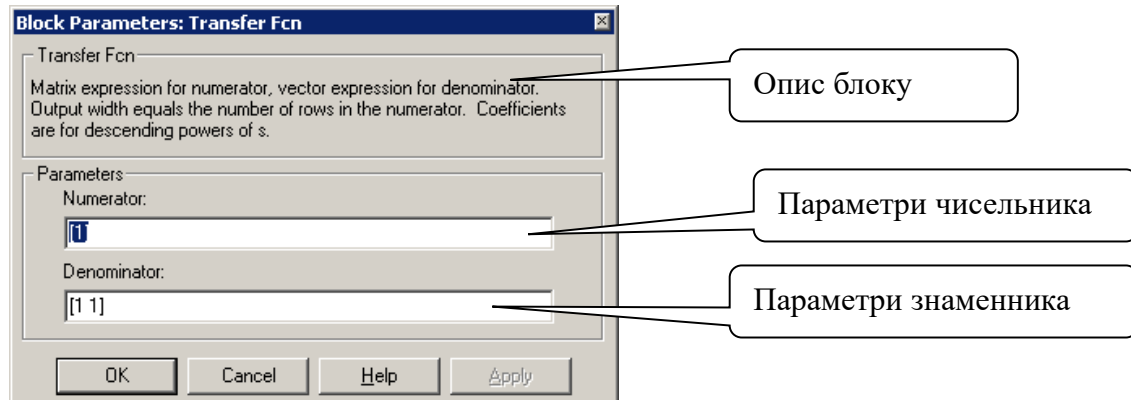


Рисунок 26 – Контекстне меню *Block Parameters*

Причому, якщо вам необхідно отримати функцію виду  $\frac{1}{s}$ , то параметри знаменника слід вводити  $[1 \ 0]$ , а не  $[1 \ 1]$ .

З'єднання блоків роблять шляхом наведення курсору миші на вихід блоку (курсор змінюється на хрестик) і, утримуючи ліву кнопку миші, з'єднують з потрібної точки (до наступного блоку або до місця з'єднання провідників).

Таким чином, задаючи значення передавальних функцій блоків та з'єднуючи їх між собою, можна отримати модель практично будь-якого механізму.

При виконанні робіт, де потрібна зміна параметрів елемента Gain, можливе застосування елемента Slider Gain (Slider — Повзунок(Слайдер)). Цей елемент характерний можливістю динамічної зміни параметра шляхом переміщення повзунка. Режим зміни активізується шляхом подвійного

клацання на іконці елемента (  ). При цьому відчиниться вікно (рис. 27).



Рисунок 27 – Вікно Slider Gain



При необхідності можна використовувати елементи подібні до Slider Gain, представлені на рис. 28.

Слід врахувати, що це елементи, на відміну Slider Gain, мають лише вихідну точку.

