

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики
(інститут)

Електротехнічний факультет
(факультет)

Кафедра електропривода
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Деркача Михайла Вікторовича
(ПІБ)

академічної групи 141М-17-4
(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

спеціалізації

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(офіційна назва)

на тему Система автоматичного регулювання швидкості з одним регулятором

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Казачковський М.М.			
розділів:				
<i>Авт. електропривод</i>				
<i>Системи регулювання електроприводами з одним регулятором</i>				
<i>Економічна частина</i>	Тимошенко Л.В.			
Рецензент	Циплінков Д.В.			
Нормоконтролер	Казачковський М.М.			

Дніпро
2018

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
електропривода
(повна назва)

_____ Казачковський М.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

« 01 » вересня 2018 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеня _____ **магістра** _____
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту _____ Деркач М.В. _____ академічної групи _____ 141М-17-4
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

спеціалізації¹ _____

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(офіційна назва)

на тему Система автоматичного регулювання швидкості з одним регулятором

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 12.11.2018 № 1913-л

Розділ	Зміст	Термін виконання
Глава 1	<i>Автоматизований електропривод</i>	22.10.18 – 17.11.18
Глава 2	<i>Системи регулювання електроприводами з одним регулятором</i>	18.11.18 – 03.12.18
Економічна частина	<i>Розрахунок основних техніко-економічних показників впровадження дипломного проекту</i>	04.12.18 – 09.12.18

Завдання видано

_____ (підпис керівника)

_____ Казачковський М.М.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі 15 жовтня 2018

Дата подання до екзаменаційної комісії 26.12.2018 р.

Прийнято до виконання

_____ (підпис студента)

_____ Деркач М.В.
(прізвище, ініціали)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	6
ВСТУП.....	9
1. Автоматизований електропривод.....	13
1.1 Попередній вибір двигуна подачі.....	13
1.2 Розрахунок діаграми швидкостей та навантажень приводу токарного верстата... ..	14
1.2.1 Швидкості, зусилля і тривалості різання.....	14
1.3 Навантаження приводів подач.....	17
1.4 Тривалість пуску і пусковий момент ВМД.....	25
1.5 Перевірка попередньо обраного двигуна	28
1.6 Вибір силових елементів електропривода.....	28
1.7 Перевірка на необхідність дроселя	31
1.8 Розрахунок параметрів САК.....	34
1.8.1 Тиристорний привід постійного струму.....	34
1.9 Класична система підпорядкованого регулювання.....	34
1.10 Компенсація великих постійних часу та вибір бажаної передавальної функції контура регулювання.....	38
1.11 Налаштування контуру струму і розрахунок параметрів регулятора.....	41
1.12 Корекція контуру регулювання швидкості	44
1.13 Розрахунок параметрів класичної системи підлеглого регулювання.....	46
1.14 Математичне моделювання системи.....	47
2 Системи регулювання електроприводами з одним регулятором.....	49
2.1 Загальні відомості	49
2.2 Розрахунок параметрів регулятора і коефіцієнтів зворотних зв'язків.....	50
2.3 Параметри зворотних зв'язків з різними критеріями налаштування (характеристичними поліномами).....	53
3 Економічна частина	61
3.1 Розрахунок капітальних витрат	61

3.2 Розрахунок експлуатаційних витрат	64
3.2.1 Амортизаційні відрахування.....	65
3.2.2 Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт	66
3.2.3 Розрахунок вартості споживаної електроенергії	68
ВИСНОВОК.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	72

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записки 73 с., 23 рис., 22 табл., 16 джерел, мультимедійна презентація на 17 слайдах.

Об'єкт досліджень: системи регульованого електропривода з модальним регулятором.

Предмет досліджень: динамічні показники замкнених систем керування електроприводами з модальним регулятором.

Мета роботи: підвищення швидкодії та точності регулювання шляхом використання системи електропривода з одним регулятором.

Виконано аналіз систем автоматичного керування координат електропривода із модальним регулятором.

Отримано розрахункові вирази для визначення параметрів зворотніх зв'язків систем з одним регулятором, які забезпечують наперед задані показники перехідного процесу.

Розроблено математичну модель у середовищі MATLAB\Simulink. Запропоновано систему автоматичного керування електроприводу токарного станка з модальним регулятором та проведено дослідження динаміки.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у: збільшення швидкодії та зменшення похибки регулювання за рахунок використання модального регулятора налагодженого на ІТО.

Практична цінність результатів полягає у:

- розробленні методів розрахунку параметрів зворотніх зв'язків систем керування електроприводами з одним регулятором;
- збільшення стабільності і точності роботи технологічного обладнання з електроприводом.

РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИВОД, МОДАЛЬНИЙ РЕГУЛЯТОР, ПАРАМЕТРИ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ДИНАМІКА, ЗБІЛЬШЕННЯ ШВИДКОДІЇ ТА ТОЧНОСТІ.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 73 с., 23 рис., 22 табл., 16 источников, мультимедийная презентация на 17 слайдах.

Объект исследований: системы регулируемого электропривода с модальным регулятором.

Предмет исследований: динамические показатели замкнутых систем управления электроприводами с модальным регулятором.

Цель работы: повышение быстродействия и точности управления путем использования системы электропривода с одним регулятором.

Выполнен анализ систем автоматического управления координат электропривода с модальным регулятором.

Получены расчетные выражения для определения параметров обратных связей систем с одним регулятором, которые обеспечивают наперед заданные показатели переходного процесса.

Разработана математическая модель в среде MATLAB\Simulink. Предложено систему автоматического управления электропривода токарного станка с модальным регулятором и проведено исследование динамики.

Научная новизна полученных результатов заключается в увеличении быстродействия и уменьшении ошибки регулирования за счет использования модального регулятора настроенного на ИТО.

Практическая ценность исследования заключается в:

- разработке методов расчета параметров обратных связей систем управления электроприводами с одним регулятором;
- увеличение стабильности и точности работы технологического оборудования с электроприводом.

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД, МОДАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР, ПАРАМЕТРЫ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДИНАМИКА, УВЕЛИЧЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ТОЧНОСТИ.

ABSTRACT

Memorandum 73 p., 23 pic., 22 tabl., 16 sources, multimedia presentation 17 slides.

The object of the research is regulated electric drive system with a modal control.

The subject of the research is dynamic parameters of closed electric drives control systems with a modal control.

The purpose of the research is increasing the speed and accuracy of control by means of electric drive system with a single controller.

The analysis of electric drive coordinate automatic control systems with a modal control is performed.

The calculation formula for determining the parameters of feedback systems with a single regulator, which provides a set of transition indicators in advance, is received.

A mathematical model is developed in Matlab Simulink. The system of lathe electric drive automatic control with modal control is suggested and dynamic research is conducted.

Scientific novelty of the research results is increasing the speed and reducing the control error through the use of modal controller configured for ITO.

Practical use of the research is:

- development of methods for calculating the parameters of electric drives control systems feedbacks with a single regulator;
- increasing the stability and accuracy of the technological equipment operation with the electric drive.

REGULATED ELECTRIC DRIVE, MODAL CONTROLLER, PARAMETERS, MATH MODELING, DYNAMICS, SPEED AND ACCURACY INCREASING.

ВСТУП

Серед різних напрямків теорії систем, заснованої на методі простору станів, можна виділити два, які отримали найбільше поширення в інженерній практиці. Одне з них утворюється методами оптимізації системи шляхом зведення до мінімуму деякого функціоналу (зазвичай інтеграла від будь-якої квадратичної форми), що характеризує якість регулювання. Інший напрямок пов'язан з методами модального керування, тобто методами формування ланцюгів зворотних зв'язків, які надають замкнутій системі заздалегідь обраний розподіл коренів.

Якщо всі складові вектора стану об'єкта керування доступні безпосередньому виміру (повна інформація), а сам об'єкт повністю керований, то при законі керування у вигляді лінійної функції змінних стану можна зміщувати корні замкнутої системи в будь-які бажані положення. Ця ж задача може бути вирішена і при використанні у законі керування лише частини змінних стану (неповна інформація), якщо керування подавати не на один, а на кілька входів об'єкта.

Динаміка замкнутої системи визначається не тільки полюсами її передавальних функцій, але і нулями. Що стосується статичної точності, то вона залежить від інтегруючих ланок у контурах зворотного зв'язку.

Якщо ж число використовуваних входів і змінних стану об'єкта менше його порядку, то вільне керування коріннями стає неможливим. Однак застосування спостерігаючого пристрою дозволяє за частиною змінних стану відновити весь вектор стану, що зберігає можливість вільного керування коріннями замкнутої системи.

Зовнішні впливи, що не піддаються вимірюванню, які прикладаються до об'єкта, не дозволяють за допомогою спостерігаючого пристрою точно оцінювати вектор стану об'єкта. Однак це не перешкоджає використанню спостерігаючих пристроїв, якщо справа йде про керування положенням коренів замкнутої системи.

Розміщення всіх коренів (полюсів) замкнутої системи в будь-які наперед обрані положення називається теорією модального керування. Походження терміна «модальне керування» можна пояснити тим, що кореням відповідають складові вільного руху системи, які також називають модами.

Якщо всі складові вектора стану об'єкта x можуть бути виміряні (повна інформація про вектор стану), то забезпечення заданого розташування коренів замкнутої системи не викликає труднощів. Але спершу виникає питання про розташування коренів, до якого слід прагнути. Це питання вирішують з урахуванням властивостей конкретного об'єкта. Зокрема, вид перехідного процесу визначається не тільки полюсами (коренями), а й нулями замкнутої системи. Якщо передавальна функція замкнутої системи не має нулів, то при виборі її характеристичного полінома можна керуватися стандартними формами, розглянутими в наступному розділі.

Щоб забезпечити «оптимальне» протікання реакції $x(t)$, пропонувалися різні розподілення коренів характеристичного рівняння.

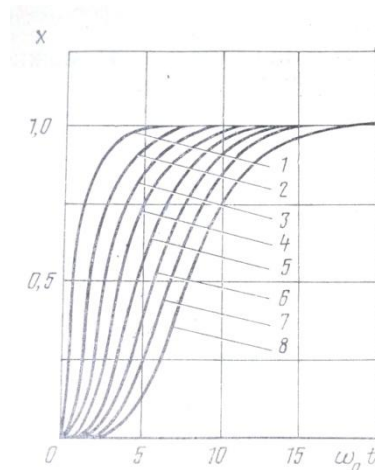
$$+ a_1^{-1} + \dots + a = 0$$

Одна з пропозицій полягає в забезпеченні однаковості всіх коренів характеристичного рівняння, причому n -кратний корінь повинен бути дійсним негативним, зі значенням модуля w_0 , що визначаються вимогами до швидкодії системи (чим більше w_0 , тим менше час регулювання). Тоді ліва частина характеристичного рівнянь звертається в біном Ньютона $(s+w_0)^n$, розгортаючи який отримуємо стандартні (бажані) значення коефіцієнтів характеристичного рівняння. Так наприклад для системи п'ятого порядку біномінальної характеристичне рівняння має вигляд.

$$s^5 + 5w_0 s^4 + 10w_0^2 s^3 + 10w_0^3 s^2 + 5w_0^4 s + w_0^5$$

На рис. 1. наводяться реакції на ступеневе обурення систем від першого до восьмого порядку. Для багатьох додатків ці реакції внаслідок відносно

повільного протікання неможна вважати оптимальними оптимальними.



Мал. 1. Реакція на ступеневий вплив систем з біноміальними коефіцієнтами

Інше «оптимальне» розташування коренів, запропоноване Баттервортом, полягає в тому, що корені при дотриманні однаковості кутових відстаней розподіляються вздовж півкола радіуса w_0 в лівій півплощині s . За допомогою співвідношень, що зв'язують корені з коефіцієнтами характеристичного рівняння (теорема Вієта), можна в кожному випадку скласти вирази стандартних коефіцієнтів. Ліва частина характеристичного рівняння п'ятого порядку з такими стандартними коефіцієнтами наводяться нижче.

$$s^5 + 3.24w_0 s^4 + 5.24w_0^2 s^3 + 5.24w_0^3 s^2 + 3.24w_0^4 s + w_0^5$$

Стандартні форми Баттерворта, як і біноміальні стандартні форми, характеризуються симетричним розподілом коефіцієнтів, що є специфічною особливістю всіх систем, коріння яких розташовані в площині s на одній і тій же окружності (рівняння з біноміальними коефіцієнтами представляє окремий випадок, що характеризується розташуванням всіх коренів в одній точці згаданої окружності).

Реакції систем Баттерворта на ступеневий вплив (рис. 2.) в порівнянні з аналогічними реакціями біноміальних систем, як і слід було очікувати,

більш коливальні. Але в багатьох випадках вони відповідають інтуїтивному уявленню про оптимальний перехідний процес.

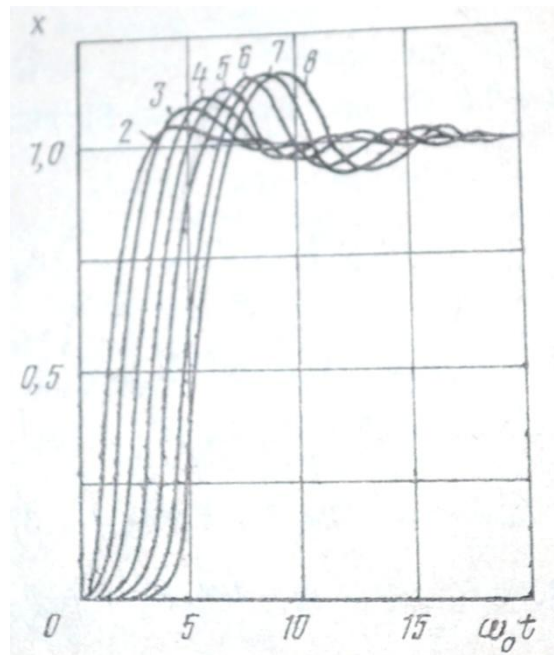


Рис. 2. системи Баттерворта

Поняття оптимального перехідного процесу пов'язують з мінімізацією будь-якого оптимізуючого функціоналу.

У даній дипломній роботі порівнюються динамічні показники систем налаштованих за принципом підлеглого регулювання і з модальним регулятором на прикладі приводу подачі токарного верстата.

1 Автоматизований електропривод

1.1 Попередній вибір двигуна подачі

Двигун обирається виходячи із заданого зусилля на гвинті при робочій подачі, а також максимальної робочої швидкості подачі і швидкості швидкого ходу. Передавальне відношення редуктора забезпечує відповідність максимальної частоти обертання двигуна і швидкості швидкого ходу супорта:

$$i \leq \frac{n_{\max} \cdot t_z}{V_{\text{ух}}} = \frac{2000 \cdot 0,01}{3,2} = 6,25; \quad (1.1)$$

Де n_{\max} – максимальна швидкість двигуна, об/хв;

t_z – крок гвинта кульково-гвинтової передачі, м;

$V_{\text{ух}}$ – швидкість швидкого ходу, м/хв.

Обираємо двигун з тривало припустимим моментом

$$M_{d0} \geq \frac{(1,2 \dots 1,3) \cdot F_p \cdot t_z}{2 \cdot \pi \cdot i} = \frac{1,25 \cdot 50000 \cdot 0,01}{2 \cdot 3,14 \cdot 6,25} = 15,9 \text{ (Нм)}; \quad (1.2)$$

де F_p – максимальне робоче зусилля на гвинті, кН;

$V_{p.\max}$ – максимальна робоча швидкість;

Приймаємо $F_p = 50$ (кН); $V_{\text{ух}} = 3,2$ (м/хв); $V_{p.\max} = 0,8$ (м/хв).

Перевіряємо умову забезпечення діапазону робочих швидкостей подач:

$$n_n \geq \frac{V_{p.\max} \cdot i}{t_z} = \frac{0,8 \cdot 6,25}{0,01} = 500 \text{ (об / хв)}; \quad (1.3)$$

Обираємо високомоментний двигун постійного струму, параметри якого зведені в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

Параметри високомоментного двигуна

$T_{\text{ун}}$	M_{d0} Нм	I_{d0} А	U_n В	n_n об/хв	n_{\max} об/хв	$M_{\max.0}$ Нм	$J_{\text{дв}}$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 10^{-3}$	$R_{\text{я}}$ Ом	$L_{\text{я}}$ мГн
2ПБВ112М	18,5	35	42	500	2000	170	42	0,134	0,898

1.2 Розрахунок діаграми швидкостей і навантажень приводу токарного верстата

1.2.1 Швидкості, зусилля і тривалості різання

При зовнішньому поздовжньому і поперечному точінні окружну швидкість різання розраховують за емпіричною формулою:

$$V_i = \frac{C_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v}} \quad (\text{м/хв}); \quad (1.4)$$

де t – глибина різання, мм; S – подача на оборот, мм/об; T – стійкість різця, хв;

C_v , x_v , y_v , m – емпіричні коефіцієнти, значення яких наведені нижче;

$S=0,7$ (мм/об); $T=50$ (хв); $C_v=350$; $x_v=0,15$; $y_v=0,35$; $m=0,2$;

Розрахунки для ділянок зведені у таблицю 1.2.

Таблиця 1.2

Розрахунки формули 1.4, розмірність в (м/хв)

Для поздовжнього точіння			Для поперечного точіння	
Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2
$t=2$, мм	$t=2,6$, мм	$t=3,9$, мм	$t=12$, мм	$t=4$, мм
$V_{z1}=163,4$	$V_{z2}=157,1$	$V_{z3}=147,8$	$V_{x1}=124,9$	$V_{x2}=150,3$

Так як за таких швидкостей частота обертання шпинделя буде перевищувати максимально допустиму швидкість двигуна, ми приймаємо швидкість, яка дозволить забезпечити обертання шпинделя, не виходячи за допустимі межі.

Таблиця 1.3

Прийнята швидкість для кожної ділянки, розмірність в (м/хв)

Для поздовжнього точіння			Для поперечного точіння	
Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 3	Ділянка 1	Ділянка 2
$V_1=93,4$	$V_2=87,1$	$V_3=77,8$	54,9	80,3

Частота обертання шпинделя кожного з переходів при поздовжньому точінні визначається як:

$$n_{\text{iii}} = 1000 \cdot V_i / \pi \cdot D \quad (\text{об/хв}); \quad (1.5)$$

де D - діаметр оброблюваної поверхні на даному переході, мм;
 Результати розрахунку для кожної ділянки зведені в таблицю 1.4.

Таблиця 1.4

Розрахунки формули (1.5)

<i>Подача</i>	<i>Ділянки</i>	$V_i,$ <i>м/хв</i>	$\pi,$ <i>рад</i>	$D_i,$ <i>мм</i>	$n_{ui},$ <i>об/хв</i>
<i>Поздовжня – Z</i>	<i>Ділянка 1</i>	93,4	3,14	24	1238,7
	<i>Ділянка 2</i>	87,1		20	1386,2
	<i>Ділянка 3</i>	77,8		14,8	1673,3
<i>Поперечна – X</i>	<i>Ділянка 1</i>	54,9		24	728,1
	<i>Ділянка 2</i>	80,3		20	1278

Швидкість подачі для кожного переходу при поздовжньому і поперечному точінні:

$$V_{ni} = S \cdot n_{uk} \text{ (мм/хв)}; \quad (1.6)$$

де S – подача на оберт (мм/об), $S = 0,7$;

Результати розрахунків зведені в таблицю 1.5.

