

УДК.62-502.001.5

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ПОСЛІДОВНО-ПАРАЛЕЛЬНОЇ КОРЕКЦІЇ АСР З РЕАЛЬНИМИ ПІД-РЕГУЛЯТОРАМИ

© Ковела І.М., 2000

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра “Автоматика і телемеханіка”

Розглядаються особливості реалізації та досліджуються характеристики автоматичних систем регулювання із застосуванням ПІД-регуляторів за схемами послідовно-паралельної корекції, даються відповідні рекомендації щодо алгоритмічного забезпечення контролерів та практичної реалізації АСР.

The characteristics and design features of automatic control systems utilizing PID-controllers in compliance with serial-parallel correction schemes are examined, the appropriate guidelines concerning algorithmic support of controllers and practical ACS implementation are adduced.

Автоматичні системи регулювання (АСР) з ПІД-регуляторами звичайно будуються за принципом послідовної корекції, що не завжди забезпечує вимоги щодо якості регулювання. З теорії автоматичного керування відомо, що ефективним методом покращання властивостей систем є застосування коригуючих зворотних зв'язків, які, зокрема, дають можливість істотно зменшити чутливість динамічних властивостей системи до зміни параметрів функціонально необхідних елементів, охоплених коригуючим зворотним зв'язком. Це є особливо актуальним з огляду на те, що, по-перше, точність математичного опису об'єктів регулювання є досить низькою, а, по-друге, їх динамічні властивості можуть змінюватися під впливом багатьох факторів.

Реалізація принципу корекції за допомогою зворотних зв'язків у системах з ПІД-регуляторами може здійснюватися по-різному [1,2].

На практиці, якщо відбуваються часті і різкі зміни завдання (особливо це стосується систем програмного регулювання), системи з послідовною корекцією можуть працювати незадовільно внаслідок значних “викидів” регулюючого сигналу за рахунок диференціальної складової алгоритму. Для зменшення регулюючої дії при різких змінах завдання задаючу дію g вилучають з дифскладової і формують її за сигналом регульованої величини Y . Додаткового зменшення амплітуди регулюючого сигналу досягають, залишаючи сигнал завдання тільки в інтегральній складовій алгоритму. Такий підхід веде до створення АСР, в яких одні складові ПІД-алгоритму здійснюють послідовну корекцію, а інші – забезпечують корекцію за допомогою від'ємного зворотного зв'язку (рис.1). Треба зауважити, що ПІД-алгоритми вітчизняних контролерів з жорстким програмуванням, наприклад, Реміконт Р-130, не розраховані на їх використання за схемами АСР₂, або АСР₃, але їх алгоритмічні можливості все ж дозволяють реалізувати подібні системи. Контролери, що виробляються зарубіжними фірмами, наприклад, Schneiderelectric, у своїх бібліотеках мають ПІД-алгоритми, які передбачають можливість формування дифскладової як за сигналом помилки

регулювання, так і за сигналом регульованої змінної, тобто забезпечується можливість реалізації систем типу АСР₂ (рис.1). Тією самою фірмою реалізовані ПІД-алгоритми з паралельною структурою, що передбачає незалежне формування усіх складових алгоритму і дозволяє будувати АСР усіх типів, зображених на рис.1. Аналогічні можливості передбачені також у ПІД-алгоритмах, що входять до складу пакета прикладних програм Loop Tuning System LTS Version 2.0 американської фірми Bailey Controls Company.

