

# Цифрові автоматичні системи регулювання з широтно-імпульсною модуляцією

І.М. Ковела<sup>1</sup>, А.Й. Наконечний<sup>1</sup>, Ю.В. Яцук<sup>1</sup>

*Анотація* – The results of comparative studies of automatic systems for digital pulse-width control based on PID algorithm and enforcement mechanism of constant velocity.

*Ключові слова* – ПІД-регулятор, модулятор, цифрові системи керування.

## I. ВСТУП

У практиці автоматизації промислових об'єктів широко застосовуються системи з виконавчими механізмами (ВМ) постійної швидкості [1]. Такі ВМ мають суттєво нелінійну статичну характеристику, однак її можна лінеаризувати за допомогою широтно-імпульсного керування. Тоді при роботі ВМ у ковзному режимі він набуває властивостей квазілінійної інтегральної ланки і система загалом може наближено розглядатися, як лінійна. У системах регулювання такі ВМ використовуються, як приводи пропорційної або інтегральної дії. Ці системи відрізняються, зокрема, способами реалізації алгоритмів регулювання та функцій оперативного керування. Проте у доступних джерелах не виявлено порівняльних досліджень такого класу систем з огляду на якість регулювання, отже ця задача є актуальною..

## II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Сучасні автоматичні системи регулювання (АСР) будуються на основі дискретних аналогів неперервних алгоритмів. Практично застосовуються дві структури АСР з ШІМ-регулюванням. У першій з них (рис. 1а) алгоритм регулювання повністю формується функціональним блоком регулятора, а ВМ працює, як привід пропорційної дії.

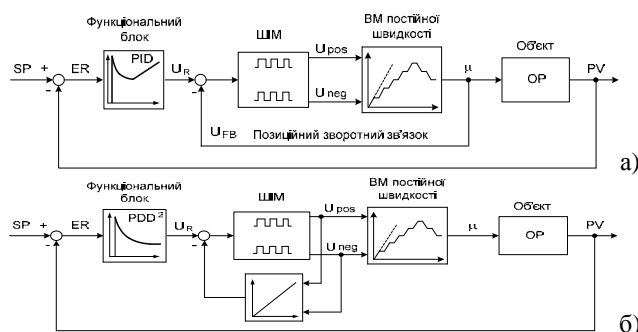


Рис. 1. Функціональні схеми цифрових систем ШІМ-регулювання з ПІД-алгоритмом та ВМ постійної швидкості; а – з ВМ пропорційної дії; б – з ВМ інтегральної дії.

У другій структурі (рис. 1б) алгоритм регулювання формується з урахуванням динаміки ВМ, що функціонує, як привід інтегральної дії.

Як показано в роботі [2], оптимальний за близькістю до неперервного прототипу цифровий ПІД-алгоритм з реальною дифскладовою, апроксимованою трапеціями, описується передавальною функцією

$$W_{pid1}(z) = K_p \left[ 1 + \frac{T_0}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{\frac{2T_d}{(2T_d/N)+T_0} (1-z^{-1})}{1 - \frac{(2T_d/N)-T_0}{(2T_d/N)+T_0} z^{-1}} \right], \quad (1)$$

де  $K_p, T_i, T_d$  - параметри настроювання регулятора;  $T_0$  - період дискретності;  $N$  - нормуючий коефіцієнт.

У другій структурі АСР для реалізації ПІД-алгоритму функціональний блок регулятора повинен формувати дискретну ПДД<sup>2</sup>-ланку, яка з умов стійкості може бути апроксимована лише за оберненим методом Ейлера і описується передавальною функцією

$$W_{pdd2}(z) = K_p \frac{T_\mu}{T_i} \left[ 1 + \frac{T_i}{T_0} (1-z^{-1}) + \frac{\frac{T_i T_d N}{T_0 (T_d + T_0 N)} (1-z^{-1})^2}{1 - \frac{T_d}{T_d + T_0 N} z^{-1}} \right]. \quad (2)$$

Тоді, беручи до уваги передавальну функцію ВМ  $W_\mu(z) = T_0 / T_\mu (1-z^{-1})$ , де  $T_\mu$  - час повного ходу ВМ, отримуємо цифровий ПІД-алгоритм виду

$$W_{pid2}(z) = K_p \left[ 1 + \frac{T_0}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{\frac{T_d}{(T_d/N)+T_0} (1-z^{-1})}{1 - \frac{T_d/N}{(T_d/N)+T_0} z^{-1}} \right], \quad (3)$$

який поступається алгоритму (1) за точністю дискретизації неперервного прототипу.

В системах з цифровою реалізацією алгоритмів регулювання керуюча змінна  $U_R$  має вигляд кусково-неперервного сигналу, значення якого оновлюються з періодом дискретності  $T_0$ . У цьому випадку суть ШІМ-модуляції полягає в тому, що тривалість імпульсів на періоді дискретності пропорційна значенню вхідної змінної. Отже, якщо якщо  $U_R$  має рівень 40% (у відносних одиницях), то це означає, що додатний імпульс матиме тривалість 40% від значення періоду повторення імпульсів, решта 60% періоду буде становити пауза. При цьому тривалість імпульсу обчислюється заново на

<sup>1</sup> Національний університет „Львівська політехніка”, вул.. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

початку кожного періоду. Для реалізації цієї вимоги з достатньою точністю використовуються імпульси спеціального генератора, період яких  $T_G$  рекомендується вибирати з умови  $T_G \leq 0.1T_0$ . Мінімальне значення тривалості імпульсів вибирається з умов забезпечення необхідної статичної точності та стійкості системи, а також запобігання надмірного зношування виконавчого механізму.