Таблиця 1.5

Розрахунки формули (1.6), розмірність у (мм/хв)

<i>Для поздовжньої подачі</i>			<i>Для поперечної подачі</i>	
<i>Ділянка 1</i>	<i>Ділянка 2</i>	<i>Ділянка 3</i>	<i>Ділянка 1</i>	<i>Ділянка 2</i>
$V_{n1}=867$	$V_{n2}=970,3$	$V_{n3}=1171,3$	$V_{n1}=509$	$V_{n2}=894,6$

Тривалості переходу при поздовжньому точінні:

$$t_i = 60 \cdot L_i / n_{ui} \cdot S \text{ (с)}; \quad (1.7)$$

де L - довжина образуючої оброблюваної поверхні, (мм);

Розрахунки зведені в таблицю (1.6).

Таблиця 1.6

Розрахунки формули (1.7)

Ділянки	L_i мм	$n_{шв}$ об/хв	S , мм/об	t_i с
Ділянка 1	35	1238,7	0,7	2,42
Ділянка 2	15	1386,2		0,92
Ділянка 3	6,48	1673,3		0,33

При поперечному точінні:

$$t = 3\pi(D_n^2 - D_k^2) / 200 \cdot V_i \cdot S \text{ (с);} \quad (1.8)$$

Розрахунки зведені у таблицю (1.7).

Таблиця 1.7

Розрахунки формули (1.8)

Ділянки	$D_{ю}$ мм	$D_{к}$ мм	S , мм/об	V_i м/хв	t_i с
Ділянка 1	24	0	0,7	54,9	0,7
Ділянка 2	20	12		80,3	0,21

Складові зусилля різання:

$$\text{Осьова } F_{zi} = 10 \cdot C_{Fz} \cdot t_{ip}^{X_{Fz}} \cdot S^{Y_{Fz}} \cdot V_i^{n_z} \text{ (Н);} \quad (1.9)$$

$$\text{Радіальна } F_{xi} = 10 \cdot C_{Fx} \cdot t_{ip}^{X_{Fx}} \cdot S^{Y_{Fx}} \cdot V_i^{n_x} \text{ (Н);} \quad (1.10)$$

Емпіричні коефіцієнти (а також розрахунки формул (1.9) - (1.10)) для зовнішнього точіння твердосплавним різцем для сталевих виливків в таблиці (1.8).

Таблиця 1.8

Розрахунки формул (1.9) - (1.10)

Найменування	C_{Fi}	X_{Fi}	Y_{Fi}	n_i	t_{ip} , мм	V_i м/хв	F_i , Н
Осьова (Z)							
Ділянка 1	339	1	0,5	-0,4	2	93,4	923,9
Ділянка 2					2,6	87,1	1235,1
Ділянка 3					3,9	77,8	1938,3

Радіальна (X)							
Ділянка 1	243	0,9	0,6	-0,3	12	54,9	5521
Ділянка 2					4	80,3	1832,7

де t_p - глибина різання, V_i - окружна швидкість різання.

Завдяки системі автоматичної стабілізації зворотньої подачі і швидкості різання, зусилля при різанні підтримується незмінними, незалежно від діаметра оброблюваної поверхні.

1.3 Навантаження приводів подач

Двигуни подач токарного верстата працюють в трьох різних режимах: швидкий хід (контакт різця з деталлю відсутня, двигун навантажений моментом тертя в передачі); точіння (двигун навантажений моментом від сил різання і тертя); пуск і гальмування (момент двигуна визначається рівнем струмообмеження).

На рис.1.1 - 1.2 приведені ескіз оброблюваної деталі, показана траєкторія руху різця і її характерні точки. На рис.1.3 зображені приблизні діаграми швидкостей подач і статичних навантажень при обробці даної деталі.

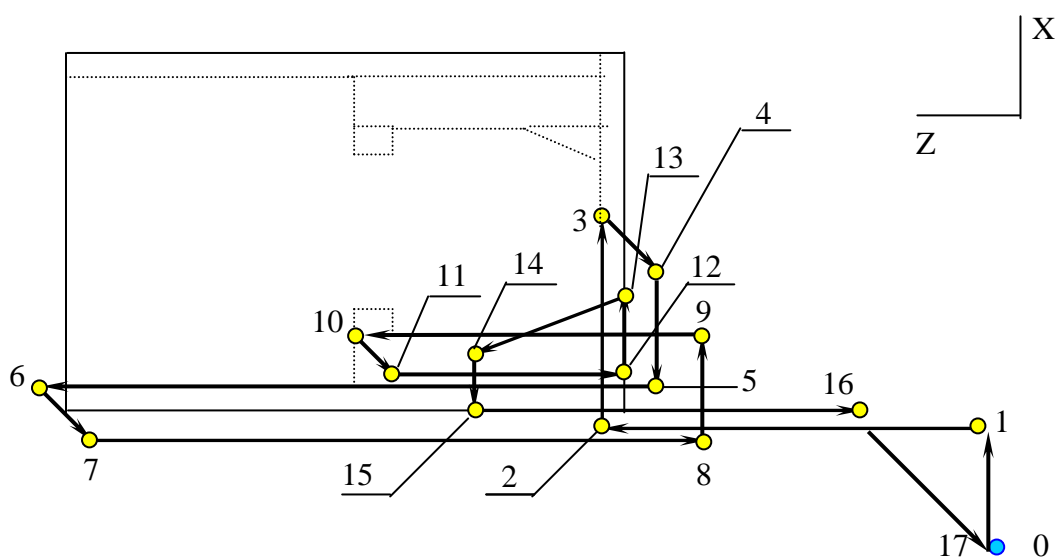


Рис. 1.1. Траєкторія руху різця

З вихідної точки 0 різець на швидкості швидкого ходу подається до деталі, від точки 2 до заготовки різець подається з необхідною для першого переходу (по координаті X) швидкістю робочої подачі, відбувається точіння до точки 3 (I ділянка поперечної подачі). Між точками 3,4,5 - відведення різця і знову точіння між точками 5,6 (I ділянка поздовжньої подачі за координатою Z). Між точками 6,7,8,9 - швидкий хід, 9 - 10 точіння (II ділянка поздовжньої подачі), 10,11,12,13 – швидкий хід, 13,14 - точіння (III ділянка по координаті Z), 14,15,16,17 - відведення різця в початкове положення, де відбувається поворот револьверної головки (зміна різця), для проточки канавки (II ділянка поперечної подачі) див. рис.1.2. Точки з індексом "д" позначають відстань від попередньої точки до деталі на даному переході (див рис. 1.2), на малюнку (1.1) ці точки не зазначені, але в подальшому ми будемо на них посилалися. Так наприклад відстань від точки 2 до деталі (2д) дорівнює 3 мм і т.д.

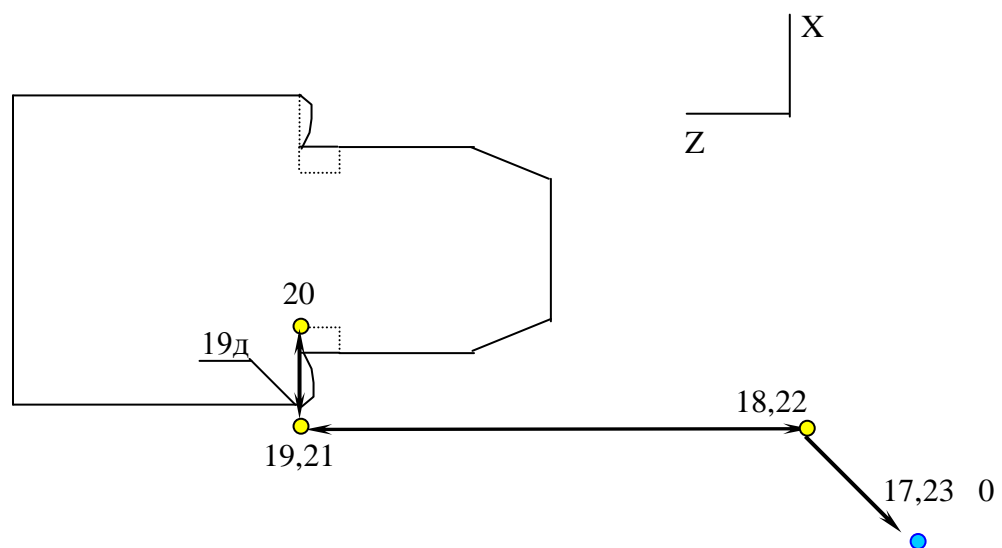


Рис. 1.2. Траєкторія руху після зміни різця

Після проточки канавки, різець повертається у вихідне положення (точка 0).

Знак швидкостей рис.1.3 дано відповідно до напрямку осей координат. Знак статичного моменту збігається зі знаком швидкості. Особливістю верстатів з ЧПУ є те, що для забезпечення заданої траєкторії різця на ділянках, паралельним осям, двигуни подач (поперечної подачі при поздовжньому точінні і поздовжньої при торцевому) не відключаються, а завдяки контуру, у регулювання положення

відпрацьовують незмінне завдання на положення. Тому привід подачі Z між точками 0 і 1, 2 і 3, 4 і 5, 8 і 9, 12 і 13, 14 і 15, 19 і 21, а привід X між 1 і 2, 5 і 6, 7 і 8, 9 і 10, 11 і 12, 15 і 16, 18 і 19, 21 і 22 нерухомі але, навантажені силами різання і тертя (див. рис.1.3).

Для поздовжньої подачі.

При швидкому ході статичне навантаження визначається силами різання і тертя:

$$M_{\text{бхZ}} = M_{\text{мпZ}} = M_{\text{мп.нZ}} + M_{\text{нZ}} + M_{\text{е}} = 0,45 + 9,08 + 0,58 = 10,1 \text{ (Нм)}; \quad (1.11)$$

де $M_{\text{мп.нZ}}$ – момент від сил тертя в напрямних; $M_{\text{нZ}}$ – момент від попереднього натягу в упорних підшипниках гвинта; $M_{\text{е}}$ – момент от натягу гвинтової передачі.

$$M_{\text{мп.нZ}} = \frac{F_{\text{мп.нZ}} \cdot t_z}{2000 \cdot \pi \cdot i \cdot n_z \cdot n_p} = \frac{1470 \cdot 10}{2000 \cdot 3,14 \cdot 6,25 \cdot 0,98 \cdot 0,85} = 0,45 \text{ (Нм)}; \quad (1.12)$$

$$\text{де } F_{\text{мп.нZ}} = \mu \cdot m \cdot g = 0,1 \cdot 1500 \cdot 9,8 = 1470 \text{ (Н)}; \quad (1.13)$$

μ – коефіцієнт тертя в напрямних; m – маса поступально рухомих вузлів (супорт, салазка і т.п.), кг; t_z – крок гвинта, мм; n_z , n_p – ККД кульково-гвинтової передачі (КГП) і редуктора; i – передавальне відношення редуктора.

$$\mu = 0,1; \quad g = 9,8; \quad m_z = 1500; \quad n_z = 0,98; \quad n_p = 0,85;$$

$$M_{\text{нZ}} = n_n \cdot F_{\text{нZ}} \cdot f_l \cdot r = 2 \cdot 1136,1 \cdot 0,1 \cdot 0,04 = 9,08 \text{ (Нм)}; \quad (1.14)$$

де n_n – кількість підшипників; f_l – коефіцієнт тертя в підшипниках; r – радіус цапфи під підшипником, м;

$$F_{\text{нZ}} = (F_{\text{Zi}} + F_{\text{мп.нZ}}) / 3 = (1938,3 + 1470) / 3 = 1136,1 \text{ (Н)}; \quad (1.15)$$

де F_{Zi} – осевое усилие подачи (выбираем максимальное);

$$n_n = 2; \quad f_l = 0,1; \quad r = 0,04.$$

$$M_{\text{е}} = M_{\text{xx}} / i \cdot n_p = 3,1 / 6,25 \cdot 0,85 = 0,58 \text{ (Нм)}; \quad (1.16)$$

где $M_{\text{xx}} = 3,1$, Нм.

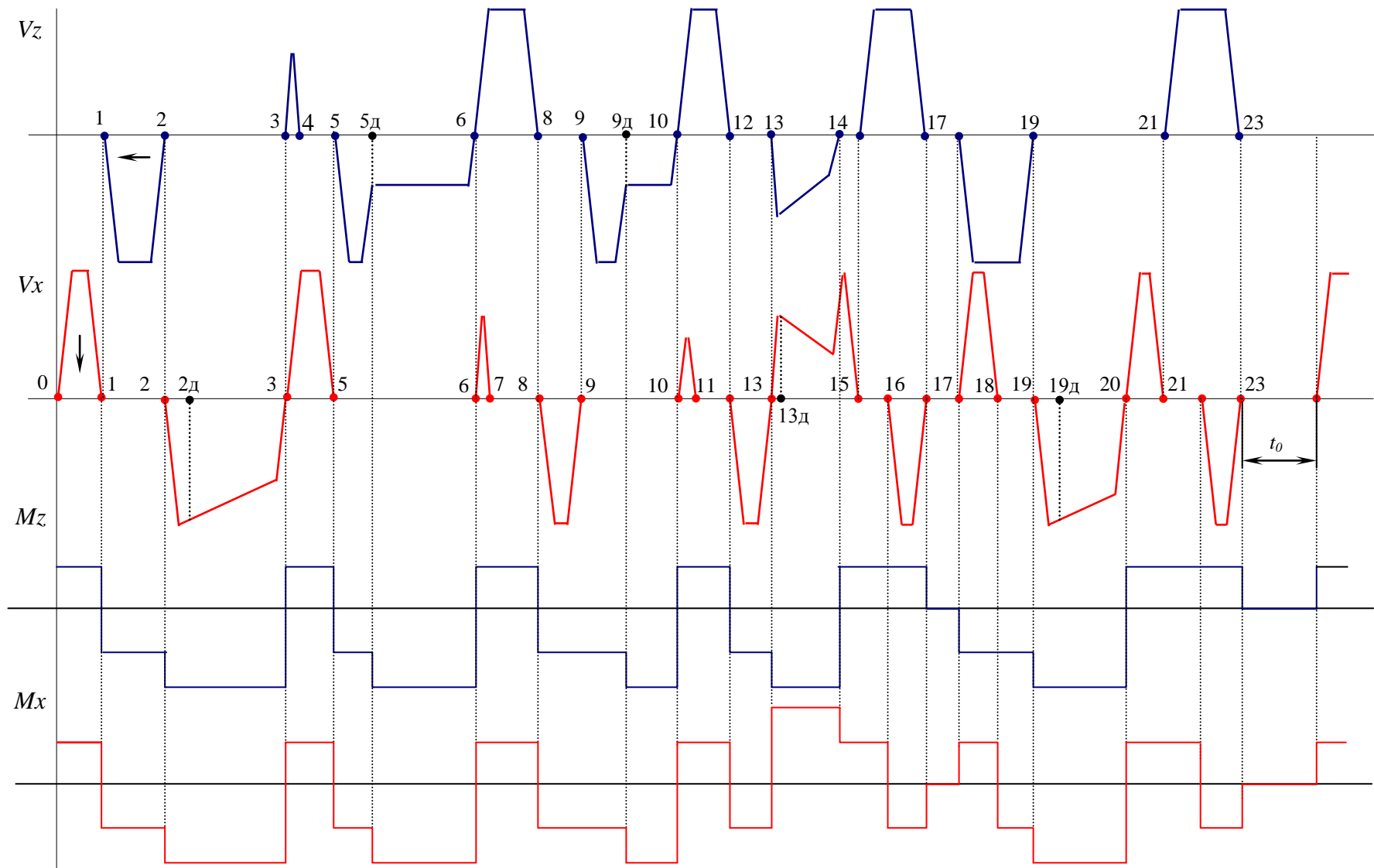


Рис.1.3. Діаграми швидкостей подач і статичних навантажень приводів подач токарного верстата

Для поперечної подачі.

$$M_{\text{бхХ}} = M_{\text{mpХ}} = M_{\text{mp.nХ}} + M_{\text{nХ}} + M_z = 0,12 + 15,73 + 0,58 = 16,47 \text{ (Нм)}; \quad (1.17)$$

де $M_{\text{mp.nХ}}$ – момент від сил тертя в напрямних; $M_{\text{nХ}}$ – момент від попереднього натягу в упорних підшипниках гвинта; M_z – момент від натягу гвинтової передачі.

$$M_{\text{mp.nХ}} = \frac{F_{\text{mp.nХ}} \cdot t_\epsilon}{2000 \cdot \pi \cdot i \cdot n_z \cdot n_p} = \frac{392 \cdot 10}{2000 \cdot 3,14 \cdot 6,25 \cdot 0,98 \cdot 0,85} = 0,12 \text{ (Нм)}; \quad (1.18)$$

где $F_{\text{mp.nХ}} = \mu \cdot m \cdot g = 0,1 \cdot 400 \cdot 9,8 = 392 \text{ (Н)}; \quad (1.19)$

μ – коефіцієнт тертя в напрямних; m – маса поступально рухомих вузлів (супорт, салазки і т.п.), кг; t_ϵ – крок гвинта, мм; n_z , n_p – ККД кульково-гвинтової передачі (КГП) і редуктора; i – передавальне відношення редуктора.

$$\mu = 0,1; \quad g = 9,8; \quad m_x = 400; \quad n_\epsilon = 0,98; \quad n_p = 0,85;$$

$$M_{\text{nХ}} = n_n \cdot F_{\text{nХ}} \cdot f_l \cdot r = 2 \cdot 1971 \cdot 0,1 \cdot 0,04 = 15,7 \text{ (Нм)}; \quad (1.20)$$

де n_n – кількість підшипників; f_l – коефіцієнт тертя в підшипниках; r – радіус цапфи під підшипником, м;

$$F_{\text{nХ}} = (F_{\text{Xi}} + F_{\text{mp.nХ}}) / 3 = (5521 + 392) / 3 = 1971 \text{ (Н)}; \quad (1.21)$$

де F_{Xi} – осьове зусилля подачі (обираємо максимальне);

$$n_n = 2; \quad f_l = 0,1; \quad r = 0,04.$$

При робочому ході момент дорівнює:

Для поздовжньої подачі:

$$M_{\text{pxZi}} = M_{\text{mpZ}} + M_p \text{ (Нм)}; \quad (1.22)$$

$$M_{\text{pZi}} = F_{\text{Zi}} \cdot t_\epsilon / 2000 \cdot \pi \cdot i \cdot n_z \cdot n_p \text{ (Нм)}; \quad (1.23)$$

де M_p – момент від сил різання за відповідною координатою, Нм.