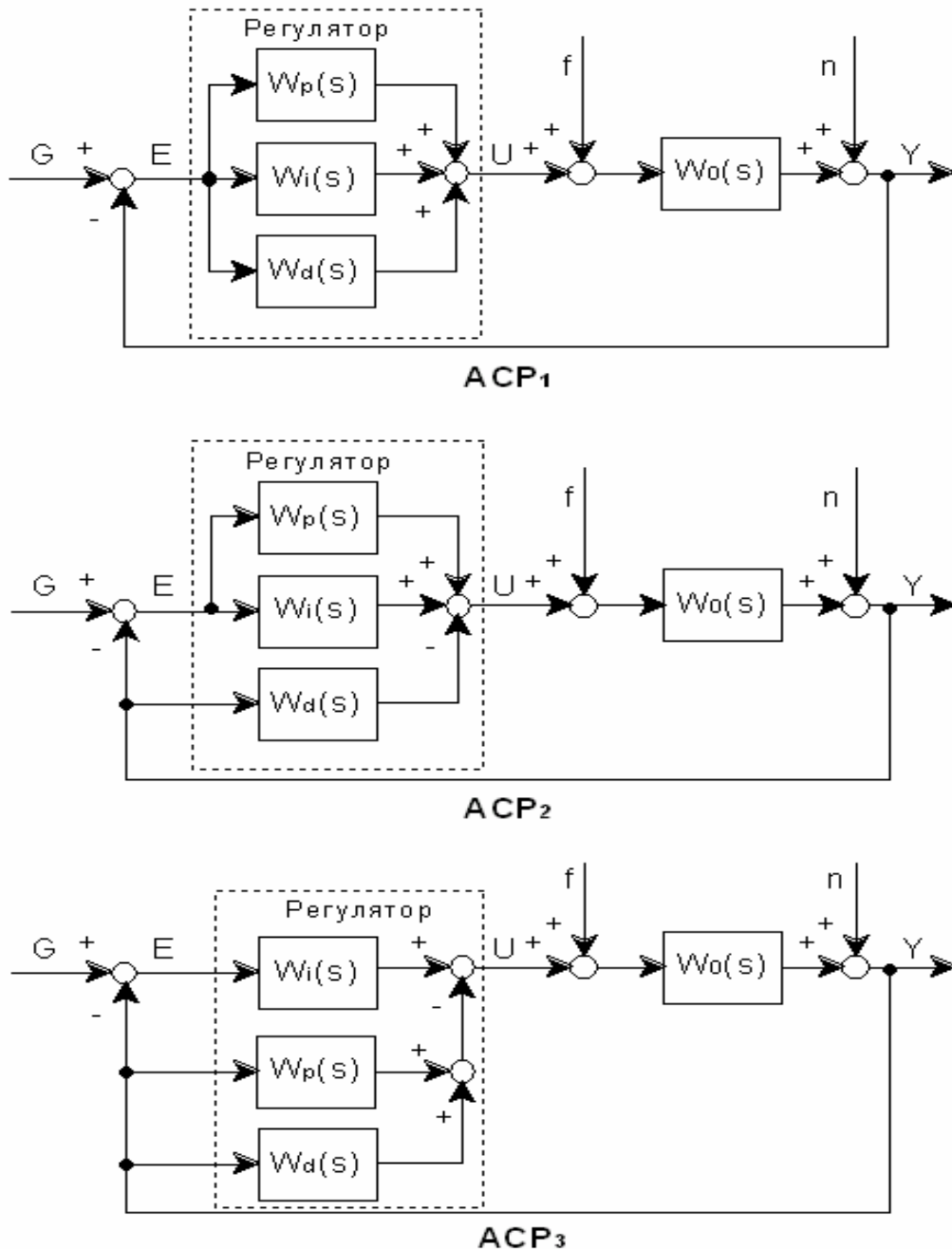


Рис.1. Структурні схеми АСР з ПІД-регуляторами в режимі послідовної (АСР₁) та послідовно-паралельної (АСР₂, АСР₃) корекції.