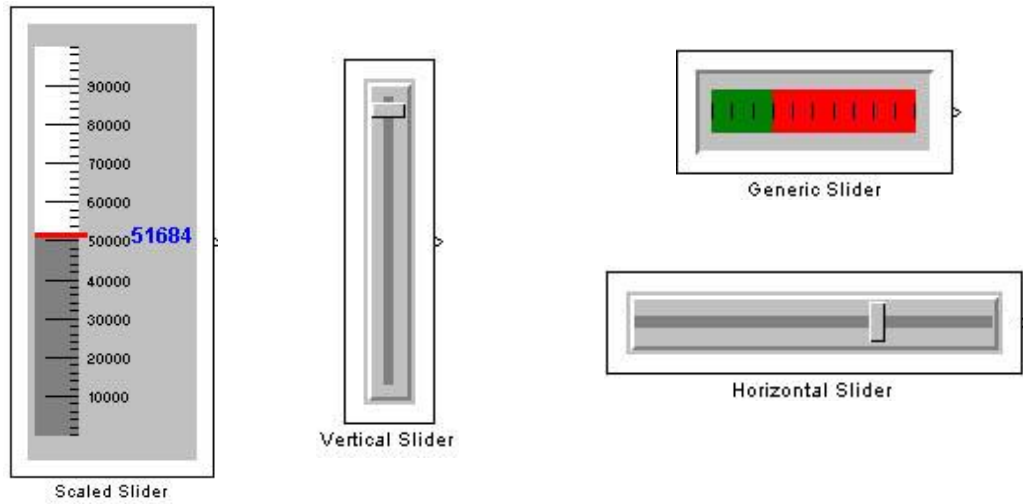


Рисунок 28 – Елементи, подібні до Slider Gain

## 3 ПРАКТИКУМ З МОДЕЛЮВАННЯ

### 3.1 Практична робота №1.

#### Моделювання та дослідження одноконтурного мехатронного модулю руху

##### Мета роботи:

- 1 Ознайомитись з особливостями одно контурного ММР на базі електроприводу постійного струму.
- 2 З'ясувати вплив коефіцієнтів структурних блоків ММР на динаміку перехідних процесів.
- 3 Набути навички роботи з пакетом MatLab.

##### Вихідні дані:

Структурна схема одно контурного ММР на базі ЕП постійного струму; коефіцієнти системи:  $U_z = 10$  В,  $U_{zр2} = 0.31$ ,  $K_{\phi} = 2.01$ ,  $K_{рш} = 5.17$ ,  $K_{ш} = 0.09$ ,  $K_{тп} = 37.5$ ,  $K_{д1} = 0.545$  Р/В,  $K_{д2} = 0.9$  Р/В,  $I_c = 3.7$  А,  $T_m = 0.4$  с,  $T_e = 0.017$  с,  $T_{тп} = 0.005 \dots 0.01$  с.

##### Завдання:

- 1 Згідно зі структурною схемою одно контурного ММР зібрати його модель в середовищі *MatLab* (рис. 29).
- 2 Отримати (на елементі Scope) вихідний перехідний процес по струму та швидкості. У разі потреби зробити корекцію коефіцієнтів моделі. На вигляд перехідного процесу оцінити якість регулювання.

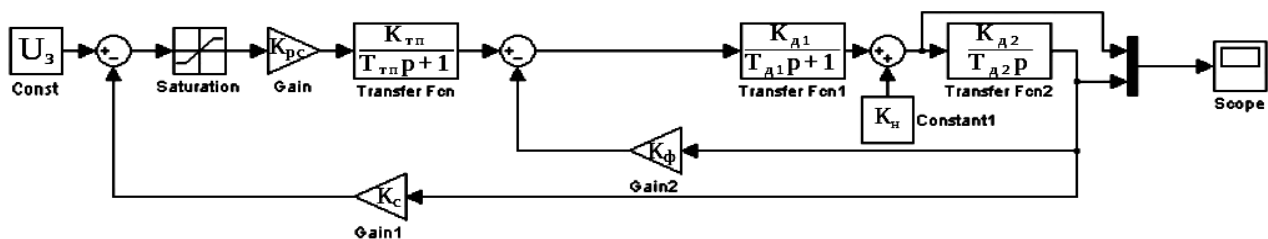



Рисунок 29 – Модель одноконтурного ММР

3 Оцінити вплив на динаміку перехідного процесу коефіцієнтів:  $K_{рш}$ ,  $K_{ш}$ ,  $K_{д1}$ ,  $K_{д2}$ ,  $K_{тп}$ ,  $K_{\phi}$ ,  $K_{с}$ ,  $U_{zр2}$ . (Навести графіки перехідних процесів.)

4 Зробити висновки щодо впливу зазначених коефіцієнтів на стійкість системи.

5 Оформити звіт про практичну роботу. Звіт повинен містити:

- назва роботи;
- мета роботи;
- схема одно контурного ММР;
- графіки, отримані під час виконання п. 3;
- висновки щодо роботи.



*Контрольні запитання:*

1. Апаратні та технічні засоби, що входять в одноконтурний ММР;
2. Система електроприводу, що входить до складу розроблюваного мехатронного модулю;
3. Відмінності та схожість структурних схем одноконтурного ММР та автоматизованого електроприводу;
4. Особливості кінематики одноконтурного ММР;
5. Характеристика зворотних зв'язків у одноконтурному ММР;
6. Передатні функції, що входять у склад одноконтурного ММР;
7. Принципи керування в розроблюваному мехатронному модулі;
8. Види перехідних процесів, бажаних для досліджуваного ММР.