Для поперечної:

$$M_{\text{pxXi}} = M_{\text{mpxХ}} + M_p \text{ (Нм)}; \quad (1.24)$$

$$M_{\text{pXi}} = F_{\text{Xi}} \cdot t_\epsilon / 2000 \cdot \pi \cdot i \cdot n_z \cdot n_p \text{ (Нм)}; \quad (1.25)$$

Розрахунки формул (1.22 - 1.25) зведені в таблицю (1.9)

Розрахунки моментів при робочому ході

Подачі	Ділянки	$M_{mpi}, Нм$	$M_{pi}, Нм$	$M_{pxi}, Нм$
Поздовжня (Z)	Ділянка 1	10,1	0,28	10,38
	Ділянка 2		0,36	10,46
	Ділянка 3		0,6	10,7
Поперечна (X)	Ділянка 1	16,47	1,68	18,1
	Ділянка 2		0,56	17,03

Момент інерції електроприводу, приведений до валу двигуна:

$$J = 1,2 \cdot J_{ov} + J_g / i^2 + m_z \cdot t_g^2 / 4 \cdot i^2 \cdot \pi^2 \text{ (кг} \cdot \text{м}^3 \text{)}; \quad (1.26)$$

$$J = 1,2 \cdot 0,042 + 0,0000815 / 6,25^2 + 1500 \cdot 0,01^2 / 4 \cdot 6,25^2 \cdot \pi^2 = 0,0505 \text{ (кг} \cdot \text{м}^3 \text{)};$$

$$J_g = \pi \cdot D_g^4 \cdot L_g \cdot \gamma / 32 = 3,14 \cdot 0,08 \cdot 0,0026 \cdot 7800 / 32 = 0,081 \cdot 10^{-3} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2 \text{)}; \quad (1.27)$$

$$m = 1500 \text{ кг}, t_g = 10 \text{ мм}, l_g = 2,6 \text{ мм}, d_v = 80 \text{ мм}, \gamma = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3;$$

де 1,2 - коефіцієнт, що враховує момент інерції муфти (шестерні) на валу двигуна;

m – маса поступально рухомих частин; J_v - момент інерції гвинта;

Вважаючи тривалості розгону і гальмування при швидкому ході на багато меншими тривалості усталеного руху, тривалість кожного з періодів швидкого ходу визначаємо як:

$$t_{uxi} = 6 \cdot L_i / 100 \cdot V_{ux} \text{ (с)}; \quad (1.28)$$

Результати заносимо в таблицю (1.10)

Таблиця 1.10

Розрахунки формули 1.28

Точки (см рис.1.1-2)	$L_i, мм$	$V_{bx}, м/хв$	$t_{uxi}, с$
0 - 1	15	3,2	0,28
1 - 2	50		0,94

2 – 2д	3		0,056
3 – 5	11		0,2
5 – 5д	3		0,056
6 – 8	40		0,75
8 – 9	5,6		0,1
9 – 9д	2		0,037
10 – 12	17		0,32
12 – 13	6,5		0,12
13 – 13д	1		0,018
14 – 15	6		0,11
15 – 17	64		1,2
17 – 19	72		1,35
19 – 19д	5		0,09
20 – 21	9		0,17
21 - 23	72		1,35

де L_i – відстань уздовж осі X і Y відповідно, між точками (див. табл.1.10)

$$\sum t_{uxi} = 7,147 (c); \quad (1.29)$$

Тривалість руху між точками 3 - 4, 6 - 7, 10 - 11, здійснюваної за трикутною тахограми, дорівнює:

$$t_{\Delta i} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot i \cdot \Delta \cdot \varepsilon_m + \varepsilon_p}{t_2 \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_p}} (c); \quad (1.30)$$

де

$$\varepsilon_m = (M_{\max} + M_{mp})/J = (170 + 9,95)/0,05 = 3566; \quad \varepsilon_p = (M_{\max} - M_{mp})/J = (170 - 9,95)/0,05 = 3165;$$

-

- прискорення при гальмуванні і розгоні, (рад/с²), Δ – відстань між траєкторією швидкого ходу і кромкою деталі.

Розрахунки зведені в таблицю (1.11)

Тривалість рухів по трикутній тахограмі

Точки (см рис. 1.1-2)	t_{Δ} , мм	Δ , мм	π , рад	t_{Δ} , с
3 – 4, 6 – 7	10	5	3,14	0,15
10 – 11		3		0,11

$$\sum t_{\Delta} = 0,41 (с); \quad (1.31)$$

Тривалість робочого ходу на кожному з переходів (відрізки 2д-3, 5д-6, 9д-10, 13д-14, 19д-20) дорівнює тривалості переходу. Тривалість розгону і гальмування на ділянках різання:

$$t_{ppi} = \frac{2\pi \cdot i \cdot J \cdot V_{ni}}{(M_{\max} - M_{pxi}) \cdot t_z} (с); \quad (1.32)$$

$$t_{mpi} = -\frac{2\pi \cdot i \cdot J \cdot V_{ni}}{(M_{\max} + M_{pxi}) \cdot t_z} (с); \quad (1.33)$$

де V_n – і M_{px} – швидкість подачі і статичний момент на відповідному переході,

J – момент інерції електроприводу, приведеного до валу двигуна.

Розрахунки формул (1.32 - 1.33) зведені в таблицю (1.12)

Таблиця 1.12

Тривалість розгону і гальмування на ділянках різання

Тривалість розгону t_{ppi}	Подачі	Ділянки	π , рад	J , кг·м ²	V_{ni} , мм/хв	M_{\max} , Н·м	M_{pxi} , Н·м	$t_{ppi}t_{mpi}$, с
	Поздовжня	Ділянка 1	3,14	0,05	867	170	10,38	1,077
		Ділянка 2			970,3		10,46	1,206

		Ділянка 3			1171,3		10,71	1,458
	Поперечна	Ділянка 1			509		18,1	0,667
		Ділянка 2			894,6		17,03	1,16
Тривалість гальмування t_{mpi}	Поздовжня	Ділянка 1			867		10,38	- 0,953
		Ділянка 2			970,3		10,46	-1,066
		Ділянка 3			1171,3		10,7	- 1,285
	Поперечна	Ділянка 1			509		18,1	- 0,537
		Ділянка 2			894,6		17,03	- 0,949

$$\sum(t_{ppi} + t_{mpi}) = 10,35 (с); \quad (1.34)$$

1.4 Тривалість пуску і пусковий момент ВМД

Перевантажувальна здатність ВМД (високомоментного двигуна) залежить від швидкості. Зокрема, в періоди пуску і гальмування динамічна механічна характеристика не повинна виходити за межі області, обмеженою максимальним моментом M_{max} і комутаційної кривої 3 (див. рис.1.4) і відповідну криву 2. Для обмеження навантаження в динамічних режимах в САР швидкості введений вузол залежного струмообмеження, який обмежує завдання на струм, аппроксимує криву 3 ламаної FED.

Тривалості розгону (гальмування) на ділянках AF, FE, і FD рівні.

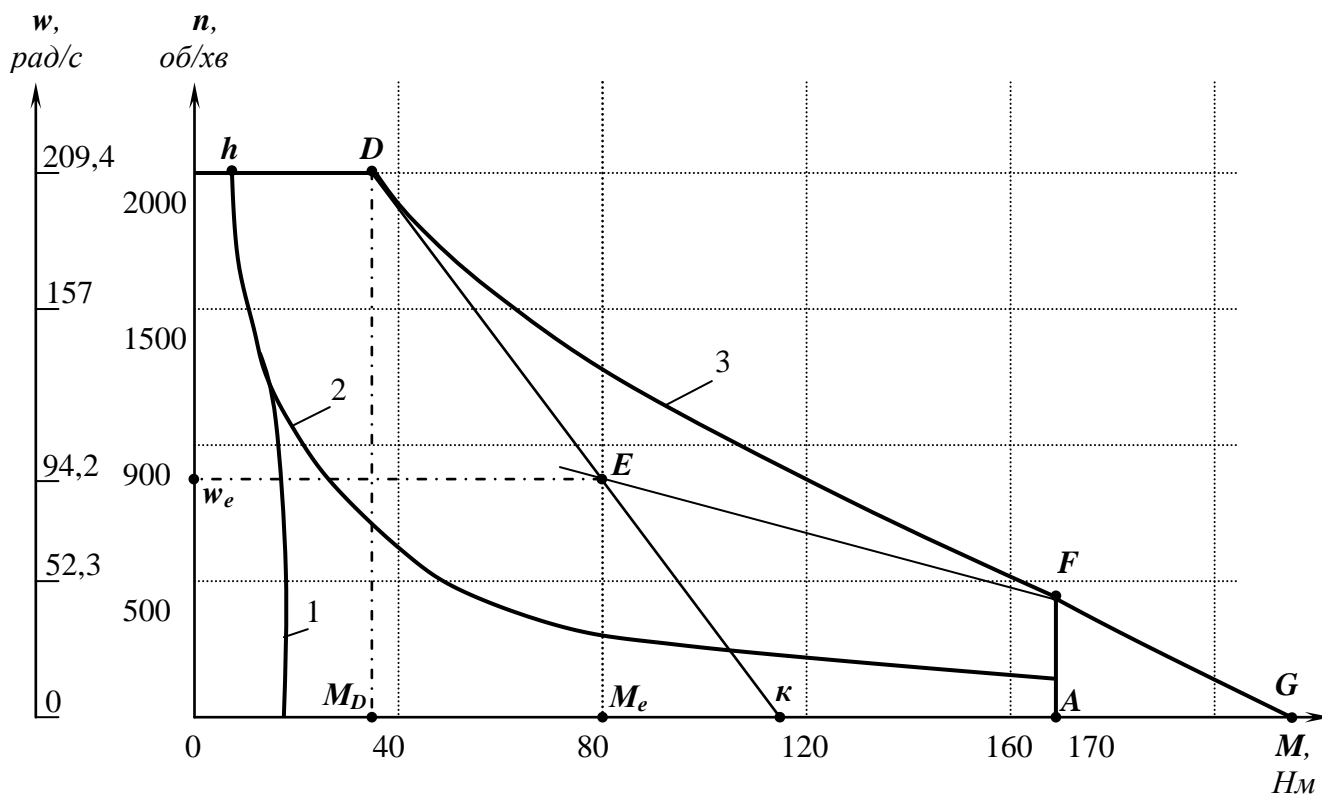


Рис.1.4. Динамічна механічна характеристика двигуна 2ПБВ112М

Тривалість пуску при швидкому ході:

$$\left. \begin{aligned} t_{AF} &= J \cdot (w_F - w_A) / (M_{\max} - M_c), \\ t_{FE} &= T_{FE} \cdot \ln[(M_{\max} - M_c) / (M_E - M_c)], \\ t_{ED} &= T_{ED} \cdot \ln[(M_E - M_c) / (M_D - M_c)], \\ t_n &= t_{AF} + t_{FE} + t_{ED}. \end{aligned} \right\} \quad (1.35)$$

Тривалість гальмування при швидкому ході:

$$\left. \begin{aligned} t_{AF} &= J \cdot (w_F - w_A) / (M_{\max} + M_c), \\ t_{FE} &= T_{FE} \cdot \ln[(M_{\max} + M_c) / (M_E + M_c)], \\ t_{ED} &= T_{ED} \cdot \ln[(M_E + M_c) / (M_D + M_c)], \\ t_m &= t_{AF} + t_{FE} + t_{ED}. \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

Тут

$$\begin{aligned} T_{FE} &= J \cdot |(dw/dM)| = J \cdot |(w_E - w_F) / (M_{\max} - M_E)|; \\ T_{ED} &= J \cdot |(w_{\max} - w_E) / (M_E - M_D)|. \end{aligned}$$

Розрахунки виразів (1.35 - 1.36) зведені в таблицю (1.13)

Таблиця 1.13

Тривалість розгону і гальмування ВМД

Найменування	t_{AF}, c	t_{FE}, c	t_{ED}, c	T_{FE}	T_{ED}	t_n, c	t_m, c
Розгін	0,015	0,021	0,13	0,026	0,128	0,16	-
Гальмування	0,013	0,018	0,09	0,026	0,128	-	0,12

де $w_A=0(\text{рад}/\text{с})$; $w_F=47,1(\text{рад}/\text{с})$; $w_E=94,2(\text{рад}/\text{с})$; $M_{\max}=170(\text{Нм})$; $M_c=9,95(\text{Нм})$;
 $M_E=80(\text{Нм})$; $M_D=35(\text{Нм})$; $J=0,05(\text{кг}\cdot\text{м}^2)$.

Момент, при його лінійної залежності від швидкості, є експоненційною функцією часу. Для спрощення розрахунків замінимо експоненти прямими. При цьому під час розгону дійсний момент буде менше розрахункового, а при гальмуванні - навпаки. Тоді еквівалентні (середньоквадратичні) моменти на окремих ділянках будуть:

$$\left. \begin{aligned} M_{AF} &= M_{\max}, \\ M_{FE} &= \sqrt{(M_{\max}^2 + M_E^2 - M_{\max} \cdot M_E)/3}, \\ M_{ED} &= \sqrt{(M_E^2 + M_D^2 - M_E M_D)/3}. \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

Результати розрахунку вираження (1.37) занесені в таблицю (1.14)

Розгін не відбувається до швидкості, меншій, ніж w_{\max} , а гальмування до швидкості, більшої нуля.

Еквівалентний момент за час пуску:

$$M_{ПЭ} = \sqrt{(M_{AF}^2 \cdot t_{AF} + M_{FE}^2 \cdot t_{FE} + M_{ED}^2 \cdot t_{ED})/t_n} \quad (\text{Нм}); \quad (1.38)$$

Еквівалентний момент за час гальмування:

$$M_{ТЭ} = \sqrt{(M_{AF}^2 \cdot t_{AF} + M_{FE}^2 \cdot t_{FE} + M_{ED}^2 \cdot t_{ED})/t_m} \quad (\text{Нм}); \quad (1.39)$$

Розрахунки формул (1.38 - 1.39) занесені в таблицю (1.14)

Таблиця 1.14

Еквівалентні моменти за час пуску (гальмування)

Найменування	$M_{AF},$ (Нм)	$M_{FE},$ (Нм)	$M_{ED},$ (Нм)	$t_n,$ с	$t_m,$ с	$M_{ПЭ},$ (Нм)	$M_{ТЭ},$ (Нм)
Пуск	170	85	40,1	0,16	-	70,4	-
Гальмування	170	85	40,1	-	0,12	-	80,6

Загальна тривалість циклу обробки деталі:

$$t_y = t_0 + \sum t_i + \sum t_{ux} = 3 + 4,6 + 7,157 = 14,75 \text{ (с)}; \quad (1.40)$$

Еквівалентний момент:

$$M_{Э} = \sqrt{\{M_{ПЭ}^2 \sum (t_{n0} + t_{m0}) + M_{\max}^2 [\sum (t_{ppi} + t_{mpi}) + \sum t_{\Delta i}] + M_{px}^2 \sum t_i + M_{ux}^2 \sum t_{uxi}\}/t_y} \quad (\text{Нм}); \quad (1.41)$$

Розрахунок, а також всі моменти і часи, необхідні для розрахунку вираження (1.41) зведені в таблицю (1.15)

Таблиця 1.15

Розрахунок вираження (2.41)

$\Sigma(t_{n\sigma}+t_{m\sigma}),$ <i>c</i>	$\Sigma(t_{ppi}+t_{mpi}),$ <i>c</i>	$\Sigma t_i,$ <i>c</i>	$\Sigma t_{\delta xi},$ <i>c</i>	$\Sigma t_{\Delta},$ <i>c</i>	$M_{нз},$ <i>Hм</i>	$M_{та},$ <i>х,</i> <i>Hм</i>	$M_{рх},$ <i>Hм</i>	$M_{ух},$ <i>Hм</i>	$t_{ц},$ <i>c</i>	$M_{э},$ <i>Hм</i>
6,69	10,35	4,6	7,16	0,41	68,67	170	10,71	10,1	14,75	18,3

1.5 Перевірка попередньо обраного двигуна

Критеріями перевірки двигуна подачі є нагрів, перевантажувальна здатність і тривалість пуску.

Двигун не перегрівається, тому що: $M_{э} \leq M_{d0}, 18,3 < 18,5;$

ВМД не перевантажений, так як на кожному з переходів точка з координатами(n_i, M_{ci}) лежить лівіше кривої допустимої статичної перевантаження двигуна (лінія 2 рис.1.4). Крім того виконується умова $M_{ух} \leq M_h; 10,1 < 15$ (рис.4)

Двигун обран вірно.

1.6 Вибір силових елементів електропривода

Для верстатів з ЧПУ розроблена гамма комплектних тиристорних електроприводів постійного струму, що включають в себе тиристорні перетворювачі (ТП) для ланцюгів якоря (при необхідності - і збудження), необхідний набір регуляторів і датчиків, силові трансформатори або мережеві реактори, згладжуючий дросель (при необхідності), блок захистів, блокувань і сигналізації. Номінали ТП узгоджені з параметрами що випускаються промисловістю електродвигунів. Комплектний електропривод вибирається після вибору двигуна за номінальним струмом і напруою якоря:

$$I_{dн} \geq I_{d0};$$

$$U_{dн} \geq U_n$$

$$I_{dn} = 50 A; U_{dn} = 230 B;$$

Вибираємо привід серії ЕПУ1М6-2-3727П УХЛ4, випускається на заводі «Перетворювач» м.Запоріжжя, і є модернізованим аналогом приводу ЕПУ-2.

Схема силових ланцюгів ТП комплектного електроприводу наведена на (рис.1.6), схема підключення до мережі на (рис.1.5).

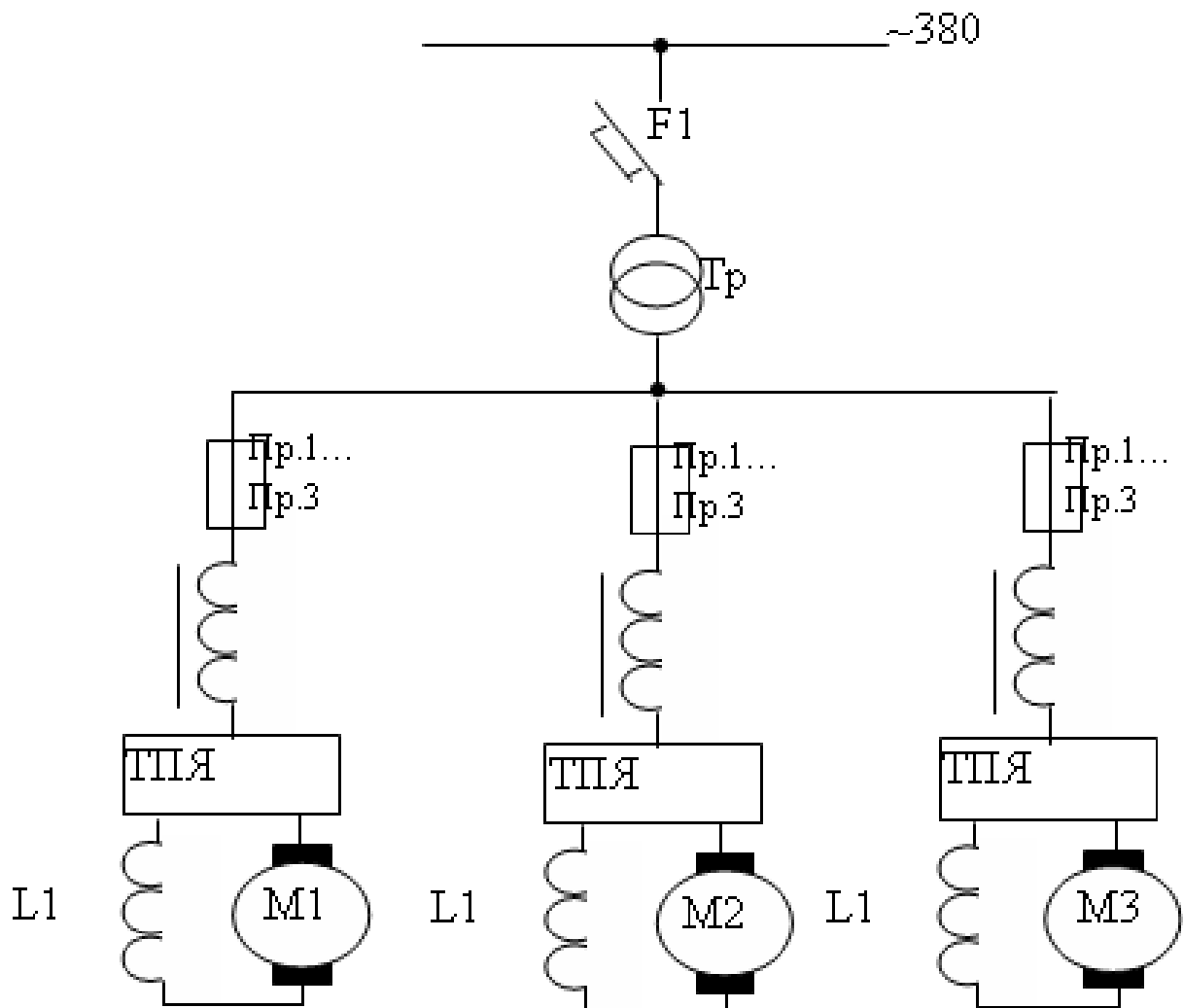


Рис.1.5. Схема підключення тиристорних електроприводів постійного струму для приводу подач