При дослідженні АСР ще на стадії проектування виникає необхідність їх моделювання, яке найбільш доцільно виконати за допомогою засобів *Simulink* [3]. Особливості моделювання систем ШІМ-регулювання з використанням блоку PWM Generator (*pulse with modulator*) розглянуті у роботі [4].

Для прикладу проаналізуємо характеристики цифрових систем ШІМ-регулювання, побудованих за структурними схемами, наведеними на рис. 1. При цьому було прийнято, що об'єкт описується математичною моделлю  $W_o(s) = e^{-50s} / (100s + 1)^2$ , а стала часу виконавчого механізму  $T_{\mu} = 20$  с.

Параметри настроювання регуляторів (табл. 1) були розраховані за методом багатокритеріальної параметричної оптимізації при  $N = 10$  [5,6].

ТАБЛИЦЯ 1

ПАРАМЕТРИ НАСТРОЮВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ

Алгор.	$K_p$	$T_i, c$	$T_d, c$	$T_0, c$
ПІД <sub>1</sub>	2.003	156.29	43.45	4.0
ПІД <sub>2</sub>	1.902	156.14	42.49	4.0

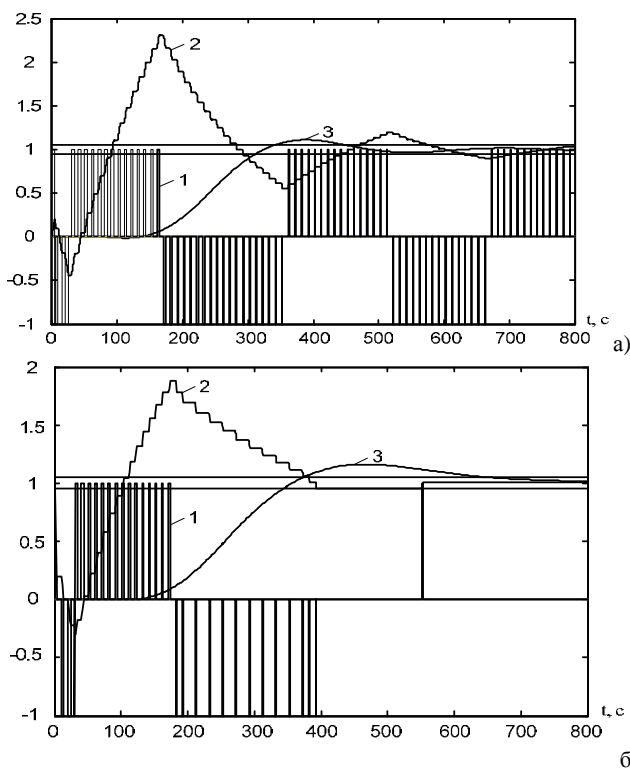


Рис. 2. Процеси відпрацювання завдання в цифрових АСР

з ПІД-алгоритмом, ШІМ та ВМ, як приводом пропорційної (а) та інтегральної (б) дії

Як видно з результатів моделювання (рис. 2 і табл. 2), процеси регулювання в АСР з пропорційним ВМ, порівняно з іншою, характеризуються вищою якістю, проте відбуваються при істотно більшому числі його вмикань та реверсів. На рис. 2: 1–керуючий ШІМ-сигнал; 2– переміщення робочого органу ВМ; 3 – регульована величина. Процеси компенсації збурення, що діє на вхід об'єкта, тут не відображені, але показники їх якості для досліджуваних АСР також наведені у табл.2.

ТАБЛИЦЯ 2

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ СИСТЕМ ШІМ-РЕГУЛЮВАННЯ

Алг.	$u_{mg}$	$t_g$	$J_g$	$u_{mf}$	$t_f$	$J_f$
ПІД <sub>1</sub>	1.11	450	215.3	0.273	415	8.70
ПІД <sub>2</sub>	1.16	653	226.3	0.305	325	11.5

Позначення в табл.2:  $u_m$ ,  $t$ ,  $J$  – максимальне динамічне відхилення регульованої величини, час регулювання (в секундах) та інтегральна квадратична оцінка перехідного процесу; індекси  $g$  та  $f$  стосуються процесів відпрацювання завдання та компенсації збурення відповідно.

### III. ВИСНОВОК

У наведеному прикладі якість АСР з оптимальним ПІД-алгоритмом та пропорційним приводом загалом суттєво вища, ніж системи з ПІД<sup>2</sup> – ланкою та приводом інтегральної дії. Проте цей ефект досягається за рахунок істотно більшого числа вмикань/вимикань і реверсів ВМ, що зменшує його надійність та системи загалом.

Отже вибір структури системи ШІМ-регулювання може бути зроблений лише на основі аналізу конкретної АСР з урахуванням необхідності забезпечення заданої точності та прийнятних умов роботи виконавчого механізму

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- [1] Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования / Под ред. А.С. Ключева.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 368 с.
- [2] Ковела І.М. Обґрунтування оптимальної структури цифрових ПІ-, ПД- та ПІД-алгоритмів. // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології".- 2001.- № 433.- С. 11-22.
- [3] Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений.-М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.- 496 с.
- [4] Ковела І.М., Вітер О.С., Яцук Ю.В. Імітаційні моделі автоматичних систем регулювання з широтно-імпульсною модуляцією. // Вісник НУ „Львівська політехніка” “Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація”.- 2010. № 677 - С. 113-121.
- [5] Ковела І.М. Параметричний синтез неперервних і цифрових автоматичних систем регулювання з ПІ- та ПІД-регуляторами//Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології”.- 2002.- № 450.- С. 38-50.