*Література:*

1. Разживін О. В., Суботін О. В. Технічні засоби для проектування систем автоматизації : навчальний посібник. Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. 129 с.
2. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2017. 224 с.
3. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В. Мехатроніка : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2012. 357 с.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник / М. Г. Попович та ін. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
5. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів : навч. посібник. Львів : Видавництво національного університету «Львівській політехніка», 2004. 404 с.

### **3.2 Практична робота №2.**

#### **Моделювання та дослідження двоконтурного мехатронного модулю руху**

*Мета роботи:*

- 1 Ознайомитись з особливостями двоконтурного ММР.
- 2 З'ясувати вплив коефіцієнтів структурних блоків модулю на динаміку перехідних процесів.

*Вихідні дані:*

Структурна схема двоконтурного ММР на базі електроприводу постійного струму; коефіцієнти системи контуру струму:  $K_{рс}=0.1$ ,  $K_c=0.14$ ,  $K_{ірс}=3.5$ ,  $U_{зр1}=8.8$  В.

*Завдання:*

- 1 Відповідно до структурної схеми двоконтурного ММР зібрати його модель в середовищі MatLab (рис. 30).

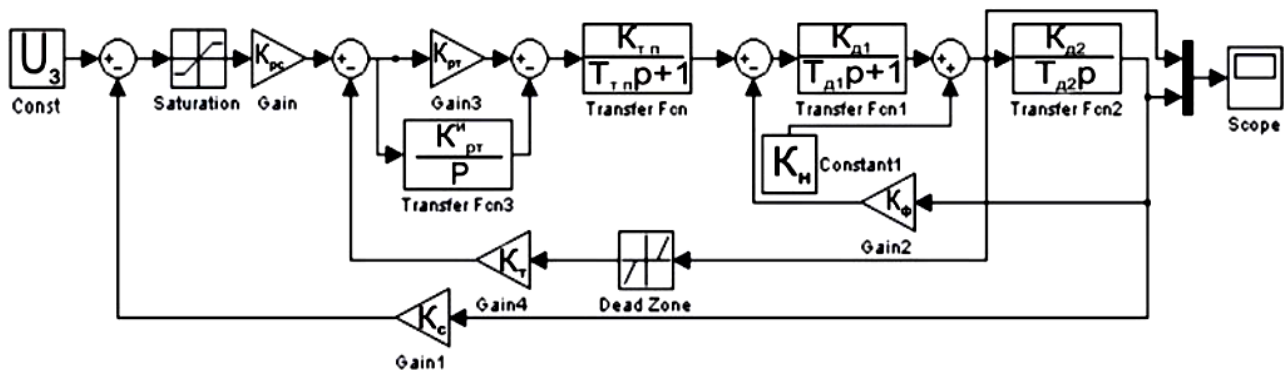


Рисунок 30 – Модель двоконтурного MMP

2 Отримати (на Scope) вихідний перехідний процес по струму та швидкості. У разі потреби зробити корекцію коефіцієнтів моделі. На вигляд перехідного процесу оцінити якість регулювання.

3 Оцінити вплив на динаміку перехідного процесу наступних коефіцієнтів:  $K_{pc}$ ,  $K_{int.pr}$ ,  $K_c$ ,  $H_{31}$ ,  $U_{зр1}$ . (Навести графіки перехідних процесів.)

4 Зробити висновки щодо впливу зазначених коефіцієнтів на стійкість модулю.

5 Оформити звіт про лабораторну роботу. Звіт повинен містити:

- назва роботи;
- мета роботи;
- схема дво контурного MMP;
- графіки, отримані під час виконання п. 3;
- висновки щодо роботи.

#### Контрольні запитання:

1. Апаратні та технічні засоби, що входять у двоконтурний MMP;
2. Система електроприводу, що входить до складу розроблюваного мехатронного модулю;
3. Відмінності та схожість структурних схем одноконтурного та двоконтурного MMP;
4. Особливості кінематики двоконтурного MMP;
5. Характеристика зворотних зв'язків у двоконтурному MMP;
6. Передатні функції, що входять у склад двоконтурного MMP;
7. Принципи керування в розроблюваному мехатронному модулі;
8. Види перехідних процесів, бажаних для досліджуваного MMP.