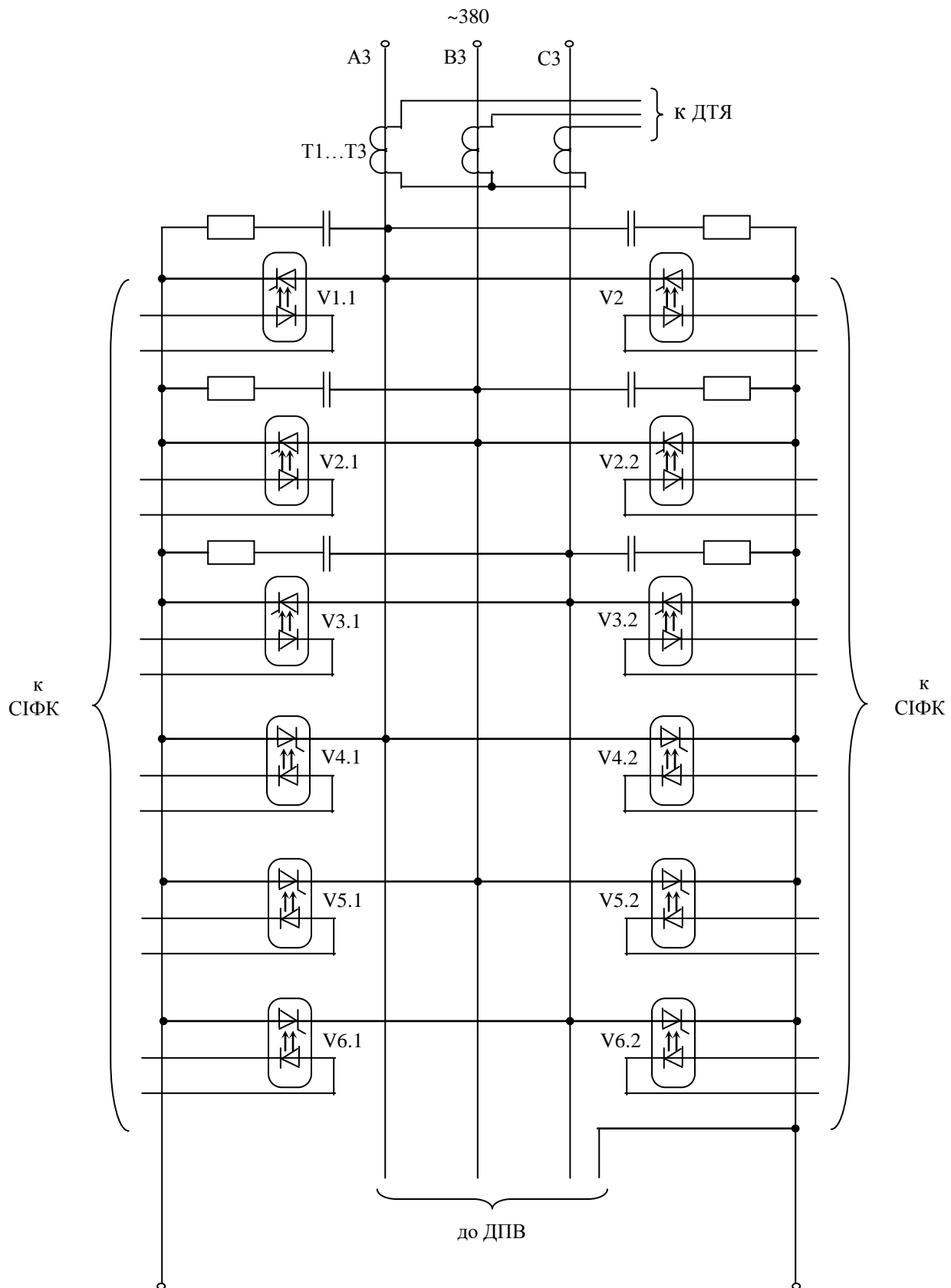


Рис.1.6. Силова схема тиристорного перетворювача для ланцюга якоря

Силовий трансформатор для живлення ТП приводів подач вибирається за напругою

$$U_{2л} \geq U_{дн}/1,35; \quad 230/1,35 = 170,37 (В);$$

і потужності

$$S_m \geq 1,4 \cdot n_n \cdot k_c \cdot U_{2л} \cdot I_{дн}, (кВА); \quad 1,4 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 170,37 \cdot 50 = 16,935 (кВА);$$

де n_n – кількість приводів подач (2 для токарного верстата); k_n – коефіцієнт попиту, враховує неодночасність роботи приводів подач ($k_n = 0,7$).

Обираємо трансформатор типу ТСЗ - 25, необхідні дані наведені в (табл.1.16)

Таблиця 1.16

Дані трансформатора ТСЗ - 25

S_m кВА	Номінальна напруга		U_k %	$\Delta P_{кз}$ Вт
	$U_{1л}, В$	$U_{2л}, В$		
25	380	208	2	380

1.7 Перевірка на необхідність дроселя

Обмеження зони переривчастих струмів

Для отримання гранично-безперервного режиму при заданому значенні α , в ланцюг випрямленого струму необхідно включити індуктивність L_d , значення якої можна визначити за виразами, задавшись величиною гранично-безперервного струму

$$I_{dzz} = (0,05 - 0,1) \cdot I_{дн} = 0,05 \cdot 50 = 2,5 (А); \quad (1.42)$$

$$L_d = \frac{1}{w \cdot p} \left[\frac{U_{d0}}{I_{dzz}} \cdot K_{cp} - X_a \right] = \frac{1}{314 \cdot 6} \left[\frac{280,8}{2,5} \cdot 0,05 - 0,13 \right] = 0,0029 (Гн); \quad (1.43)$$

де $p = 6$ – пульсність трифазної мостової схеми ТП, $w = 314 \text{ рад/с}$, $K_{cp} = 0,05$,

$$X_a = 2X_{a\phi} = \frac{2U_k \cdot U_{2\phi}}{100 \cdot I_{a\phi}} = 2 \cdot 0,065 = 0,13 (Ом); \quad (1.44)$$

Індуктивність якоря визначається за виразом:

$$L_{я} = K \cdot \frac{30 \cdot U_{ян}}{\pi \cdot I_{ян} \cdot n_n \cdot p_o} = 0,2 \cdot \frac{30 \cdot 42}{3,14 \cdot 35 \cdot 500 \cdot 4} = 0,0011 \text{ (Гн)}; \quad (1.45)$$

Знаючи індуктивність якоря двигуна $L_{я}$, можна визначити, чи необхідний додатковий дросель до отримання заданого початково-безперервного струму і яка його індуктивність:

$$L_{dp} = L_d - L_{я} = 0,0029 - 0,0011 = 0,0018 \text{ (Гн)}; \quad (1.46)$$

Так як $L_{я} < L_d$, то необхідний дросель для обмеження зони переривчастих струмів.

Згладжування пульсацій випрямленого струму

У симетричній бруківці і нульових схемах найбільшу амплітуду має основна гармоніка ($k_2 = 1$). Амплітуди гармонік більш високої кратності значно менші, а дія дроселя на них ефективніше, тому розрахунок індуктивності дроселя для цих схем ведеться тільки по основній гармоніці.

$$L_{dp} = \frac{U_{dnm} \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot k_2 \cdot p \cdot w \cdot i_1 \cdot I_{dn}} - L_{я} = \frac{56,16 \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot 1 \cdot 6 \cdot 314 \cdot 4 \cdot 50} - 0,0089 = 0,0016 \text{ (Гн)}; \quad (1.47)$$

де $U_{dnm} = 0,2 \cdot U_{d0} = 0,2 \cdot 280,8 = 56,16 \text{ (В)}$, - амплітудні значення гармонійних складових випрямленої напруги; $U_{d0} = 1,35 \cdot U_{2л} = 1,35 \cdot 208 = 280,8 \text{ (В)}$, - максимальна випрямлена напруга перетворювача при куті регулювання $\alpha = 0$ (де $U_{2л}$ – лінійна напруга вторинної обмотки силового трансформатора); $i_1 = 0,08 I_{dn} = 0,08 \cdot 50 = 4 \text{ (А)}$ - діюче значення 1-ої гармоніки.

Необхідний дросель.

Обмеження струму через вентилі при к.з. на стороні постійного струму

При короткому замиканні на стороні постійного струму дросель повинен обмежити швидкість наростання аварійного струму, щоб він не перевищив небезпечного для вентилів значення до спрацьовування захисних пристроїв (від моменту перевищення струму уставки захисного пристрою до початку розбіжності контактів і формування електричної дуги).

Обмеження струму через вентилі може бути отримано за рахунок індуктивностей розсіювання обмоток трансформатора і індуктивності в ланцюзі постійного струму.

Індуктивність дроселя визначається за такою наближеною формулою:

$$L_{op} = \frac{2,1 \cdot U_{2л}}{w(I_{доd} - I_{ноч})} - \frac{X_a}{w} = \frac{2,1 \cdot 208}{314(600 - 313,4)} - \frac{0,13}{314} = 0,004 \text{ (Гн)}; \quad (1.48)$$

де $I = 12_{дн} \cdot I = 12 \cdot 50 = 600 \text{ (А)}$, максимально допустимий протягом одного напівперіода струм гвентилів; $I_{ноч} = I_{к.з} = U_{я} / R_{я} = 42 / 0,134 = 313,4 \text{ (А)}$, - струм навантаження в момент короткого замикання. Необхідний дросель.

Обмеження струму при перекиданні інвертора

При однофазному перекиданні в мостовій схемі якір двигуна закорачивається через вентилі.

Індуктивність дроселя, необхідна для обмеження аварійного струму на час спрацьовування захисту, може бути визначена з наближеного виразу:

$$L_{op} = \frac{0,01 \cdot R_a}{\ln \frac{E_{ноч} / R_a - I_{ноч}}{E_{ноч} / R_a - I_{ноч}}} = \frac{0,01 \cdot 0,134}{\ln \frac{37,3 / 0,134 - 313,4}{37,3 / 0,134 - 600}} = -0,0006 \text{ (Гн)}; \quad (1.49)$$

де $E_{ноч} = U_c - I_{я} \cdot R_{я} = 42 - 35 \cdot 0,134 = 37,3$, - ЕРС двигуна в момент перекидання;
 $I_{ноч}$ – струм двигуна перед перекиданням.

У якості необхідної індуктивності дроселя в ланцюзі постійного струму приймається найбільше зі значень L_{op} , знайдених за виразами (1.46 - 1. 49).

Вибираємо дросель типу ФРОС – 250/0,5УЗ

- Номінальний постійний струм (I_n) – 250А;
- Номінальна індуктивність (L_{cd}) – 6,5мГн;
- Активний опір (r_{cd}) – 17,6мОм;
- Маса (m) – 216кг.

1.8 Розрахунок параметрів САУ

1.8.1 Тиристорний привід постійного струму

Параметри об'єкта управління

Опору і індуктивність фазної обмотки силового трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} r_m &= \Delta P_{\kappa\sigma} \cdot U_{2л}^2 / S_m^2 = 380 \cdot 208^2 / 25000^2 = 0,026 \text{ (Ом)}, \\ z_m &= U_{\kappa}^2 \cdot U_{2л}^2 / 100 \cdot S_m = 2^2 \cdot 208^2 / 100 \cdot 25000 = 0,069 \text{ (Ом)}, \\ x_m &= \sqrt{z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{0,069^2 - 0,023^2} = 0,065 \text{ (Ом)}, \\ L_m &= x_m / \omega = 0,065 / 314 = 0,0002 \text{ (Гн)}; \end{aligned} \right\} \quad (1.50)$$

Опір, обумовлений перекриттям вентилів:

$$R_n = m \cdot x_m / 2 \cdot \pi = 6 \cdot 0,065 / 2 \cdot 3,14 = 0,062 \text{ (Ом)}; \quad (1.51)$$

Активний опір, індуктивність і електромагнітна постійна якірного ланцюга, наведені до температури обмоток 90°:

$$\left. \begin{aligned} R_e &= (r_{\text{я}} + r_{\text{сд}} + 2r_m) [1 + (90 - t_0^0) \cdot \alpha] + R_n = \\ &= (0,134 + 0,0176 + 2 \cdot 0,026) [1 + (90 - 20) \cdot 0,004] + 0,062 = 0,323 \text{ (Ом)}, \\ L_e &= L_{\text{я}} + L_{\text{сд}} + 2L_m = 0,000898 + 0,0065 + 2 \cdot 0,0002 = 0,0078 \text{ (Гн)}, \\ T &= L_e / R_e = 0,0078 / 0,323 = 0,0241 \text{ (с)}; \end{aligned} \right\} \quad (1.52)$$

де $\alpha = 0,004$ – температурний коефіцієнт опору для міді; t_0^0 – температура «холодної» обмотки.

Коефіцієнт моменту для високомоментного двигуна:

$$K\Phi = M_{d0} / I_{d0} = 18,5 / 35 = 0,53; \quad (1.53)$$

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача з косинусоїдальною опорною напругою в СІФК:

$$k_{np} = U_{d0} / U_{y.n} = 280,8 / 10 = 28,08; \quad (1.54)$$

де $U_{d0} = k_{cx} \cdot U_{2л} = 1,35 \cdot 208 = 280,8 \text{ (В)}$, – максимально можлива середня випрямлена напруга; $U_{y.n}$ – максимальна напруга на вході.

1.9 Класична система підпорядкованого регулювання

Загальні відомості

Основними недоліками систем електроприводу з загальним сумуючим підсилювачем (регулятором) є:

- неможливість оптимального налаштування одночасно всіх регульованих величин, так як зі зміною налаштування однієї з змінних неминуче змінюються налаштування інших контрольованих величин;
- велика різноманітність структур ускладнює проектування та уніфікацію систем електроприводу;
- труднощі обмеження регульованих змінних;
- велика чутливість до змін параметрів системи.

Зазначених недоліків позбавлені системи підлеглого регулювання координат з послідовною корекцією, що знаходять широке застосування у всіх галузях промисловості.

Характерною рисою систем підпорядкованого регулювання є те, що кількість регуляторів і контурів регулювання дорівнює кількості регульованих координат. Причому регулятори з'єднуються послідовно, а вихідний сигнал попереднього регулятора є завданням для наступного. Отже, один регулятор підпорядкований іншому, що і дало назву данній системі. Обмеження регульованої координати досягається обмеженням сигналу її завдання.

Крім того, контури регулювання підпорядковані один одному за принципом убунання швидкодії від швидкодіючих внутрішніх контурів до повільних зовнішніх. Завдяки такому розподілу процесів у часі, яке досягається відповідним налаштуванням контурів, виявляється можливим робити налаштування і розглядати динаміку кожного контуру незалежно один від одного. Це є основною перевагою систем підпорядкованого регулювання.

Стосовно до електроприводів постійного струму з тиристорними перетворювачами системи підлеглого регулювання містять два контури: основний (зовнішній) контур регулювання швидкості і підлеглий йому внутрішній контур струму. Стежучий електропривод містить три контури: зовнішній контур положення і підлеглий йому внутрішні контури швидкості і струму.

Функціональна схема регулювання швидкості електроприводу постійного струму, виконаного по підлеглому принципу, наведена на рис. 1.7. У схемі є два регулятора: зовнішній регулятор швидкості РШ і внутрішній регулятор струму РС, включених послідовно. Двигун М отримує живлення від керованого перетворювача КП. Швидкість двигуна регулюється вниз від основної зміною напруги на якорі. Сигнал зворотного зв'язку по струму знімається з датчика струму ДС і надходить на вхід регулятора струму як сигнал зворотного зв'язку. У реальних електроприводах датчиком струму можуть бути вимірювальний шунт, обмотки додаткових полюсів, компенсаційна обмотка, або трансформатори струму і випрямляч, включені в мережу змінного струму на вході керованого перетворювача. В даний час датчики струму виробляються також на базі елементів Холла.

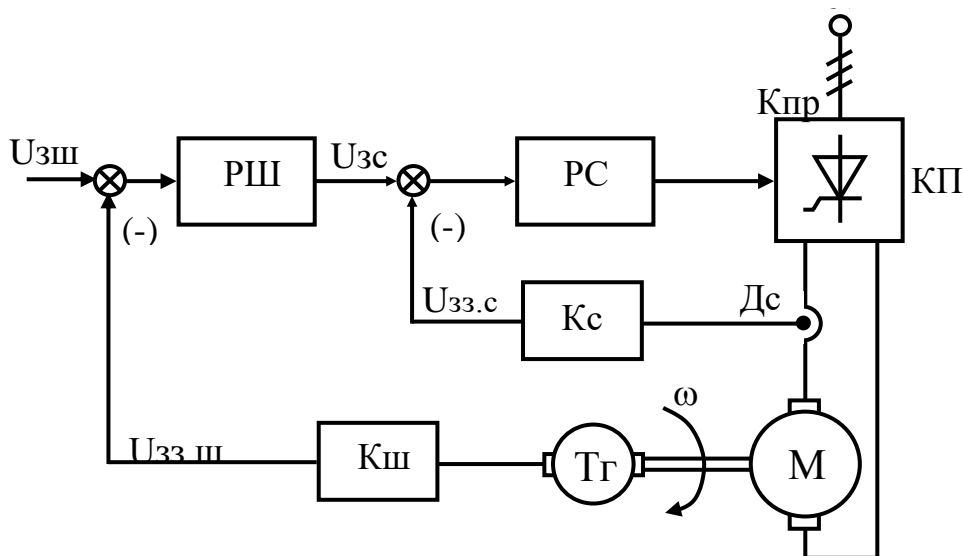
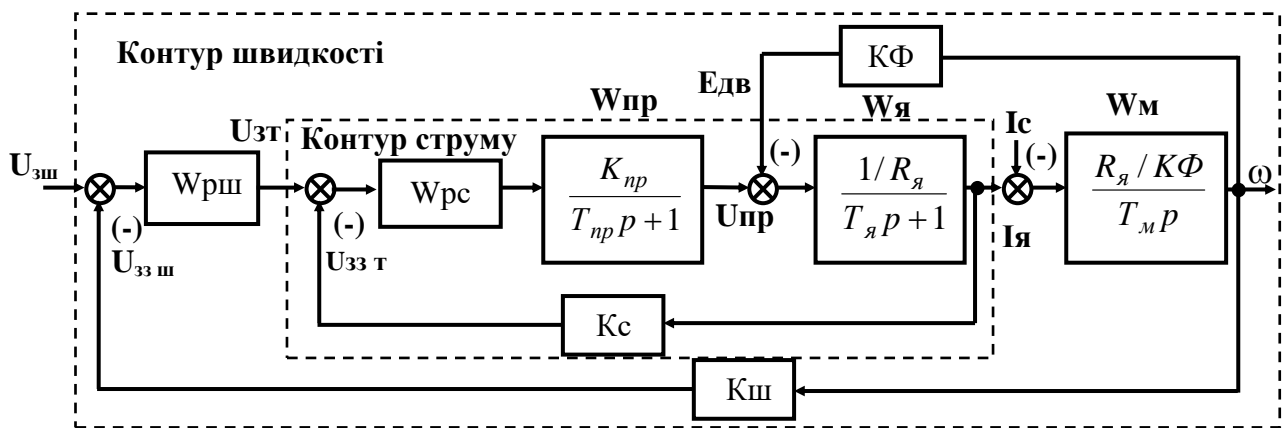


Рис. 1.7. Функціональна схема електроприводу з системою підпорядкованого регулювання координат

Зворотній зв'язок по швидкості реалізується за допомогою тахогенератора ТГ, напруга якого подається на вхід регулятора швидкості і порівнюється з напругою завдання U_{zc} .