На рис.1 прийнято такі позначення: f – збурення, що діє на об'єкт з боку регулюючого органа; n – збурення, еквівалентне дії усіх збурень, які впливають на об'єкт; U - регулююча дія; $W_o(s)$ – передавальна функція об'єкта; $W_p(s)$, $W_i(s)$, $W_d(s)$ – пропорційна, інтегральна та диференціальна складові ПД-алгоритму. Як видно з цього рисунку, АСР₁ – це традиційна схема, у якій ПД-регулятор функціонує як послідовний коригуючий пристрій. У схемі АСР₂ об'єкт охоплений від'ємним зворотним зв'язком з дифскладовою, а послідовна корекція здійснюється пропорційною та інтегральною складовими. У схемі АСР₃ послідовна корекція забезпечується інтегральною складовою, а об'єкт охоплений від'ємним зворотним зв'язком з пропорційною та диференціальною складовими. Схеми АСР₂, АСР₃ можна класифікувати, як схеми з послідовно-паралельною корекцією, вони залишаються одноконтурними, як і АСР₁, оскільки в них відсутні додаткові інформаційні зв'язки.

Алгоритми функціонування ПД-регулятора у схемах АСР₁, АСР₂, АСР₃ відповідно мають вигляд:

$$U(s) = [W_p(s) + W_i(s) + W_d] \cdot E(s) = W_{pid}(s) \cdot E(s), \quad (1)$$

$$U(s) = [W_p(s) + W_i(s)] \cdot E(s) - W_d(s) \cdot Y(s) = W_{pi}(s) \cdot E(s) - W_d(s) \cdot Y(s), \quad (2)$$

$$U(s) = W_i(s) \cdot E(s) - [W_p(s) + W_d(s)] \cdot Y(s) = W_i(s) \cdot E(s) - W_{pd}(s) \cdot Y(s). \quad (3)$$

Реалізація алгоритмів (2), (3) по суті означає зміну структури ПД-регулятора. Оскільки у літературі відсутній аналіз властивостей систем з подібними ПД-алгоритмами, то такий підхід можна трактувати як інтуїтивно-очевидний.

У даній роботі на конкретних прикладах досліджуються характеристики АСР з використанням ПД-алгоритмів за схемами послідовно-паралельної корекції. Для дослідження прийнята проста одноконтурна система з найбільш уживаним реальним ПД-алгоритмом, що має вигляд:

$$W(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{N s + 1} \right), \quad (4)$$

де K_p – коефіцієнт підсилення; T_i , T_d – сталі часу інтегрування та диференціювання відповідно; N - постійний коефіцієнт (надалі прийнято $N=8$). Для подальшого розгляду алгоритм (4) подамо у вигляді трьох складових:

$$W(s) = W_p(s) + W_i(s) + W_d(s), \quad (5)$$

$$\text{де } W_p(s) = K_p; \quad W_i(s) = \frac{K_p}{T_i s}; \quad W_d(s) = \frac{K_p T_d s}{\frac{T_d s}{N} s + 1}.$$

Як показав аналіз, передавальні характеристики систем АСР₁, АСР₂, АСР₃ по каналах дії внутрішніх (f) та зовнішніх (n) збурень є однаковими (табл.1) отже, однаковими є і характеристики відповідних перехідних процесів у цих системах.

Передавальні функції АСР по каналах дії збурень

	Вхідна величина	
	f	n
Вихідна величина		
Y	$W_{fy}(s) = \frac{W_0(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$	$W_{ny}(s) = \frac{1}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$
U	$W_{fu}(s) = -\frac{W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$	$W_{nu}(s) = -\frac{W_{pid}(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$
E	$W_{fe}(s) = -\frac{W_0(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$	$W_{ne}(s) = -\frac{1}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$

Натомість передавальні характеристики систем по каналу завдання (табл.2) відрізняються, отже, і відповідні перехідні процеси будуть різними.