#### Література:

1. Разживін О. В., Суботін О. В. Технічні засоби для проектування систем автоматизації : навчальний посібник. Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. 129 с.
2. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2017. 224 с.

3. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В. Мехатроніка : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2012. 357 с.

4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч.посібник / М. Г. Попович та ін. Київ : Либідь, 2005. 680 с.

5. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів : навч. посібник. Львів : Видавництво національного університету «Львівській політехніка», 2004. 404 с.

### 3.3 Практична робота №3.

#### Моделювання та дослідження триконтурного мехатронного модулю руху

*Мета роботи:*

- 1 Ознайомитись з особливостями триконтурного ММР.
- 2 З'ясувати вплив коефіцієнтів САУ на динаміку перехідних процесів.

*Вихідні дані:*

Структурна схема три контурного ММР на базі електроприводу постійного струму; коефіцієнти системи для контуру положення:  $K_{ред} \approx 0.8$ ,  $K_p \approx 1$ ,  $K_{рп} \approx 0.5$ .

*Завдання:*

1 Згідно з структурною схемою три контурного ММР зібрати модель в середовищі MatLab (рис. 31).

2 Отримати (на елементіScope) вихідний перехідний процес по струму, швидкості та положенню. У разі необхідності коригувати коефіцієнти контуру положення для отримання стійкого перехідного процесу. На вигляд перехідного процесу оцінити якість регулювання.

3 Оцінити вплив на динаміку перехідного процесу наступних коефіцієнтів:  $K_{рп}$ ,  $K_p$ ,  $K_{ред}$ . (Навести графіки перехідних процесів.)

4 Зробити висновки щодо впливу зазначених коефіцієнтів на стійкість системи.

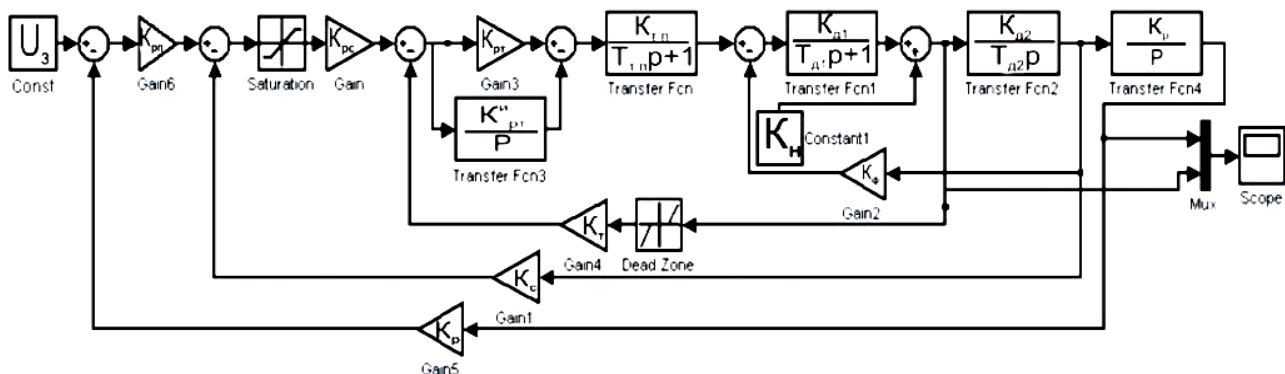



Рисунок 31 – Модель три контурного ММР

- 
- 5 Оформити звіт про лабораторну роботу. Звіт повинен містити:
- назва роботи;
  - мета роботи;
  - схема три контурного ММР;
  - графіки, отримані під час виконання п. 3;
  - висновки щодо роботи.