На рис. 1.8 приведена структурна схема системи підлеглого регулювання швидкості, в якій є два контури, замкнутих незалежними зворотними зв'язками.



На рис. 1.8 приведена структурна схема системи підлеглого регулювання швидкості, в якій є два контури, замкнутих незалежними зворотними зв'язками.

Контур струму містить регулятор струму і об'єкт регулювання, який включає керований перетворювач з передавальною функцією $W_{пр}$, якірний ланцюг двигуна з функцією передачі $W_{я}$ і ланцюг зворотного зв'язку з коефіцієнтом передачі K_t . Структурна схема контуру струму ускладнюється наявністю внутрішнього зворотного зв'язку по ЕРС двигуна, яка надходить на вихід перетворювача. При розрахунку контуру струму зазвичай нехтують цим зв'язком, а при необхідності її компенсують, включаючи на вхід СІФК позитивний зворотний зв'язок, пропорційну ЕРС двигуна.

Об'єктом регулювання зовнішнього контуру швидкості є замкнутий оптимізований контур струму і інтегруюча ланка, що описує передавальну функцію механічної частини приводу. Контур замикається зворотним зв'язком за швидкістю з коефіцієнтом передачі K_s .

У системах підлеглого регулювання найчастіше використовують стандартне налаштування контурів регулювання з заздалегідь відомими показниками перехідного процесу.

Перш ніж приступити до розгляду стандартних налаштувань контурів регулювання, розглянемо способи компенсації великих постійних часу.

1.10. Компенсація великих постійних часу і вибір бажаної передавальної функції контура регулювання

Якщо об'єкт регулювання містить, окрім аперіодичної ланки з великою постійною часу, аперіодичну ланку з малою постійною часу T_μ

$$W_{об} = \frac{K_{об}}{(T_{об}p + 1)(T_\mu p + 1)}, \quad (1.55)$$

то для компенсації великої постійної часу слід застосовувати так само ПІ-регулятор з передатною функцією

$$W_p = K_p \frac{T_p p + 1}{T_p p}. \quad (1.56)$$

При цьому передатна функція розімкнутого контуру

$$W = \frac{K_{об} K_p (T_p p + 1)}{(T_{об} p + 1)(T_\mu p + 1) T_p p}. \quad (1.57)$$

Для компенсації великої постійної часу необхідно, як і в попередньому випадку, вибирати $T_p = T_{об}$. Це перша умова оптимізації (вибору параметрів) ПІ-регулятора для об'єктів з передавальної функцією (1.55).

Маємо з (1.57)

$$W = \frac{K_{об} K_p}{(T_\mu p + 1) T_{об} p} = \frac{K_{об} K_p}{T_\mu T_{об} p^2 + T_{об} p}. \quad (1.58)$$

Передавальна функція замкнутого контуру регулювання, знайдена за загальним правилом

$$W_3 = \frac{K_{об} K_p}{T_{об} T_\mu p^2 + T_{об} p + K_{об} K_p} = \frac{a_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (1.59)$$

Для вибору коефіцієнта посилення K_p пропорційної частини ПІ-регулятора виходять з того, щоб модуль передавальної функції (1.59) наближався до одиниці в заданій смузі частот. Хоча і в цьому випадку в момент стрибка сигналу, коли

найбільш виражені високі частоти спектра вхідного сигналу, вихідна величина буде відрізняться від вхідного. Однак далі основну роль грають більш низькі частоти і, якщо в смузі частот модуль амплітудно-частотної характеристики замкнутої системи буде близький до одиниці, то похибка буде прагнути до нуля.

Оскільки при виборі передавальної функції регулятора прагнуть, щоб модуль передавальної функції замкнутого контура по можливості ближче наближався до одиниці, то такий спосіб настройки називається модульного або технічного оптимуму.

Щоб вираз (1.59) прагнув до одиниці при низьких частотах, необхідно друга умова оптимізації ПІ-регулятора

$$a_1^2 = 2a_0a_2 \text{ або } T_{об}^2 = 2K_{об}K_pT_{об}T_{\mu}, \quad (1.60)$$

звідки знаходять умову для відбору другого параметра ПІ-регулятора

$$K_p = \frac{T_{об}}{2K_{об}T_{\mu}}. \quad (1.61)$$

Якщо (1.61) підставити в (1.59) з урахуванням $T_p = T_{об}$, то отримаємо передавальну функцію замкнутого контуру

$$W_3 = \frac{1}{2T_{\mu}^2p^2 + 2T_{\mu}p + 1}. \quad (1.62)$$

Зіставляючи (1.62) з типовою функцією передачі коливальної ланки

$$W_{\kappa} = \frac{1}{T^2p^2 + 2\xi Tp + 1}, \quad (1.63)$$

отримаємо значення коефіцієнта загасання передавальної функції (1.62) $\xi = \sqrt{2} / 2$. Такому коефіцієнту загасання коливальної ланки відповідає перехідна функція, наведена на рис. 1.9.

З цього малюнка видно, що час першого узгодження $t_1 = 4,7T_{\mu}$ час регулювання $t_2 = 8,4T_{\mu}$ а перерегулювання $\sigma = 4,3\%$.

Отримане рівняння (1.62) характерно для будь-якого контуру регулювання, оптимізованого за умовою модульного або технічного оптимуму,

незалежно від конкретного виконання ланок. При цьому перехідні характеристики контурів відрізняються тільки масштабом в часі відповідно до конкретної постійної часу T_{μ} . Перерегулювання координат буде однаковим.

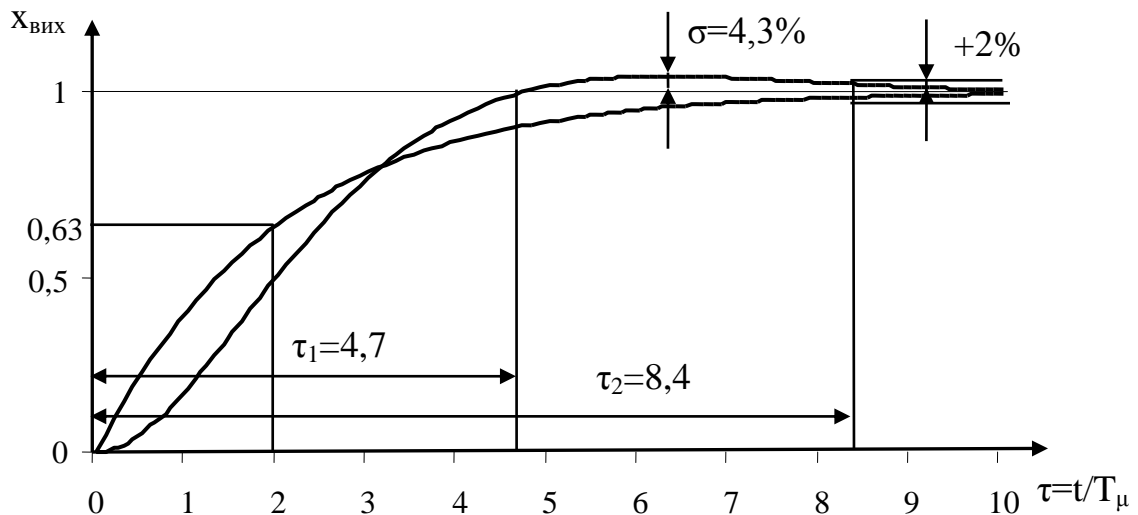


Рис. 1.9. Перехідна функція контуру регулювання, налаштованого на модульний (технічний) оптимум

Таким чином, згідно з (1.62) для даного об'єкту (1.55) бажана передатна функція розімкнутого оптимізованого контуру повинна мати вигляд:

$$W_{\delta} = \frac{1}{aT_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}, \quad (1.64)$$

де a – коефіцієнт налаштування (оптимізації) контуру, застосовуваний $a = 2$, при налаштуванні на технічний оптимум.

У загальному випадку бажана передатна функція розімкнутого n -го контуру

$$W_{\delta.n} = \frac{1}{a^n T_{\mu}^n p (a^{n-1} T_{\mu} p + 1)}. \quad (1.65)$$

1.11. Налаштування контуру струму і розрахунок параметрів регулятора

Згідно рис. 1.8 структурна схема контуру струму без урахування зворотнього зв'язку за ЕРС двигуна має вигляд, показаний на рис. 1.10, де позначено: T_μ - некомпенсована постійна часу контуру струму; $T = \mu T_{np}$, якщо не враховується інерційність датчика струму, та $T_\mu + T_{np} = T_{\partial.T}$ враховуючи інерційність датчика струму.

При одиничному зворотньому зв'язку, вказаному на рис. 1.10 пунктирною лінією, бажана передатна функція розімкнутого контуру струму відповідно до (1.64) має вигляд

$$W_{\partial.T} = \frac{1}{a_c T_\mu p (T_\mu p + 1)}. \quad (1.66)$$

Згідно рис. 1.10 передавальна функція об'єкта регулювання

$$W_{об.Т} = \frac{K_{np} (1/R_\text{я}) K_c}{(T_\mu p + 1)(T_\text{я} p + 1)}. \quad (1.67)$$

Передавальна функція регулятора струму знаходиться з рівняння

$W_{pT} W_{об.Т} = W_{\partial.Т}$, звідки

$$W_{pT} = \frac{W_{\partial.Т}}{W_{об.Т}} = \frac{T_\text{я} p + 1}{a_c T_\mu K_{np} (1/R_\text{я}) K_c p}. \quad (1.68)$$

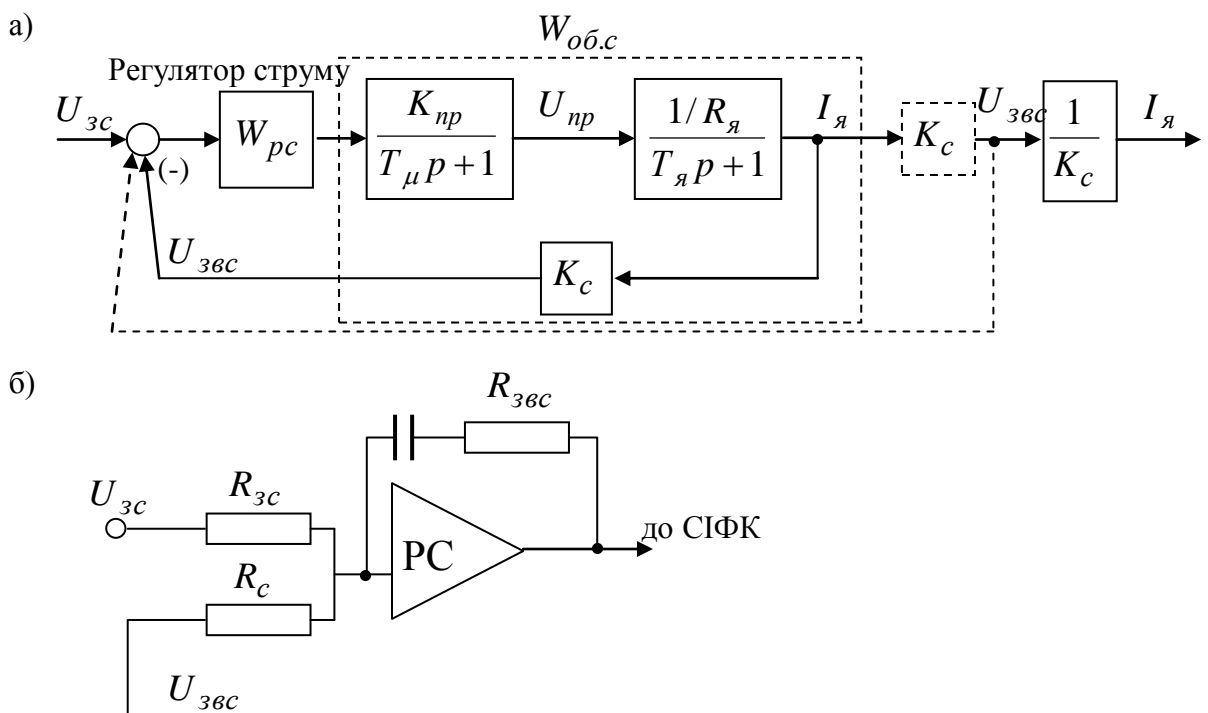


Рис. 1.10. Структурна схема контуру струму (а) та схема регулятора

Обозначим $a_T T_\mu K_{np} (1/R_\alpha) K_T = T_{iT}$ – постійна часу інтегрування регулятора струму. З огляду на це маємо з (1.68)

$$W_{pT} = \frac{T_\alpha}{T_{iT}} + \frac{1}{T_{iT} p} = K_{pT} + \frac{1}{T_{iT} p}. \quad (1.69)$$

Це ПІ-регулятор, де $K_{pT} = T_\alpha / T_{iT}$.

Іноді передавальну функцію регулятора струму записують таким чином:

$$W_{pT} = K_{pT} \frac{T_\alpha p + 1}{T p}. \quad (1.70)$$

Порядок розрахунку параметрів регулятора струму (рис. 1.10, б):

- задаються $C_{звс}$, рівной 0,5...2,0 мкФ;
- згідно з умовою $T_{pc} = C_{звс} R_{звс} = T_\alpha$ знаходять $R_{звс} = T_\alpha / C_{звс}$;
- найчастіше приймають $R_{зс} = R_c$ і, використовуючи рівняння $K_{pc} = R_{звс} / R_{зс}$,

знаходять

$$R_{зс} = R_c = \frac{R_{звс}}{K_{pc}} = \frac{R_{oc} a_c T_\mu K_{np} K_c}{R_\alpha T_\alpha}; \quad (1.71)$$

- коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом обчислюють з умови

$K_c \cdot I_{доп} = U_{к.мах}$, звідки

$$K_c = U_{к.мах} / I_{доп}$$

$U_{к.мах}$ - максимальна напруга управління, допустима для даного типу операційного підсилювача (для більшості системи $U_{к.мах} \approx 10$)

Передавальна функція замкнутого контуру струму при одиничному зворотньому зв'язку

$$W_{зс} = \frac{1}{a_c T_\mu p (T_\mu p + 1) + 1} = \frac{1}{a_c T_\mu^2 p^2 + a_c T_\mu p + 1} \quad (1.73)$$

відповідає коливальній ланці, коефіцієнт загасання (демпфірування) якого

$$\epsilon = 0.5 \sqrt{a_c} \text{ при виборі } a_c = 2 \text{ складає } \epsilon = \sqrt{2} / 2. \text{ При цьому показники}$$

перехідного процесу в контурі струму загальмованого двигуна будуть такими ж, як і на рис. 1.9 (технічний оптимум).

Таким чином, при застосуванні ПІ-регулятора струму контур струму, що містить дві апериодичні ланки з великою ($T_{я}$) і малою (T_{μ}) постійними часу, перетворюється в коливальну ланку, яка в результаті малого перерегулювання еквівалентно апериодичній з постійною часу $a_c T_{\mu}$. При цьому передавальну функцію (1.73) можна замінити апериодичною ланкою з постійною часу $a_c T_{\mu}$

$$W_{зс} \approx \frac{1/K_c}{a_c T_{\mu} + 1}. \quad (1.74)$$

Слід зазначити, що в (1.74) вихідною величиною є не напруга зворотного зв'язку $U_{зв.с}$, а струм якоря, що досягається додаванням в чисельник коефіцієнта згідно рис. 1.10, а.

Слід підкреслити, що стандартне налаштування контуру струму ефективно тільки тоді, коли внутрішнім зворотним зв'язком за ЕРС двигуна можна знехтувати. Це можливо, коли механічні перехідні процеси в приводі протікають повільніше, ніж електромагнітні, і за час наростання струму якоря до сталого значення при ступінчастому керуючому впливі швидкість двигуна істотно не змінюється. В іншому випадку показники перехідного процесу будуть значно відрізнятися від оптимальних. Знижується в перехідному режимі також усталене максимальне значення струму якоря щодо заданого на величину

$$\Delta I_{я} = I_{зад} - I_{я} = I_{зад} \cdot \frac{a_c T_{\mu}}{a_c T_{\mu} + T_M}. \quad (1.75)$$

Зменшення максимального струму якоря в перехідних режимах на величину ΔI призводить до помітного зниження темпу наростання швидкості і продуктивності приводів, що працюють з частими процесами пуску і гальмування (реверсивні прокатні стани і ін.). Для таких механізмів компенсація впливу зворотного зв'язку за ЕРС двигуна обов'язкове. Це досягається включенням

позитивного зворотного зв'язку за ЕРС двигуна на вхід СІФК.

Іншим прикладом обов'язкової компенсації зворотного зв'язку за ЕРС двигуна є електроприводи, що працюють з частим стопорінням. У цьому випадку внаслідок кінцевої швидкодії САК можливі значні стрибки струму, так як при стопорінні E_{0e} скачком уменьшається до нуля. За наявності позитивного компенсуючого зв'язку в режимі стопоріння відбувається також і поетапне зменшення напруги на вході СІФК і, отже, напруги перетворювача. В результаті цього зменшуються стрибки струму в режимі стопоріння.

Для приводів з ударним (стрибкоподібним) навантаженням, навпаки, не потрібно компенсувати вплив внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС двигуна, так як при цьому зменшується динамічне падіння швидкості.

1.12 Корекція контуру регулювання швидкості

Згідно рис. 1.8 до складу контуру швидкості входять:

- регулятор швидкості;
- замкнений оптимізований контур струму з функцією передачі (1.74);
- передавальна функція механічної частини приводу $W_m = R_{я} / (K\Phi \cdot T_m p)$;
- зворотний зв'язок за швидкістю з коефіцієнтом передачі K_c .

З огляду на це структурна схема контуру швидкості наведена на рис. 1.11.

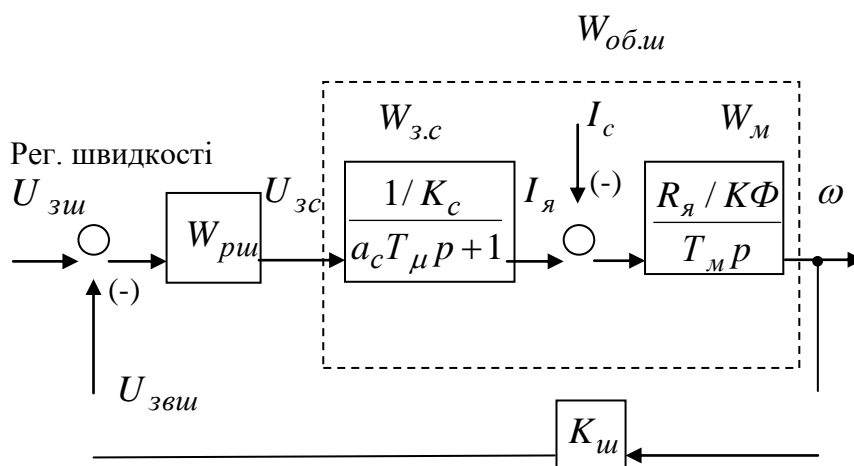


Рис. 1.11. Структурна схема контуру швидкості

З урахуванням (1.65) бажана передатна функція розімкнутого контуру швидкості

$$W_{\text{б.ш}} = \frac{1}{a_{\text{ш}} a_c T_{\mu} p (a_c T_{\mu} p + 1)}. \quad (1.76)$$

Під час прийому технічний оптимум коефіцієнти налаштування $a_{\text{ш}} = a_c = 2$.