Таблиця 2

Передавальні функції АСР по каналу завдання

Тип системи	Вихідна величина		
	Y	U	E
АСР ₁	$W_{gy}(s) = \frac{W_{pid}(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$	$W_{gu}(s) = \frac{W_{pid}(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$	$W_{ge}(s) = \frac{1}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$
АСР ₂	$W_{gy}(s) = \frac{W_{pi}(s) \cdot W_0(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$	$W_{gu}(s) = \frac{W_{pi}(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$	$W_{ge}(s) = \frac{1 + W_d(s) \cdot W_0(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$
АСР ₃	$W_{gy}(s) = \frac{W_i(s) \cdot W_0(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$	$W_{gu}(s) = \frac{W_i(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$	$W_{ge}(s) = \frac{1 + W_{pd}(s) \cdot W_0(s)}{1 + W_{pid}(s) \cdot W_0(s)}$

Дослідження проводилися для систем з реальними об'єктами, що описуються відповідними передавальними функціями:

- пароперегрівник котла енергоблоку 800 МВт [3]

$$W_{01}(s) = \frac{e^{-11,4s}}{(54s + 1) \cdot (22,8s + 1)^2}, \quad (6)$$

- млин-вентилятор пилосистеми котла E500 [4]

$$W_{02}(s) = \frac{8,75 \cdot e^{-21,19s}}{(152,48s + 1) \cdot (21,35s + 1)} \quad (7)$$

За методом багатокритеріальної параметричної оптимізації [5,6] були розраховані оптимальні значення параметрів настроювання ПІД-регулятора. Оскільки при цьому параметри регулятора визначаються на основі характеристичного полінома, то вони є однаковими для АСР₁, АСР₂, АСР₃ і залежать тільки від передавальної функції об'єкта. Були розроблені також моделі цих систем у середовищі SIMULINK пакета MATLAB 5.2 і досліджені перехідні процеси в системах при одиничних стрибкоподібних змінах завдання та збурення f . Результати розрахунків та моделювання наведені у табл.3.

У табл.3 прийнято такі позначення: Y_{mg} , Y_{mf} , U_{mg} , U_{mf} – максимальні відхилення регульованої величини та регулюючого сигналу; J_{kg} , J_{kf} – інтегральні квадратичні критерії перехідних процесів за помилкою регулювання (індекс g стосується процесів, що відбуваються при зміні завдання, а f – при дії збурення); T_i , T_d – в секундах, частота в c^{-1} .

Таблиця 3

**Оптимальні параметри настроювання регулятора
та характеристики перехідних процесів в АСР різної структури**

Параметри регулятора та характеристики перехідних процесів	Об'єкт W_{01}			Об'єкт W_{02}		
	АСР ₁	АСР ₂	АСР ₃	АСР ₁	АСР ₂	АСР ₃
K_p	3,53			0,94		
T_i	34,37			37,56		
T_d	24,30			18,76		
ω	0,038			0,044		
Y_{mg}	1,8	2,0	1,52	2,15	2,25	1,6
Y_{mf}	0,26	0,26	0,26	1,25	1,25	1,25
U_{mg}	26	5,5	3,6	8,0	1,5	0,8
U_{mf}	-1,8	-1,8	-1,8	-2,1	-2,1	-2,1
J_{kg}	67,74	101,0	78,94	87,65	113,0	72,43
J_{kf}	4,53	4,53	4,53	88,79	88,79	88,79

Для прикладу на рис.2 - 5 показані перехідні процеси у системах АСР₁, АСР₂, АСР₃ з об'єктом W_{01} і регулятором, що має передавальну функцію (4).