*Контрольні запитання:*

1. Апаратні та технічні засоби, що входять у триконтурний ММР;
2. Система електроприводу, що входить до складу розроблюваного мехатронного модулю;
3. Відмінності та схожість структурних схем одноконтурного, двоконтурного та триконтурного ММР;
4. Особливості кінематики триконтурного ММР;
5. Характеристика зворотних зв'язків у триконтурному ММР;
6. Передатні функції, що входять у склад триконтурного ММР;
7. Принципи керування в розроблюваному мехатронному модулі;
8. Види перехідних процесів, бажаних для досліджуваного ММР.

*Література:*

1. Разживін О. В., Суботін О. В. Технічні засоби для проектування систем автоматизації : навчальний посібник. Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. 129 с.
2. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2017. 224 с.
3. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В. Мехатроніка : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2012. 357 с.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник / М. Г. Попович та ін. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
5. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів : навч. посібник. Львів : Видавництво національного університету «Львівській політехніка», 2004. 404 с.

### **3.4 Практична робота №4.**

#### **Дослідження впливу нелінійних елементів на якість регулювання у багатоконтурних мехатронних модулях руху**

*Мета роботи:*

- 1 Дослідити вплив НЕ1 на якість регулювання двоконтурного ММР.
- 2 Дослідити вплив НЕ2 на якість регулювання двоконтурного ММР.
- 3 Дослідити спільний вплив НЕ1 та НЕ2 на якість регулювання двоконтурного ММР.
- 4 Дослідити спільний вплив НЕ1 та НЕ2 на якість регулювання триконтурного ММР.



**Вихідні дані:**

Моделі одно-, дво-, три контурного ММР.

**Завдання:**

1 Використовуючи модель одно контурного ММР (див. рис. 29), дослідити вплив НЕ2 на якість регулювання вихідних параметрів. Отримати графіки перехідних процесів по струму та швидкості. Визначити час налаштування основного параметра. Результати досліджень занести до таблиці (табл. 3).

Таблиця 3 - Результати досліджень

№ п\п	Параметри НЕ1	Параметри НЕ2	Вид перехідного процесу у ММР (за рис. 3) *											
			1-контурний			2-контурний			3-контурний					
			i	$\omega$	tp	i	$\omega$	tp	i	$\omega$	$\varphi$	tp		
1	Кдс□	---												
2	Кдс□	---												
3	$\pm U_{зр1}$	---												
4	$\pm U_{зр1}$	---												
5	Кдс□,	---												
6	Кдс□,	---												
7	---	Крш□												
8	---	Крш□												
9	---	$\pm U_{зр2}$												
10	---	$\pm U_{зр2}$												
11	---	Крш□,												
12	---	Крш□,												
13	$\pm U_{зр1}$	$\pm U_{зр2}$												
14	$\pm U_{зр1}$	$\pm U_{зр2}$												
15	$\pm U_{зр1}$	$\pm U_{зр2}$												
16	$\pm U_{зр1}$	$\pm U_{зр2}$												

Примітка (\*):

1 або Е - експоненційний процес;

2 або А – аперіодичний процес;

3 або К - коливальний процес:

КЗ (ЗЗ) – загасаючий коливальний процес,

КН (ЗН) - незагасаючий коливальний процес.

2 Використовуючи модель двоконтурного ММР (див. рис. 30), дослідити вплив НЕ1 на якість регулювання вихідних параметрів. Отримати графіки перехідних процесів по струму та швидкості. Визначити час налаштування основного параметра. Результати досліджень занести до таблиці (табл. 3).



3 Використовуючи модель двоконтурного ММР (див. рис. 30), дослідити спільний вплив НЕ1 та НЕ2 на якість регулювання вихідних параметрів. Отримати графіки перехідних процесів по струму та швидкості. Визначити час налаштування основного параметра. Результати досліджень занести до таблиці (табл. 3).

4 Використовуючи модель три контурного ММР (див. рис. 31), дослідити спільний вплив НЕ1 та НЕ2 на якість регулювання вихідних параметрів. Отримати графіки перехідних процесів по струму, швидкості та положенню. Визначити час налаштування основного параметра. Результати досліджень занести до таблиці (табл. 3).

5 У таблиці мають бути відображені вихідні дані моделювання із зазначенням виду перехідного процесу основного та залежного параметра системи та часу перехідного процесу (або часу регулювання).