Згідно рис. 1.11 передавальна функція об'єкта регулювання швидкості за одиничного зворотнього зв'язку

$$W_{\text{об.с}} = \frac{(1/K_c) R_{\text{я}} (1/K\Phi) K_c}{(a_c T_{\mu} p + 1) T_{\text{м}} p}. \quad (1.77)$$

На основі наведених виразів передавальна функція регулятора швидкості

$$W_{\text{рш}} = \frac{W_{\text{б.ш}}}{W_{\text{об.ш}}} = \frac{T_{\text{м}} K_c K\Phi}{a_{\text{ш}} a_c T_{\mu} R_{\text{я}} K_c} = K_{\text{рш}} \quad (1.78)$$

являє собою П-регулятор.

Коефіцієнт зворотнього зв'язку за швидкістю знаходиться з умови

$$K_c \omega_{\text{max}} = U_{\text{к.мах}}, \text{ откуда } K_c = U_{\text{к.мах}} / \omega_{\text{max}}.$$

Передавальна функція замкнутого контуру швидкості за одиничного зворотнього зв'язку

$$W_{\text{з.с}} = \frac{1}{a_{\text{ш}} a_c T_{\mu} p (a_c T_{\mu} p + 1) + 1} \quad (1.79)$$

являє собою коливальну ланку з коефіцієнтом загасання

$$\xi_{\text{ш}} = 0,5 \sqrt{q_{\text{ш}}}.$$

У разі налаштування на технічний оптимум ($a_{\text{ш}} = a_c = 2$) коефіцієнт загасання $\xi_{\text{ш}} = 2\sqrt{2}$ і криві перехідного процесу будуть такими ж, як і на рис. 1.9. Однак при цьому час перехідного процесу буде в два рази більше: $t_1 = 4,7T_{\mu\text{ш}} = 9,4T_{\mu}$; $t_2 = 8,4T_{\mu\text{ш}} = 16,8T_{\mu}$, де $T_{\mu\text{ш}} = a_{\text{ш}}T_{\mu}$ - некомпенсована постійна часу контуру швидкості

Таким чином, розрахункове значення швидкодії контуру швидкості зменшується вдвічі. Це є основним недоліком систем підпорядкованого регулювання - зменшення швидкодії зовнішніх контурів щодо внутрішнього.

Внаслідок того, що при розрахунку контуру швидкості замкнений контур струму представлявся апериодичною ланкою (1.74), а не коливальною згідно (1.75), то перерегулювання збільшується до 8% і криві перехідного процесу мають вигляд, як показано на рис. 1.12.

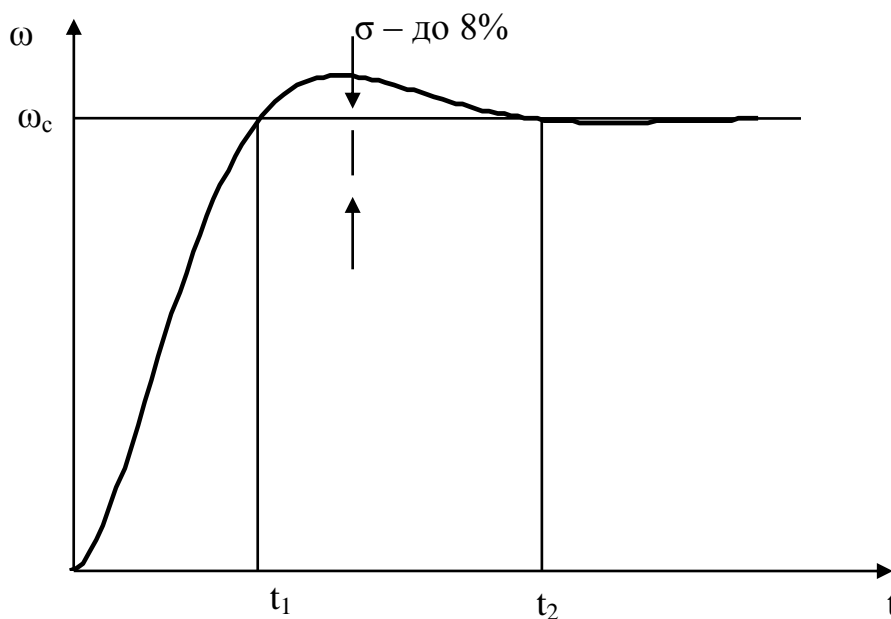


Рис. 1.12. Графіки перехідного процесу контуру швидкості: $t_1 = (6-7)T_{\mu u}$;

$$t_2 = (12-14)T_{\mu u}$$

1.13 Розрахунок параметрів класичної системи підлеглого регулювання

Максимальна швидкість:

$$w_{\max} = \frac{\pi \cdot n_{\max}}{30} = \frac{3.14 \cdot 2000}{30} = 210 \text{ рад/с} \quad (1.80)$$

Коефіцієнт посилення:

Прийmemo $k = 300$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом:

$$k_{o-t} = \frac{10}{2 \cdot I} = \frac{10}{2 \cdot 35} = 0.14 \quad (1.81)$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю:

$$k_{o-c} = \frac{10}{w_{\max}} = \frac{10}{210} = 0.05 \quad (1.82)$$

Постійна часу:

Прийmemo $T_{my} = 0.005c$

Постійна часу інтегрування регулятора струму:

$$T_u = 2 \cdot T_{my} \cdot k_{pr} \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{я}}} \right) \cdot k_{o-t} = 2 \cdot 0.005 \cdot 28 \cdot \left(\frac{1}{0.323} \right) \cdot 0.14 = 0.12c \quad (1.83)$$

Електромеханічна постійна часу:

$$T_m = \frac{J \cdot R_{\text{я}}}{K\Phi^2} = \frac{0.05 \cdot 0.323}{0.53^2} = 0.06c \quad (1.84)$$

Постійна часу тиристорного перетворювача:

Прийmemo $T_{pr} = 0.005c$

Електромагнітна постійна часу:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0.0029}{0.323} = 0.009c \quad (1.85)$$

Регулятор струму:

$$k_{r-t} = \frac{T_a}{T_u} = \frac{0.009}{0.12} = 0.07 \quad (1.86)$$

Регулятор швидкості:

$$k_{r-c} = \frac{T_m \cdot k_{o-t} \cdot K\Phi}{4 \cdot T_{my} \cdot R_a \cdot k_{o-c}} = \frac{0.06 \cdot 0.14 \cdot 0.53}{4 \cdot 0.005 \cdot 0.323 \cdot 0.05} = 13.8 \quad (1.87)$$

1.14 Математичне моделювання системи

Для реалізації математичної моделі САК використовується математичний пакет MATLAB, додаток Simulink. Модель синтезованої системи приведена на рис. 1.13. Отримані криві перехідного процесу показані на рис. 1.14.

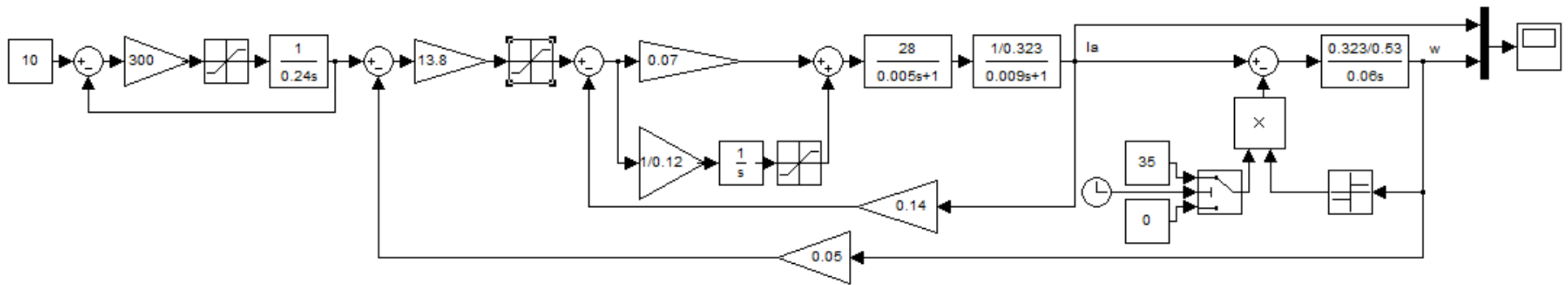


Рис. 1.13. Структурна схема класичної системи підлеглого регулювання з П-регулятором швидкості

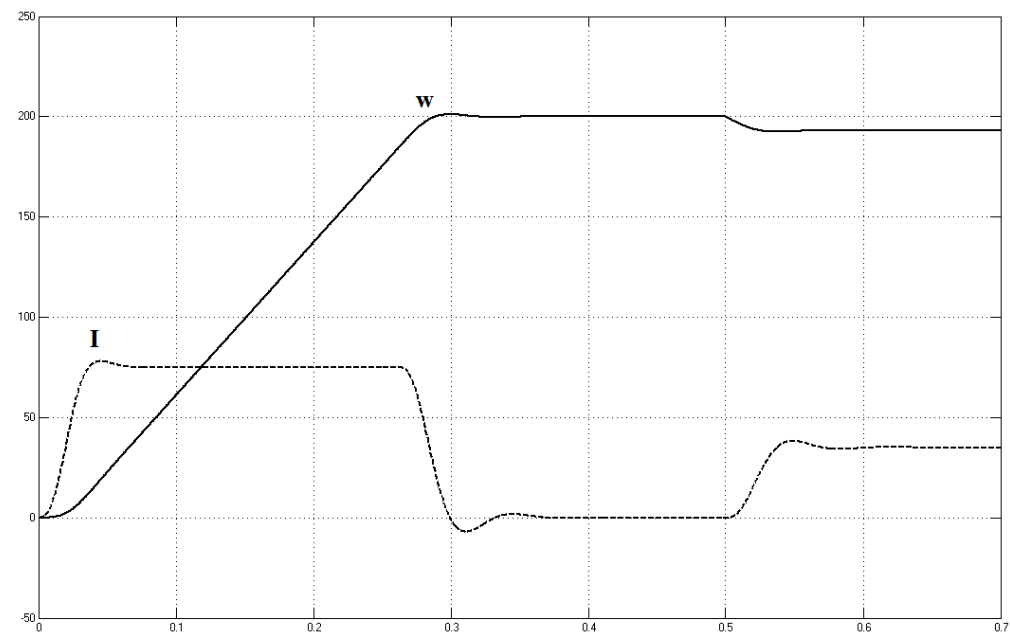


Рис.1.14. Графіки перехідних процесів

2 Системи регулювання електроприводами з одним регулятором

2.1 Загальні відомості

Під модальним керуванням зазвичай розуміють метод синтезу САК, за допомогою якого формується бажаний розподіл коренів характеристичного полінома на комплексній площині. Для цього використовують узагальнені характеристичні поліноми з відомою стандартною формою перехідного процесу. Для більшого узагальнення стандартні характеристичні поліноми нормуються певним чином і надаються в відносному часі $\tau=Kt$, де K - середньгеометричний корінь характеристичного рівняння (або коефіцієнт нормування), який побічно характеризує швидкодію.

У технічній літературі наводиться ряд стандартних нормованих характеристичних поліномів для систем різного порядку, які забезпечують нормовану форму перехідного процесу, виходячи з різних інтегральних критеріїв якості. Це дозволяє з ряду стандартних форм перехідного процесу вибрати один, найбільш повно задовольняючий вимогам проектованого електроприводу. Стосовно до електроприводу найбільш використовуваними є стандартні поліноми Баттервота, інтегрально-технічний оптимум (ІТО), Бесселя, Чебишева, біномінальний та ін.

Загальний порядок розрахунку параметрів САК за нормованими рівняннями полягає у виборі стандартного рівняння, що задовольняє задану якість процесів. Потім підбором параметрів регулятора і зворотних зв'язків домагаються рівності коефіцієнтів при однакових ступенях p проектованої системи і обраного стандартного полінома.

У системах з модальним керуванням на вхід регулятора подаються сигнали зворотних зв'язків за всіма змінними станів, виміряних безпосередньо за допомогою різних датчиків. При цьому структурна схема приводу без урахування внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС двигуна (яка може бути скомпенсована відомими методами) набуває вигляду (рис. 2.1).

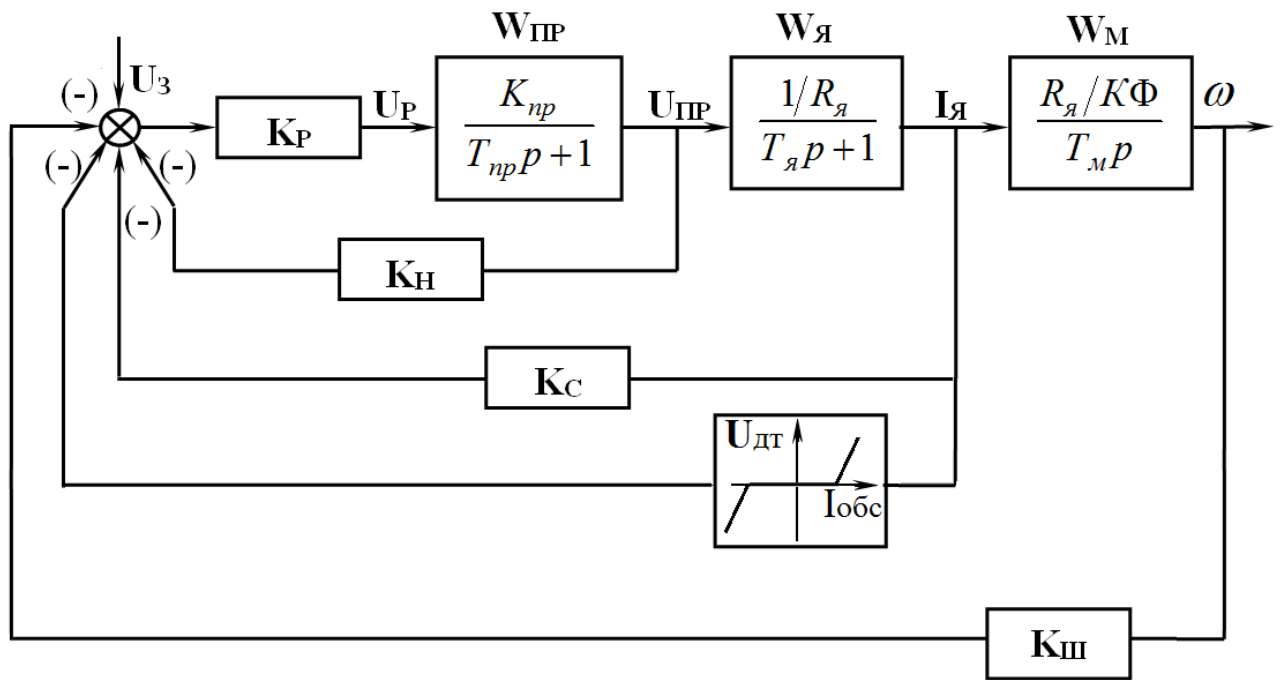


Рис. 2.1. Структурна схема системи КП-Д з модальностей регулятором

2.2 Розрахунок параметрів регулятора і коефіцієнтів зворотних зв'язків

Для розрахунку параметрів регулятора і коефіцієнтів передачі зворотних зв'язків за напругою перетворювача K_n , струмом якоря K_T і швидкістю двигуна K_{ω} необхідно отримати передавальну функцію замкненої системи, шляхом почергового згортання передавальних функцій окремих контурів регулювання.

Згідно структурній схемі рис. 2.1 передавальна функція замкнутого контуру напруги

$$W_{з.н} = \frac{K_p K_{np}}{T_{np} p + 1 + K_{\Sigma n}}, \quad (2.1)$$

де $K_{\Sigma n} = K_p K_{np} K_n$ – сумарний коефіцієнт підсилення замкненого контуру напруги.

Передавальна функція розімкнутого контуру струму

$$W_T = \frac{K_p K_{np} (1/R_я)}{(T_{np} p + 1 + K_{\Sigma n})(T_я p + 1)}. \quad (2.2)$$

Передавальна функція замкнутого контуру струму

$$W_{3.T} = \frac{K_p K_{np} / (1/K\Phi)}{[T_{np} T_{я} p^2 + p [T_{np} + (1 + K_{\Sigma H}) T_{я}] + (1 + K_{\Sigma T} + K_{\Sigma H})] \cdot T_{м} p},$$

де $K_{\Sigma c} = \frac{K_p K_{np} K_T}{R}$ – сумарний коефіцієнт посилення контуру струму

Передавальна функція замкнутого контуру швидкості

$$W_{3.u} = \frac{K_{\Sigma u}}{p^3 T_{np} T_{я} T_{м} + p^2 T_{м} [T_{np} + (1 + K_{\Sigma H}) T_{я}] + p (1 + K_{\Sigma c} + K_{\Sigma H}) T_{м} + K_{\Sigma u} K_{u}}, \quad (2.3)$$

де $K_{\Sigma u} = K_p K_{np} K_{\Delta \omega}$ – результуючий коефіцієнт посилення контуру швидкості

З (2.3) характеристичне рівняння замкнутої системи

$$A(p) = p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (2.4)$$

$$\text{де } a_2 = \frac{T_{np} + (K_{\Sigma H} + 1) T_{я}}{T_{я} T_{np}}; \quad a_1 = \frac{1 + K_{\Sigma H} + K_{\Sigma c}}{T_{я} T_{np}}; \quad a_0 = \frac{K_{\Sigma u} K_{u}}{T_{np} T_{я} T_{м}}.$$

Вводячи новий оператор диференціювання $S = p/K$, перейдемо до відносного часу

де K - коефіцієнт нормування (середньогометричні корінь), що побічно характеризує швидкодію системи. В результаті цього отримаємо з (2.4))

$$S^3 + \frac{a_2}{K} S^2 + \frac{a_1}{K^2} S + \frac{a_0}{K^3} = 0. \quad (2.5)$$

Стандартний характеристичний поліном третього порядку з нормованим розподілом коренів характеристичного рівняння записується у вигляді:

$$S^3 + A_{2H} S^2 + A_{1H} S + 1 = 0. \quad (2.6)$$

Прирівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях p вхідного рівняння (2.5) і нормованого (2.6) з відомими показниками якості перехідного процесу, можна розрахувати параметри регулятора і зворотних зв'язків. Внаслідок прирівнювання коефіцієнтів отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{np} + (K_{\Sigma H} + 1)T_{я}}{T_{я}T_{np}K} &= A_{2H}; \\ \frac{1 + K_{\Sigma c} + K_{\Sigma H}}{T_{я}T_{np}K^2} &= A_{1H}; \\ \frac{K_{\Sigma u}K_{u}}{T_{я}T_{np}T_{m}K^3} &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Часто принимают $K = 1/T_{\mu}$ а коефіцієнти підсилення регуляторів знаходять виходячи з необхідної статичної точності.

З спільного рішення (2.7) знаходимо коефіцієнти зворотних зв'язків за напругою струмом, і швидкістю

$$K_n = \frac{A_{2H}T_{я} - (T_{np} + T_{я})}{T_{я}K_pK_{np}}; K_T = \frac{R_{я}[A_{1H}T_{я}/T_{np} - (1 + K_{\Sigma H})]}{K_pK_{np}}; K_c = \frac{T_mT_{я}}{T_{np}^2K_{\Sigma c}}. \quad (2.8)$$

Як приклад в табл. 2.1 наведені показники якості перехідного процесу для ряду нормованих рівнянь третього порядку.