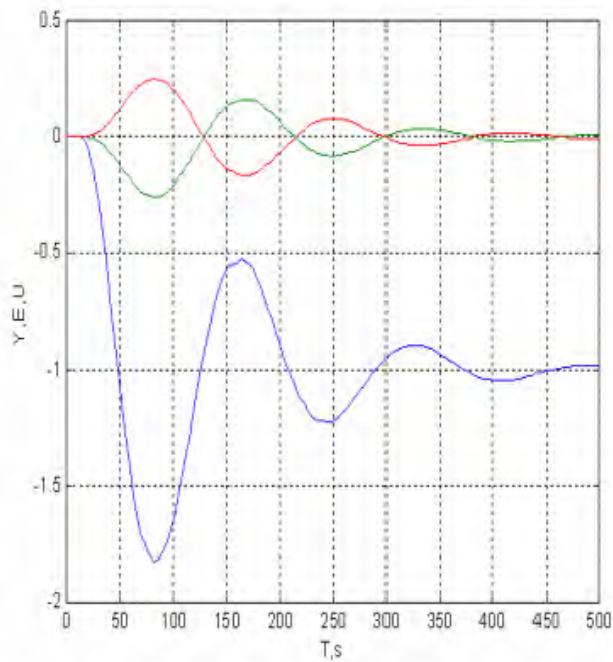


Рис.2. Перехідні процеси в АСР при одиначній стрибкоподібній зміні збурення f .

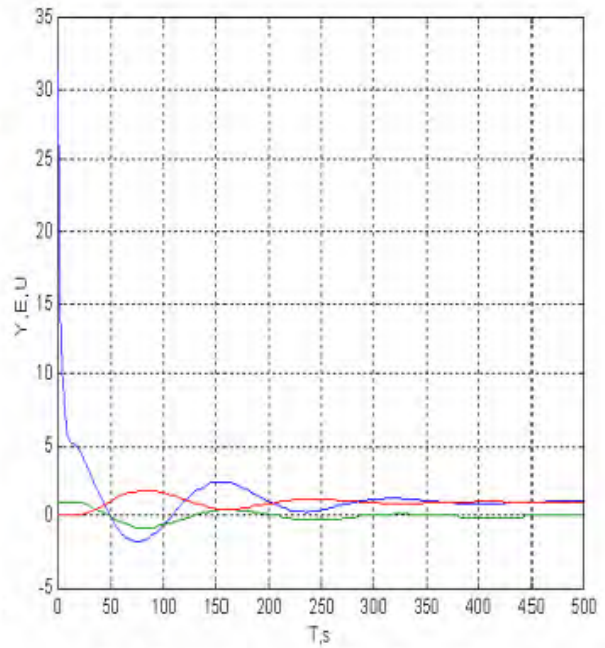


Рис.3. Перехідні процеси в АСР₁ з об'єктом W_{01} при одиначній стрибкоподібній зміні сигналу завдання.

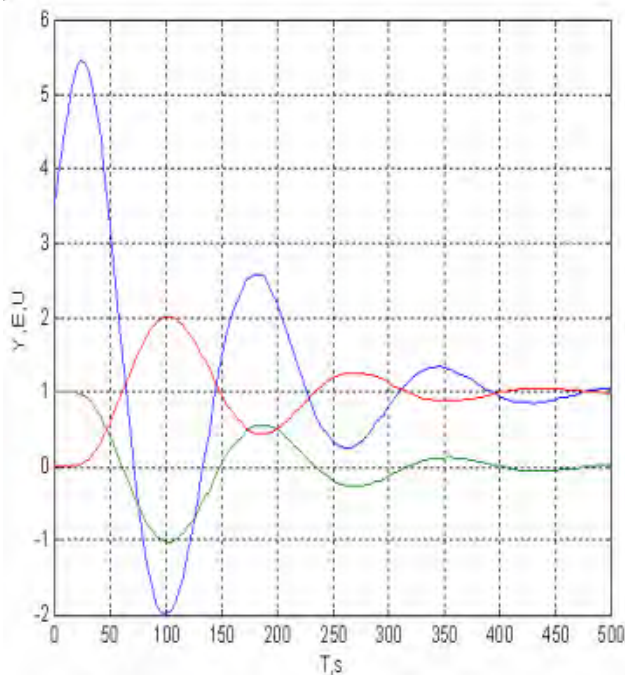


Рис.4. Перехідні процеси в АСР₂ з об'єктом W_{01} при одиначній стрибкоподібній зміні сигналу завдання.