6 При аналізі результатів необхідно виділити оптимальний перехідний процес з метою забезпечення максимальної швидкодії та точності відпрацювання завдання.

7 Визначити область стійкості системи шляхом виділення граничних значень параметрів нелінійних елементів, при яких перехідний процес переходить у режим, що встановився.

8 Оформити звіт про лабораторну роботу. Звіт повинен містити:

- назва роботи;
- мета роботи;
- схеми одно-, дво-, три контурного ММР;
- заповнену таблицю та графіки оптимальних перехідних процесів;
- висновки щодо виконаної роботи.

#### *Контрольні запитання:*

1. Система електроприводу, що входить до складу досліджуваних мехатронних модулів руху;
2. Види перехідних процесів, які є бажаними для ММР;
3. Вплив нелінійних ланок на якість регулювання контрольованих параметрів у багатоконтурних ММР;
4. Дія зворотних зв'язків та їх вплив на поведінку контрольованих параметрів у багатоконтурних ММР.

#### *Література:*

1. Разживін О. В., Суботін О. В. Технічні засоби для проектування систем автоматизації : навчальний посібник. Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. 129 с.
2. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2017. 224 с.
3. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В. Мехатроніка : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2012. 357 с.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник / М. Г. Попович та ін. Київ : Либідь, 2005. 680 с.

5. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів : навч. посібник. Львів : Видавництво національного університету «Львівській політехніка», 2004. 404 с.

### 3.5 Практична робота №5. Динаміка мехатронного модулю руху

*Мета роботи:*

- 1 Дослідити динамічні процеси у двоконтурному ММР.
- 2 З'ясувати вплив затриманих зворотних зв'язків на якість регулювання у ММР.

*Вихідні дані:*

Модель двоконтурного ММР; 2-кратне навантаження проводиться через 30 с, зняття навантаження - через 35 с, гальмування - через 40 с.

*Завдання:*

1 Використовуючи модель двоконтурного ММР (див. рис. 30), доповнюємо її елементами Step-Step2, як показано на рис. 32.

2 Задавши необхідні значення часу та величин навантаження отримати перехідні процеси по струму та швидкості. За видом перехідних процесів оцінити якість регулювання у ММР.

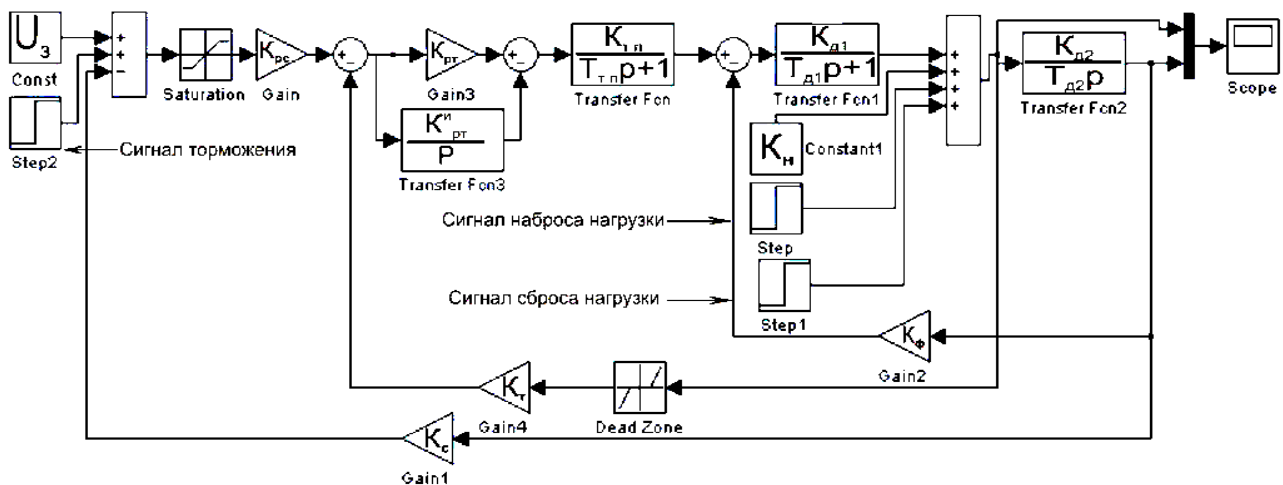



Рисунок 32 – Модель двоконтурного ММР для моделювання динаміки

3 Оформити звіт про лабораторну роботу. Звіт повинен містити:

- назва роботи;
- мета роботи;
- схема моделі двоконтурного ММР у режимі «динаміка»;
- графіки, отримані при моделюванні пуску на холостому ході, накидання навантаження, зняття навантаження та гальмування;
- висновки щодо роботи.



*Контрольні запитання:*

1. Типові динамічні процеси у багатоконтурному ММР;
2. Динамічні ланки системи та їх передатні функції;
3. Електромеханічний перетворювач як складна динамічна ланка мехатронного модулю руху;
4. Поведінка регульованих параметрів у перехідних режимах, вплив коефіцієнтів та постійних часу досліджуваного ММР на якість регулювання;
5. Оцінки статичного та динамічного режимів роботи ММР.

*Література:*

1. Разживін О. В., Суботін О. В. Технічні засоби для проектування систем автоматизації : навчальний посібник. Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. 129 с.
2. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2017. 224 с.
3. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В. Мехатроніка : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2012. 357 с.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник / М. Г. Попович та ін. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
5. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів : навч. посібник. Львів : Видавництво національного університету «Львівській політехніка», 2004. 404 с.

### **3.6 Практична робота №6.**

#### **Оптимізація структури (синтез) мехатронного модулю руху**

*Мета роботи:*

Відповідно до індивідуального завдання виконати синтез і подальший аналіз багатоконтурної системи автоматичного управління електроприводом (ЕП) у складі ММР.

*Вихідні дані:*

Параметри незмінної частини системи управління електроприводом (параметри нелінійних елементів, коефіцієнти, постійні часу ланок, параметри датчиків зворотних зв'язків та зовнішні впливи):

$U_z = 10\text{В}$ ,  $U_{zр1} = 8,8\text{В}$ ,  $U_{zр2} = 0,31$ ,  $K_f = 2,01$ ,  $K_{тп} = 37,5$ ,  $K_{д1} = 0,545\text{Р/В}$ ,  $K_{д2} = 0,9\text{Р/В}$ ,  $I_c = 3,7\text{А}$ ,  $T_m = 0,4\text{с}$ ,  $T_e = 0,017\text{с}$ ,  $T_{тп} = 0,005 \dots 0,01\text{с}$ ,  $K_c = 0,14$ ,  $K_{ш} = 0,09$ ,  $K_p \approx 1$ ,  $K_{ред} \approx 0,8$ .

*Завдання:*

Відповідно до індивідуального завдання виконати синтез і подальший аналіз багатоконтурної системи автоматичного управління електроприводом (ЕП) у складі ММР у наведеній нижче послідовності.



1 Оптимізувати типову структуру багатоконтурного ММР з підлеглим регулюванням у ЕП відповідно до заданих бажаних перехідних процесів у відповідних розімкнених контурах управління.

2 За отриманою оптимальною структурою регуляторів у кожному з контурів управління скласти повну структурну схему САУ ЕП із зазначенням передавальних функцій ланок, що входять до системи.

3 Для синтезованої системи скласти диференціальні рівняння у формі Коші та рівняння зв'язків.

4 Провести моделювання отриманої системи керування електроприводом за допомогою програми MatLab. Визначити параметри регуляторів, у яких перехідний процес регульованого параметра оптимальний.

Варіанти завдань представлені у табл. 4, де позначені: Е – експоненційний процес; А – аперіодичний процес; К – коливальний процес.