Таблиця 2.1

Критерій налаштування	Коефіцієнти нормованого рівняння		Перерегулювання $\sigma, \%$	$t_{\sigma H}$	$t_{пер.н}$
	A_{2H}	A_{1H}			
Баттерворта	2	2	7,1	5	5,9
ІТО	1,75	2,15	3	5	3,6
Соколова	1,98	2,38	0	0	4,3
Чебишева	1,86	1,93	9,5	4,6	4,9

У таблиці позначено: $t_{\sigma H}$ - відносно нормований час зростання вихідної величини до максимального значення; $t_{пер.н}$ - нормований час перехідного

процесу, при якому вихідна величина відрізняється менш ніж на 5% від сталого значення.

Перевагою систем з модальним регулятором є висока швидкодія.

2.3 Параметри зворотних зв'язків з різними критеріями налаштування (характеристичними поліномами)

Згідно виразів (2.8) розрахункові коефіцієнти ЗЗ в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Критерій налаштування	Коефіцієнт ЗЗ за U (K_n)	Коефіцієнт ЗЗ за струмом (K_c)	Коефіцієнт ЗЗ за швидкістю ($K_{ш}$)
Баттерворта	0.001	0.0015	0.0238
ІТО	0.0004	0.0019	0.0238
Соколова	0.0009	0.002	0.0238
Чебишева	0.0007	0.0015	0.0238

Примітка. K_p - прийняти таким як і в системі підлеглого регулювання.

Математична модель системи УП-Д з модальним регулятором для наведених вище критеріїв налаштування представлена на рис. 2.2, а криві перехідного процесу на рис. 2.3.

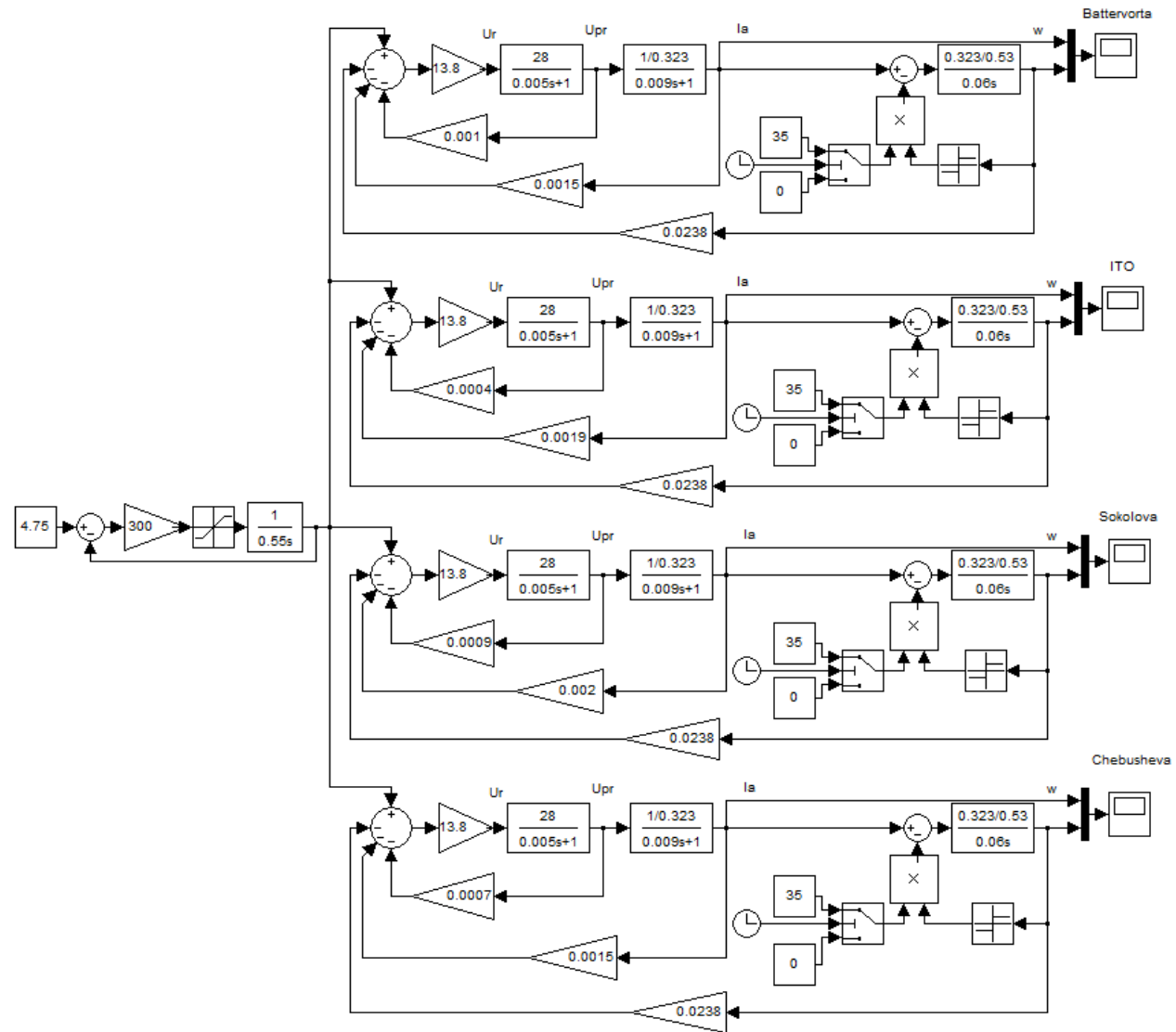


Рис. 2.2. Структурна схема системи УП-Д з модальним регулятором

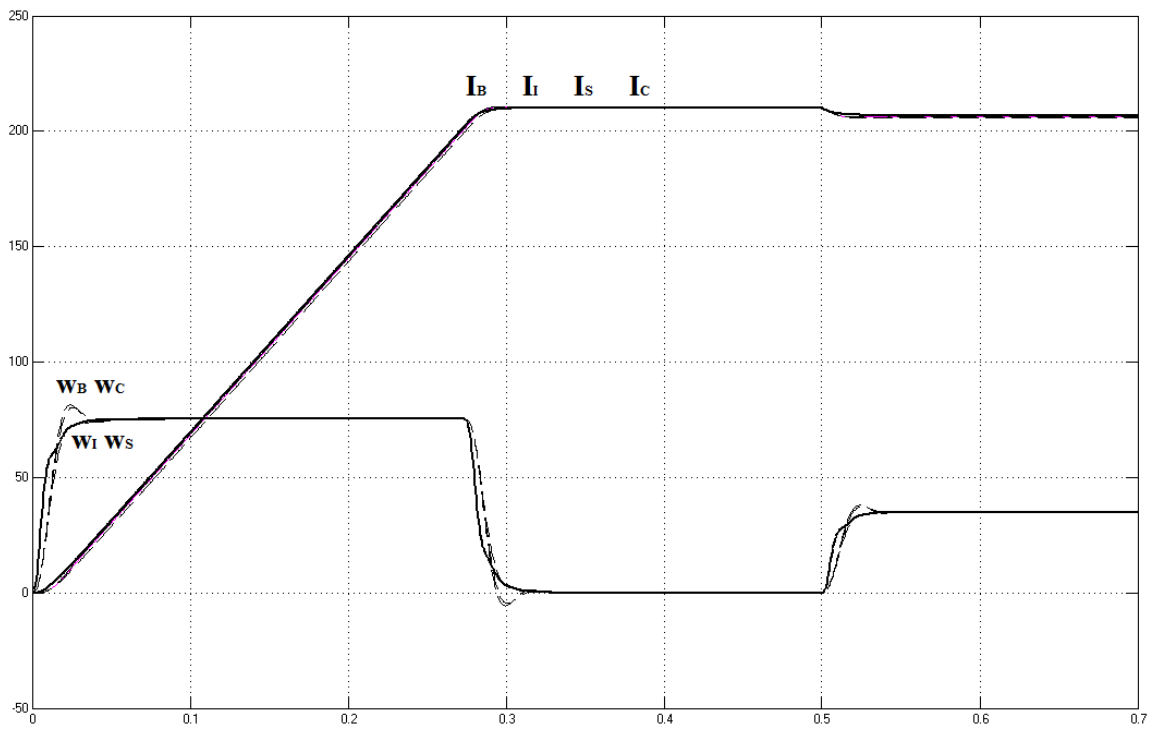


Рис.2.3. Графіки перехідних процесів

З наведених вище чотирьох структурних систем КП-Д з модальним регулятором, вибираємо одну в якій зазначені нижче характеристики (показники якості перехідного процесу наведені в таблицях 2.3, 2.4) є найкращими:

- більша швидкодія;

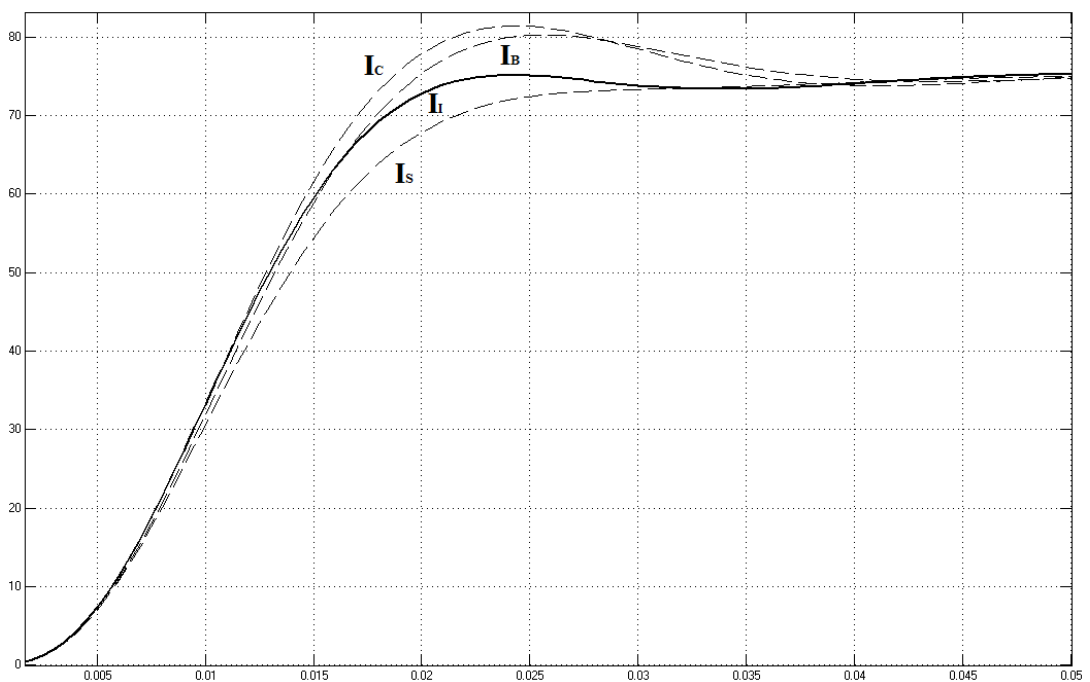


Рис.2.4. Графіки перехідних процесів (швидкодія)

Швидкодія (струм)

Критерій налаштування	Час першого узгодження	Час регулювання	Перерегулювання %
Баттерворта	0,018	0,04	6,4
ІТО	0,025	0,025	0
Соколова	0,04	0,04	0
Чебишева	0,016	0,045	8,3

- менше динамічне падіння швидкості;

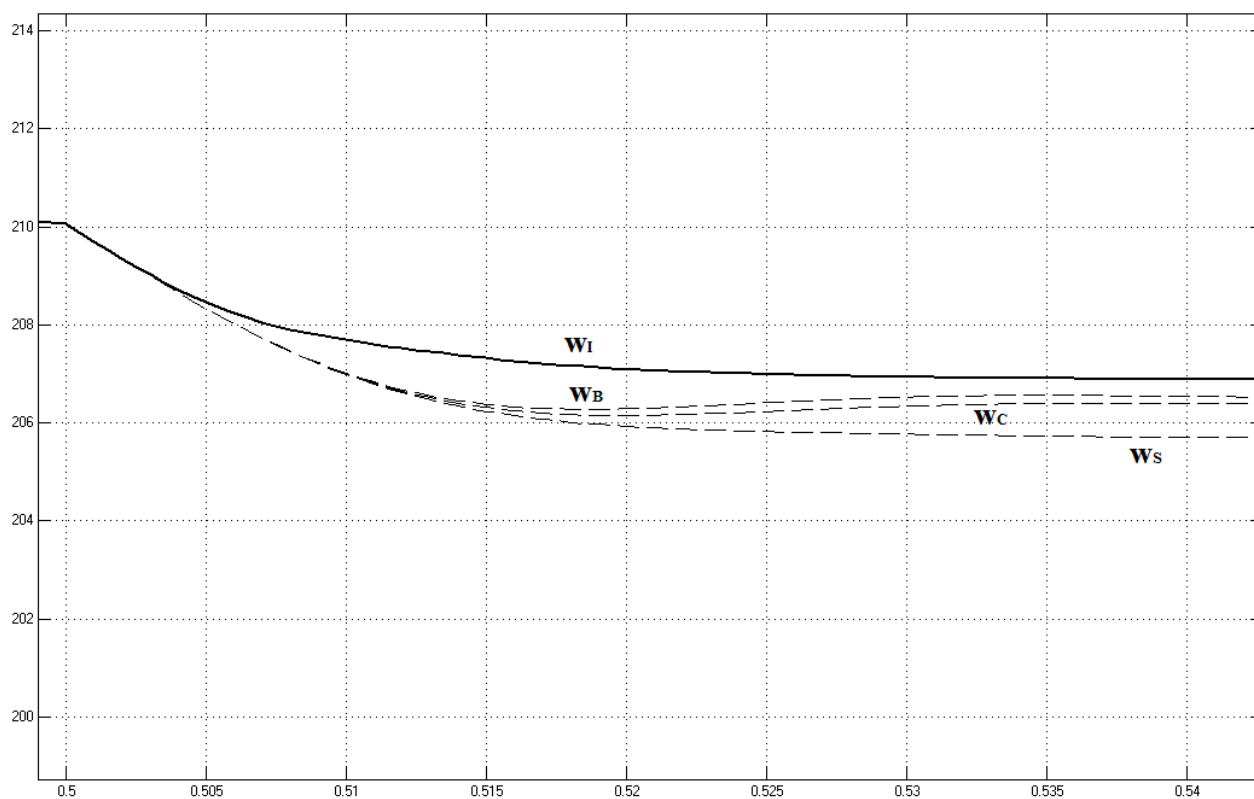


Рис.2.5. Графіки переходних процесів (падіння швидкості)

Динамічне падіння швидкості

Критерій налаштування	Падіння швидкості %
Баттерворта	1,7
ІТО	1,42
Соколова	1,9
Чебишева	1,8

Виходячи з графіків перехідних процесів (рис. 2.3 - 2.5), показники якості яких представлені в табл. 2.3, табл. 2.4 впливає, що серед представлених вище систем КП-Д з модальним регулятором кращим чином проявила себе система у якій критерій налаштування - інтегрально-технічний оптимум.

На наступному етапі порівнюємо систему КП-Д налаштовану на ІТО та систему підлеглого регулювання, структурні схеми якої наведені на малюнку 2.6.

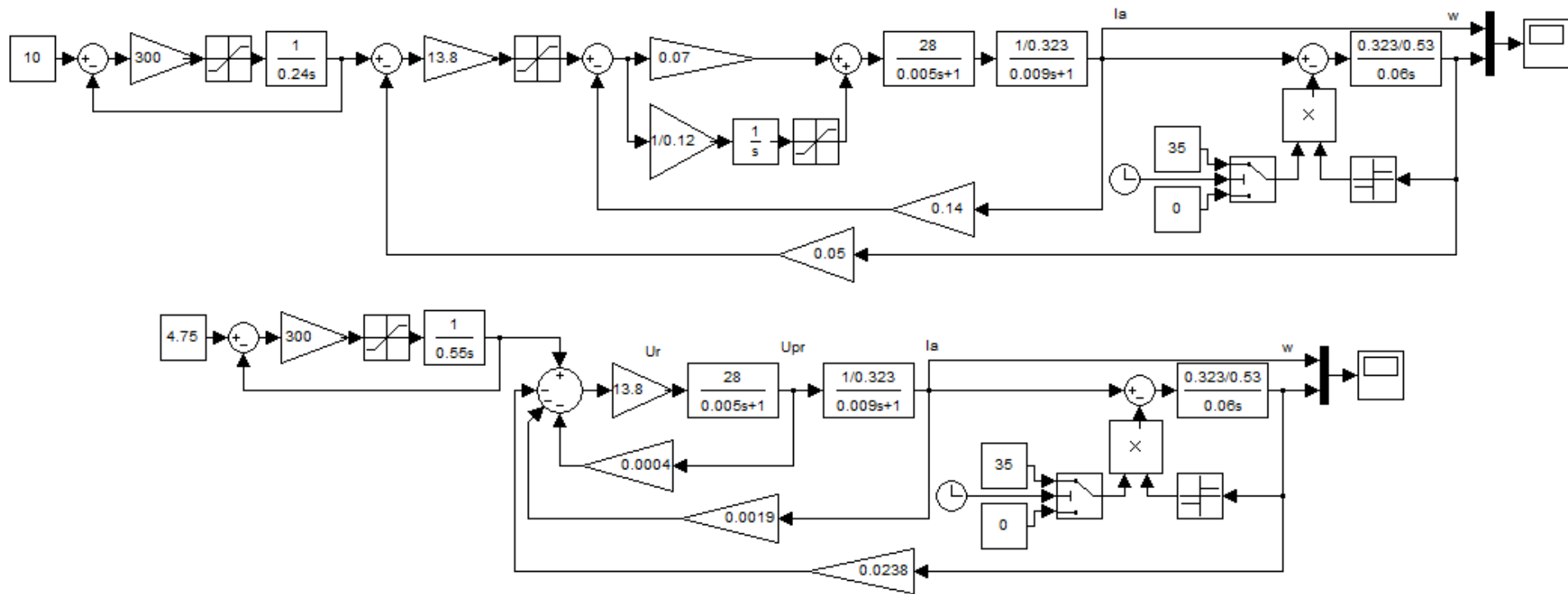


Рис. 2.6. Структурні схеми системи КП-Д налаштовану на ІТО та системи підлеглого регулювання

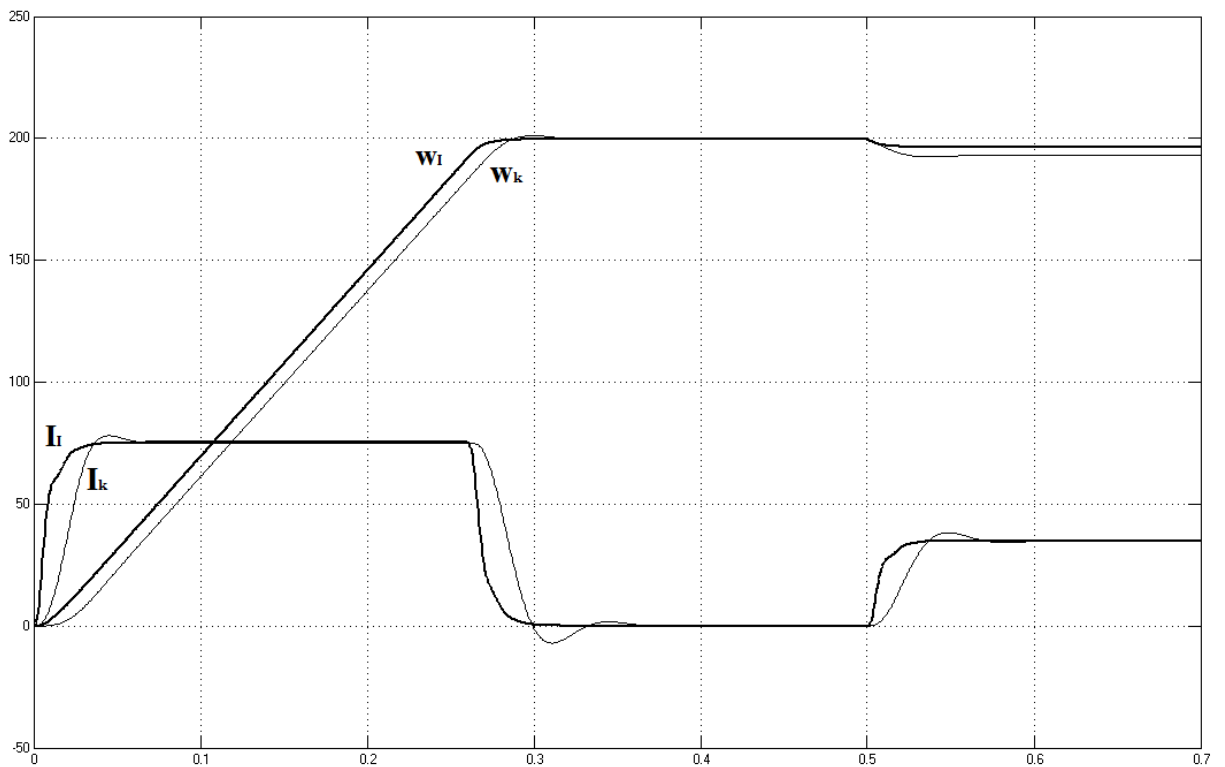


Рис.2.7. Графіки перехідних процесів

Порівняння системи підлеглого регулювання та системи з модальним регулятором налаштовану на ІТО представлені в табл. 2.5 і табл.2.6.

Таблиця 2.5

Швидкодія

	Час першого узгодження	Час регулювання	Перерегулювання %
Класика	0.04	0.07	4.1
ІТО	0.025	0.025	0

Таблиця 2.6

Швидкість

	Час першого узгодження	Час регулювання	Перерегулювання %	Падіння %
Класика	0.28	0.32	0.6	3.8
ІТО	0.27	0.27	0	1.42

Виходячи з графіків перехідних процесів (рис. 2.7), показники якості яких представлені в табл. 2.5, табл. 2.6 впливає, що система з модальним регулятором проявила себе краще, ніж класична система підпорядкованого регулювання. Перевагами системи з одним регулятором є більша швидкодія, а також менше динамічне падіння швидкості. Ще однією перевагою синтезованої модальної САК є те, що вона не вимагає перевірки на стійкість (так як вона заздалегідь повинна бути стійкою і мати необхідний ступінь стійкості). Також дана система не вимагає введення додаткових коригуючих пристроїв (так як вона сама вже задовольняє необхідним показниками якості). Введення модальних ЗЗ, в силу їх безінерційності, не підвищує порядок об'єкта і не порушує його керованість і спостерігаємість (що часто відбувається при введенні пасивних інерційних коригувальних пристроїв). Відносна простота і економічність технічної реалізації модальних САК (так як реалізації модальних ЗЗ може бути виконана за допомогою малопотужних вимірювально-перетворювальних пристроїв і електронних підсилювачів з малими тепловими втратами) також є значною перевагою системи.

Слід зазначити, що одним з недоліків системи підлеглого регулювання є зменшення швидкодії зовнішніх контурів по відношенню до внутрішніх більш ніж в два рази. Іншим суттєвим недоліком систем підпорядкованого регулювання з П-і ПІ-регуляторами швидкості є значне динамічне падіння швидкості і час її відновлення при східчастому впливі статичного навантаження.

Об'єктом проектування є введення приводу подачі токарного верстата 2ПБВ112М. При розрахунку витрат на впровадження даного електроприводу розглядаємо такі питання:

- 1) розрахунок капітальних витрат на придбання і монтаж електротехнічного обладнання;
- 2) розрахунок річних експлуатаційних витрат на утримання і обслуговування об'єкта проектування;

3.1 Розрахунок капітальних витрат

Проектні капіталовкладення в обладнання та монтаж-налагоджувальні роботи взяті на основі цін прейскуранта на електрообладнання підприємства «Дніпротяжбуммаш».

Розрахунок капітальних витрат оформляється у вигляді зведення капітальних витрат за розділами (табл. 3.1.).

Капітальні витрати ($K_{\text{пр}}$) на здійснення проектного варіанту складають:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{об}}\left(\sum_{i=1}^k \text{Ці}\right) + \text{Зтзс} + \text{Зм} + \text{Зн} + \text{Зд} + \text{Здр}, \quad (3.1)$$

де

$K_{\text{об}}(\text{Ці})$ – вартість придбання обладнання за проектом або сумарна вартість комплектуючих елементів і-го виду, необхідних для реалізації прийнятого технічного рішення;

k – кількість необхідних комплектуючих елементів;

Зтзс – транспортно-заготівельні і складські витрати;

Зм – витрати на монтажні роботи;

Зн – витрати на налагоджувальні роботи;

Зд – витрати на демонтажні роботи;

Здр – інші одноразові вкладення коштів.

Таблиця 3.1 Зведення капітальних витрат

№	Обладнення	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
1.	Двигун: 2ПБВ112М.	1	42710	42710
ВСЬОГО				42710

Транспортні витрати включені у вартість електрообладнання.

Згідно з Галузевою угодою між Міністерством палива та енергетики України, і профспілкою працівників енергетичної та електромеханічної промисловості мінімальний розмір місячної тарифної ставки працівникам, які виконують некваліфіковану роботу (тобто 1-го розряду), встановлюється на рівні не менше 125% від законодавчо встановленої мінімальної заробітної плати, яка на 1 січня 2018 року становить 3200 грн.

Коефіцієнти визначаються згідно з додатками №3-37 до Галузевого договору співвідношень місячних тарифних ставок і посадових окладів до мінімальної місячної тарифної ставки працівника, який виконує некваліфіковану роботу.

$$Kт3 = 1,45 \text{ грн}; Kт4 = 1,62 \text{ грн}; Kт6 = 2,16 \text{ грн}.$$

Місячна тарифна ставка монтажника 1-го розряду:

$$Tсм1 = 3200 \cdot 125\% = 4000 \text{ грн};$$

Місячна тарифна ставка монтажника 3-го розряду:

$$Tсм3 = 4000 \cdot 1,45 = 5800 \text{ грн};$$

Годинна тарифна ставка наладчика 3-го розряду:

$$a_3 = 5800 / 160 = 36,25 \text{ грн/год};$$

Місячна тарифна ставка монтажника 4-го розряду::

$$Tсм4 = 4000 \cdot 1,62 = 6480 \text{ грн};$$

Годинна тарифна ставка монтажника 4-го розряду:

$$a_4 = 6480 / 160 = 40,5 \text{ грн/год};$$

Місячна тарифна ставка наладчика 6-го розряду:

$$T_{см6} = 3200 \cdot 2,16 = 6912 \text{ грн};$$

Годинна тарифна ставка наладчика 6-го розряду:

$$a_6 = 6912 / 160 = 43,2 \text{ грн/год.}$$

Монтажні, налагоджувальні, і демонтажні роботи здійснюються на підприємстві штатними електромеханіками і розраховуються наступним чином:

Монтажні роботи:

$$Z_m = \sum (Ч \cdot t \cdot a_4) \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_{др}, \quad (3.2)$$

де

$Ч=2$ – кількість робочих, задіяних в монтажі, чол .;

$t=14$ – час на здійснення монтажу, год .;

$a_4=40,5$ – годинна тарифна ставка монтажника 4-го розряду, грн / год;

$K_c=1,22$ – коефіцієнт, що враховує відрахування на єдиний соціальний внесок;

$K_d=1,1$ – коефіцієнт, що враховує розмір доплат;

$K_{др}=1,05$ – коефіцієнт, що враховує непередбачені витрати.

$$Z_m = 2 \cdot 14 \cdot 40,5 \cdot 1,22 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 1597,91 \text{ грн.}$$

Налагоджувальні роботи

$$Z_n = \sum (Ч \cdot t \cdot a_6) \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_{др}, \quad (3.3)$$

де

$Ч=2$ – кількість робочих, задіяних в налагодженні, чол .;

$t=6$ – час на здійснення монтажу, год .;

$a_6=43,2$ – годинна тарифна ставка наладчика 6-го розряду, грн / год;

$K_c=1,22$ – коефіцієнт, що враховує відрахування на єдиний соціальний внесок;

$K_d=1,1$ – коефіцієнт, що враховує розмір доплат;

$K_{др}=1,05$ – коефіцієнт, що враховує непередбачені витрати.

$$Z_n = 2 \cdot 6 \cdot 43,2 \cdot 1,22 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 730,47 \text{ грн.}$$

Демонтажні роботи:

$$Z_d = \sum (Ч \cdot t \cdot a_3) \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_{др}, \quad (3.4)$$

де

$Ч=2$ – кількість робочих, задіяних в демонтажі, чел. ;

$t=3$ – час на здійснення демонтажу, год. ;

$a_3=36,25$ – годинна тарифна ставка наладчика 3-го розряду, грн / год;

$K_c=1,22$ – коефіцієнт, що враховує відрахування на єдиний соціальний внесок;

$K_d=1,1$ – коефіцієнт, що враховує розмір доплат;

$K_{др}=1,05$ – коефіцієнт, що враховує непередбачені витрати.

$$Z_d = 2 \cdot 3 \cdot 36,25 \cdot 1,22 \cdot 1,1 \cdot 1,05 = 306,47 \text{ грн.}$$

Таким чином, капітальні витрати складуть:

$$K_{пр} = K_{об} + Z_m + Z_n + Z_d;$$

$$K_{пр} = 42710 + 1597,91 + 730,47 + 306,47 = 45344,85 \text{ грн.}$$

3.2. Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати це витрати на утримання і обслуговування об'єкта проектування за певний період (рік).

До основних статей експлуатаційних витрат за електротехнічним устаткуванням відносяться:

- Амортизаційні відрахування (Ca);
- Заробітна плата обслуговуючого персоналу (Cз);
- Відрахування на єдиний соціальний внесок (Cс);
- Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт обладнання і мереж (Cт);
- Вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування (Cэ);
- Інші експлуатаційні витрати (Cдр).

Отже, повна вартість річних експлуатаційних витрат складає:

$$C = C_a + C_z + C_c + C_t + C_э + C_{др}, \text{ грн.} \quad (3.5)$$

Так як в процесі впровадження проектного варіанту не планується змінювати чисельність обслуговуючого персоналу, то розрахунки річного фонду заробітної плати і відрахувань на соціальні заходи не проводяться, інші експлуатаційні витрати не передбачаються.

Таким чином, річні експлуатаційні витрати складуть:

$$C = C_a + C_t + C_э, \text{ грн.} \quad (3.6)$$

3.2.1 Амортизаційні відрахування

Річний фонд амортизаційних відрахувань визначається у відсотках від суми капітальних витрат за видами основних фондів і нематеріальних активів за розділами зведення капітальних витрат.

$$C_a = K_{пр} \cdot \frac{H_a}{100}, \quad (3.7)$$

де H_a – норма амортизації для змінного обладнання (група 4 основних засобів в Податковому Кодексі України станом на 01.01.2012) мінімальний термін використання 5 років.

Для розрахунку норм амортизації використовуємо прямолінійний метод. Норма амортизації для проектного варіанта становить:

$$H_a = \frac{1}{5} \cdot 100\% = 20\% \quad (3.8)$$

Річні відрахування на амортизацію становлять:

$$Ca = 86368,85 \cdot 0,2 = 17273,77, \text{ грн.}$$

3.2.2 Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт

Річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт електротехнічного обладнання включають витрати на матеріали, запасні частини, заробітну плату ремонтним робочим, і можуть визначатися за фактичними даними підприємства. Дані наведені станом на 01.01.2018. У таблиці 5.4 наведені річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт, які розраховуються за формулою:

$$C_T = \sum_{i=1}^n \left(R_i \cdot t_i \cdot m_i \cdot R_{\sum i} + \frac{S_i \cdot \Pi_i}{T_i} \cdot T_{\phi} \right), \quad \text{грн} \quad (3.9)$$

де

n – число приладів, які підлягають ремонту, шт;

R_i – годинна тарифна ставка робітників, які виконують ремонт, грн / год;

t_i – трудомісткість одного ремонту при категорії складності ремонту в одну ремонтну одиницю в залежності від виду ремонту, год / од;

m – кількість ремонтів на рік;

R_{Σ} – сумарна категорія складності ремонту в залежності від виду електрообладнання;

S_i – вартість однотипних змінюваних елементів, грн;

Π_i – кількість однотипних змінюваних елементів, шт;

T_i – середній термін служби деталей даного типу, час;

T_{ϕ} – кількість годин роботи електрообладнання на рік, год.

Таблиця 3.4 Витрати на технічний ремонт

	Од. вимірювання	Кількість
n	шт.	1
R_i	грн/год	40,5
t_i	год/од	7
m		2
R_Σ		3
S1	грн.	54
Π1	шт.	4
T1	год.	1000
S2	грн.	75
Π2	шт.	2
T2	год.	1000
T_φ	год	2000
C_{T1}	грн	2133
C_{T2}	грн	2001
C_T	грн	4134

$$C_{T1} = 40,5 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 3 + \frac{54 \cdot 4}{1000} \cdot 2000 = 2133 \text{ грн};$$

$$C_{T2} = 40,5 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 3 + \frac{75 \cdot 2}{1000} \cdot 2000 = 2001 \text{ грн};$$

Таким чином річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт дорівнюють:

$$C_T = C_{T1} + C_{T2} = 2133 + 2001 = 4134 \text{ грн}$$

3.2.3 Розрахунок вартості споживаної електроенергії

Вартість електроенергії, споживаної об'єктом протягом року, визначається виходячи з його встановленої потужності і річного фонду робочого часу об'єкта за формулою:

$$C_e = W_T \cdot C_e, \quad (3.10)$$

де

W_T – кількість спожитої в рік електроенергії, кВт · год;

$C_e = 1,68$ – тариф на електроенергію, грн/кВт·ч.

Для підприємств II класу тарифна ставка на електроенергію становить 1,68 грн / кВт · год з ПДВ (Відповідно до Постанови НКРЕ від 24.05.16 №524 Єдині роздрібні тарифи). ПДВ = 20%.

Споживана електроенергія визначається за формулою:

$$W_T = \frac{\sum P \cdot K_z \cdot K_o \cdot T}{\eta \cdot \cos \varphi}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (3.11)$$

де

$\sum P$ – потужність електрообладнання, кВт;

$K_z = 0,65$ – коефіцієнт завантаження обладнання;

$K_o = 0,65$ – коефіцієнт одночасної роботи;

$T = 8 \text{ годин} \cdot 26 \text{ днів} \cdot 12 \text{ місяців} = 2496 \text{ год}$, – номінальний фонд робочого часу;

$\eta = 0,96$ – коефіцієнт корисної дії мережі;

$\cos\varphi = 0,92$ – коефіцієнт, що враховує ефективність використання потужності.

$$W_T = (11000 \cdot 0,65 \cdot 0,65 \cdot 2496) / (0,96 \cdot 0,92) = 13134,29 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

Річні витрати на електроенергію складають:

$$C_e = 13134,29 \cdot 1,68 = 22065,6 \text{ грн.}$$

Таким чином, річні експлуатаційні витрати складуть:

$$C = C_a + C_T + C_e$$

$$C = 17273,77 + 4134 + 22065,6 = 43473,37 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.5 Річні експлуатаційні витрати

п/п	Найменування статей витрат	Сума витрат, грн.
1	Амортизаційні відрахування	17273,77
2	Витрати на техобслуговування	4134
3	Вартість споживаної енергії	22065,6
4	Всього	43473,37

Таблиця 3.6 Капітальні і експлуатаційні витрати

Вид витрат	Вартість, грн
Капітальні витрати	45344,85
Експлуатаційні витрати	43473,37
Сума	88818,22

ВИСНОВОК

Метою даного дипломного проекту є синтез систем автоматичного керування координат електроприводу, підвищення швидкодії і точності шляхом використання системи з модальним регулятором.

У першому розділі на основі обраного двигуна розраховуються параметри системи автоматичного керування. Також розглянута класична система підпорядкованого регулювання. Розраховані параметри регуляторів і синтезовано математичну модель класичної системи. Дослідження динаміки роботи системи виконано за допомогою пакету Matlab Simulink.

У другому розділі розглянуто систему КП-Д (керований перетворювач-двигун) з модальним регулятором. Розраховані параметри зворотних зв'язків з різними критеріями налаштування (Баттерворта, інтегрально-технічний оптимум, Бесселя, Чебишева) і синтезовано математичні моделі з модальним регулятором для чотирьох перерахованих вище систем. Дослідження динаміки роботи системи виконано за допомогою пакету Matlab Simulink. Виходячи з графіків перехідних процесів встановлено, що серед представлених вище систем КП-Д з модальним регулятором кращим чином проявила себе система у якій критерій налаштування - інтегрально-технічний оптимум.

Далі в роботі виконано порівняння класичної системи підлеглого регулювання та системи регулювання електроприводами з одним регулятором, налаштованим на інтегрально-технічний оптимум. Наведено моделі, а також динамічні показники даних систем. Виходячи з графіків перехідних процесів встановлено, що система з модальним регулятором проявила себе краще, ніж класична система підпорядкованого регулювання. Перевагами даної системи є менше динамічне падіння швидкості, а також більша швидкодія. Іншою перевагою синтезованої модальної САУ є те, що вона не вимагає перевірки на стійкість.

Також дана система не вимагає введення додаткових коригуючих пристроїв. Введення модальних ЗЗ, в силу їх безінерційності, не підвищує порядок об'єкта і не порушує його керованість і спостерігаємість. Ще однією перевагою є відносна простота і економічність технічної реалізації модальних САК.

У свою чергу одним з недоліків системи підлеглого регулювання є зменшення швидкодії зовнішніх контурів по відношенню до внутрішніх більш ніж в два рази. Також істотним недоліком систем підпорядкованого регулювання з П-і ПІ-регуляторами швидкості є значне динамічне падіння швидкості і час її відновлення при східчастому впливі статичного навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. – М. – Л.: Энергия, 1977. – 432 с.
2. Гейлер Л.Б. Основы электропривода. – Мн.: Вышэйш. шк., 1972. – 608 с.
3. Зеленов А.Б. Теория электропривода. Часть 1: Учебн. пособие. – Алчевск, ДонГТУ, 2005. – 394 с. // Часть 2, 2005. – 513 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
5. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. – С.Пб.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
6. Колб А.А. Теорія електроприводу / А.А. Колб, А.А. Колб. - Д., 2011. – 540 с.
7. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков - М., 1976. – 184 с.
8. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
9. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
10. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993. – 494 с.
11. Теория автоматического управления / Под ред. акад. А.А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1986. – 368 с.
12. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
13. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

- 14.Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
- 15.Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. М.Г Поповича, О.Ю. Лозинського. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
- 16.Методичні вказівки до виробничої, переддипломної практик та виконання магістерської роботи за спеціальністю “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”/ Уклад.: О.С.Бешта, М.М.Казачковський, О.О.Азюковський – Дніпропетровськ: Державний ВНЗ “Національний гірничий університет”, 2012. – 18 с.