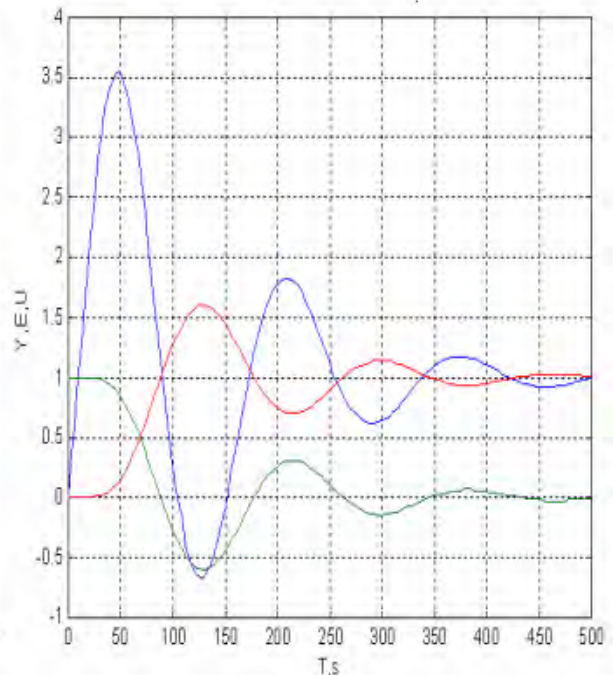


Рис.5. Перехідні процеси в АСР₃ з об'єктом W_{01} при одиначній стрибкоподібній зміні сигналу завдання.

На підставі наведених результатів, а також виконаних нами багатьох інших подібних розрахунків можна зробити такі висновки:

- максимальне значення сигналу регулюючої дії в системах у напрямку АСР₁ → АСР₃ зменшується приблизно в 5-10 разів, що є дуже важливим для багатьох об'єктів;

- у системах типу АСР₂ показники якості (Y_{mg} , J_{kg}) регулювання є найгіршими, тому орієнтація деяких виробників контролерів на забезпечення можливості реалізації такого виду систем виглядає необґрунтованою;

- за показниками Y_{mg} , U_{mg} , а у переважній більшості випадків і за J_{kg} , найкращою є система типу АСР₃, і це потрібно враховувати, проектуючи алгоритмічне забезпечення контролерів, а також під час практичної реалізації систем регулювання;

- тривалість перехідних процесів у всіх типах АСР приблизно однакова (рис.2-рис.5).

Виконані нами розрахунки показали, що аналогічні висновки справедливі також для систем з іншими об'єктами та реальними ПД-регуляторами, передавальні функції яких мають дифскладову з фільтром другого порядку.

Проводилися також дослідження впливу змін динаміки об'єкта на якість процесів регулювання у системах різної структури, які підтвердили, що поряд з оптимізацією параметрів ПД-регулятора ефективним методом покращання якості регулювання є його використання за схемою послідовно-паралельної корекції типу АСР₃, при цьому фактично не вимагається ніяких додаткових затрат.

Якщо описаний підхід все ж не забезпечує виконання поставлених вимог щодо якості регулювання, необхідно переходити до складніших – каскадних або комбінованих структур АСР.

1. Острем К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ: Пер. с англ. М., 1987. 2. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер. с англ. М., 1984. 3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М., 1985. 4. Ротач В.Я. Программы определения передаточных функций объектов управления по переходным характеристикам // Теплоэнергетика. 1995. № 11. С.75 - 80. 5. Шавров А.В., Солдатов В.В. Многокритериальное управление в условиях статистической неопределенности. М., 1990. 6. Ковела І.М. Багатокритеріальна параметрична оптимізація неперервних АСР з типовими лінійними регуляторами // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1998. № 324. С.3-9.

УДК 621.317

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТОМОГРАФІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ

© Дорожовець М.М., 2000

ДУ "Львівська політехніка", кафедра "Інформаційно-вимірювальна техніка"

Запропоновано математичну модель систематичних та випадкових похибок вимірювальної схеми з еквіпотенціальними електродами. Отримано кореляційну матрицю інструментальних похибок. Показано різний вплив