Таблиця 4 - Бажані перехідні процеси в розімкнених контурах управління ММР

Варіант	I контур	II контур	III контур	Варіант	I контур	II контур	III контур
1	Е	Е	Е	14	А	А	А
2	Е	Е	А	15	А	А	К
3	Е	Е	К	16	А	К	Е
4	Е	А	Е	17	А	К	А
5	Е	А	А	18	А	К	К
6	Е	А	К	19	К	Е	Е
7	Е	К	Е	20	К	Е	А
8	Е	К	А	21	К	Е	К
9	Е	К	К	22	К	А	Е
10	А	Е	Е	23	К	А	А
11	А	Е	А	24	К	А	К
12	А	Е	К	25	К	К	Е
13	А	А	Е	26	К	К	А

*Контрольні запитання:*

1. Методика синтезу багатоконтурних ММР;
2. Роль електроприводу у складі ММР;
3. Види перехідних процесів, їх характеристики;
4. Перехідні процеси, що використовуються як оптимальні при синтезі ММР;
5. Інтелектуальне керування в мехатронних системах;
6. Особливості синтезу багатоконтурних систем автоматичного керування електроприводом у складі ММР.



### *Література:*

1. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні : підручник / Л. Є. Пелевін та ін. Київ : ТОВ «НВП «Інтерсервіс»», 2016. 258 с.
2. Єнікєєв О. Ф., Суботін О. В. Основи синтезу і проектування слідкуючих систем верстатів і промислових роботів : навчальний посібник. Краматорськ : ДДМА, 2008. 240 с.
3. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник / М. Г. Попович та ін. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
4. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів : навч. посібник. Львів : Видавництво національного університету «Львівській політехніка», 2004. 404 с.

### **3.7 Критерії оцінювання**

Практичні роботи виконуються на практичних заняттях за розкладом, при потребі доопрацьовуються самостійно. захист практичних робіт, як правило, проводиться на поточному або наступному від виконання роботи занятті.

Робота на практичних заняттях, а також своєчасність виконання та захисту кожної практичної роботи оцінюється. В іншому випадку роботи мають бути захищені не пізніше, як за один тиждень до закінчення семестру (теоретичного навчання) для встановлення поточної успішності.

Виконання та захист кожної з практичних робіт оцінюється в 10 балів, з яких 8 балів за виконану практичну роботу, а 2 бали – робота на занятті. Загальна кількість балів за практикум складає 60 балів, тобто 6 робіт по 10 балів.



## ВИСНОВОК

Викладено загальні питання аналізу, синтезу та принципи структурного моделювання мехатронних модулів руху для застосування в робототехнічних та мехатронних системах. Розглянуто особливості моделювання в програмному забезпеченні MatLab.

Практикум з моделювання спрямований на засвоєння основ синтезу систем автоматизованого керування електроприводами, що складають основу мехатронних модулів руху, їх структурного проектування, побудови перехідних процесів на основі використання структурної схеми модулю руху, а також їх моделювання.

Якість виконання індивідуальних завдань дозволяє оцінити якість засвоєння навчального матеріалу.



## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник / М. Г. Попович та ін. Київ : Либідь, 2005. 680 с.
2. Bishop R. H. The Mechatronics handbook. Austin : The University of Texas at Austin, 2002. 1229 p.
3. Єнікєєв О. Ф., Суботін О. В. Основи синтезу і проектування слідкуючих систем верстатів і промислових роботів : навчальний посібник. Краматорськ : ДДМА, 2008. 240 с.
4. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні : підручник / Л. Є. Пелевін та ін. Київ : ТОВ «НВП «Інтерсервіс»», 2016. 258 с.
5. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В. Мехатроніка : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2012. 357 с.
6. Modelowanie komputerowe i obliczenia współczesnych układów automatyzacji / R. Tadeusiewicz itp. Kraków, 2004. 335 p.
7. Разживін О. В., Суботін О. В. Технічні засоби для проектування систем автоматизації : навчальний посібник. Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. 129 с.
8. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів : навч. посібник. Львів : Видавництво національного університету «Львівській політехніка», 2004. 404 с.
9. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2017. 224 с.
10. Павленко І. І., Мажара В. А. Роботизовані технологічні комплекси : навчальний посібник. Кіровоград : КНТУ, 2010. 392 с.



*Навчально-методичне видання*

**Олег Володимирович Суботін**

**МЕХАТРОНІКА ТА РОБОТОТЕХНІКА**

**методичні вказівки  
до виконання практичних робіт**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції