



УДК 681.5

DIGITAL PID CONTROLLER FOR A SECOND-ORDER ELECTROMECHANICAL OBJECT WITH A DELAY

ЦИФРОВИЙ ПІД-РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБ'ЄКТУ ДРУГОГО ПОРЯДКУ З ЗАПІЗНЮВАННЯМ

Semenets D.A. / Семенець Д.А..

с.т.с., / к.т.н.

ORCID: 0000-0002-7520-1996

V.N. Karazin Kharkiv National University,

Kharkiv, Freedom Square 4, 61022

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,

м. Харків, майдан Свободи, 4 61022

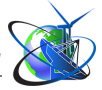
Анотація. У статті проаналізовані методи налаштування ПІД-регуляторів за умови їх роботи в головному контурі регулювання швидкості обертання електромеханічної системи. Передбачена можливість модернізації існуючих систем управління з внутрішніми контурами регулювання, оптимізованими за відомими критеріями. Врахована особливість нестационарності механічного навантаження електроприводу, а саме – несталість моменту інерції та часу ланки транспортного запізнення. Для реальних умов налаштування електроприводу постійного струму з об'єктом управління типу FOLIPD проведено синтез цифрового регулятора за безперервним аналогом, виконано моделювання системи управління з налаштованим регулятором у середовищі MATLAB Simulink. Отримані модифіковані розрахункові співвідношення для визначення параметрів ПІД-регулятора, залежність якості регулювання від параметрів об'єкту управління. Результати дослідження можуть бути корисні для синтезу цифрових регуляторів за безперервним аналогом.

Ключові слова: автоматизований електропривод, контур регулювання, ПІД – регулятор, якість регулювання, цифровий регулятор.

Вступ.

Сучасне промислове обладнання важко уявити без локальних систем управління електромеханічними об'єктами, які виконують функції стабілізації, стеження та обмеження певних координат електроприводу. Раніш, традиційно, такі системи реалізовувалися на базі аналогових регуляторів, вбудованих в комплектні перетворювальні пристрої керування електричними двигунами. Зараз, стрімкий розвиток систем програмованого керування електроприводами дозволяє реалізовувати регулятори як на базі програмованих контролерів, так і на базі окремих автономних мікроконтролерних систем.

При реалізації регулятора у дискретному форматі синтез параметрів регулятора, як правило, здійснюють з використанням однієї з двох методик.



Перша передбачає визначення дискретної передавальна функція цифрової системи за передавальною функцією безперервної частини і регулятор синтезується в термінах z -перетворення [1]. Згідно другої методики, цифровій системі ставиться у відповідність еквівалентна безперервна система, синтезується аналоговий регулятор для цієї безперервної системи, після чого розраховані параметри такого регулятора визначають параметри цифрового регулятора. Останній повинен забезпечити перехідний процес, близький до процесу еквівалентної безперервної системи. Основною проблемою при цьому є визначення структури і параметрів еквівалентної безперервної системи. Додаткові труднощі вносить нестационарність виконавчого механізму електроприводу, в якій можлива несталість моменту інерції та часу затримки ланки транспортного запізнювання (за її наявності).

При синтезі регулятора за другою методикою актуальним завданням є вибір якісного та простого алгоритму визначення параметрів безперервного регулятора з врахуванням його подальшого перетворення у цифрову форму. В роботі пропонується використання ПІД – регулятора як прототипу цифрового пристрою регулювання головного контуру системи управління з врахуванням внутрішніх контурів, вже налаштованих аналоговими регуляторами на певні критерії оптимізації.

Основний текст

Існує величезна кількість методів налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора, яка активно поповнюється. Роботи у цій сфері тривають, оскільки розробники прагнуть задовольнити зростаючі потреби щодо якості автоматизації технічних процесів за умови обмеженої кількості факторів впливу та певних апаратних обмежень [2], [6], [8], [9]. Разом з тим, питання оптимального налаштування ПІД-регуляторів залишаються відкритими, оскільки складність технологічних процесів у багатьох випадках спричиняє складнощі (інколи неможливість) застосування того чи іншого інженерного методу налаштування ПІД-регулятора [5], [9].

В роботі представлений синтез ПІД-регулятора у випадку модернізації



електроприводу з двигуном постійного струму серії ПБВ. Конструктивні параметри електродвигуна наступні: номінальна напруга якірного кола $U_H = 52$ В; номінальний струм якоря $I_H = 18$ А; номінальна швидкість обертання $n_H = 1000$ об/хв.; момент інерції якоря $J_A = 0,01$ кг/м²; активний опір якірного кола $R_A = 0,222$ Ом; індуктивність якірного кола $L_A = 1,18$ мГн; електромагнітна стала часу $T_E = 6,3$ мс; електромеханічна стала часу $T_{EM} = 10,3$ мс; стала ЕРС двигуна $c\Phi = 0,4298$ Вс/рад. ($k_D = 2,327$ об/В.рад;).

Контур струму якоря в існуючій системі управління оптимізовано за модульним критерієм і на структурній схемі (рисунок 1) оптимізований контур, згідно існуючих рекомендацій [4], показаний ланкою, яка характеризується коефіцієнтом зворотного зв'язку контуру струму k_T (визначається величиною напруги завдання на вході контуру для забезпечення обмеження струму на рівні 2,5 кратного номінального); коефіцієнтом зворотного зв'язку контуру швидкості k_C (визначається величиною напруги завдання на вході контуру для забезпечення максимальної швидкості обертання $n_{MAX} = 2000$ об/хв.); малою некомпенсованою сталою часу контуру швидкості $T_{\mu C}$, яка функціонально пов'язана з малою некомпенсованою сталою часу контуру струму і в цілому визначає швидкодію контуру регулювання. В контурі регулювання врахована ланка чистого запізнювання з сталою часу τ_M , що обумовлено особливостями механічної трансмісії навантаження та властивостями датчика швидкості.

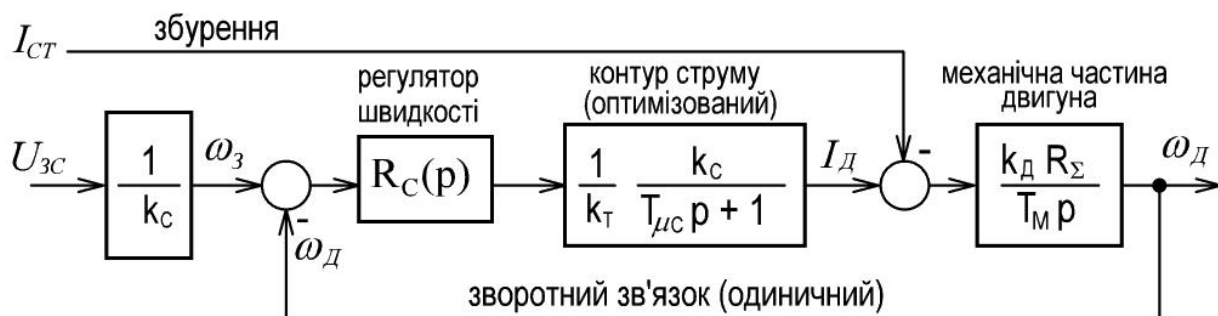


Рисунок 1 – Структурна схема контуру регулювання швидкості електромеханічної системи



Таким чином, об'єкт управління ідентифікуємо передавальною функцією

$$G(p) = \frac{K_M}{(T_M p + 1)p} \exp(-p\tau_M), \quad (1)$$

Розрахункова схема контуру регулювання показана на рисунку 2. В схемі доданий ФНЧ першого порядку з постійною часу T_F , який потрібен для забезпечення технічної реалізації регулятора.

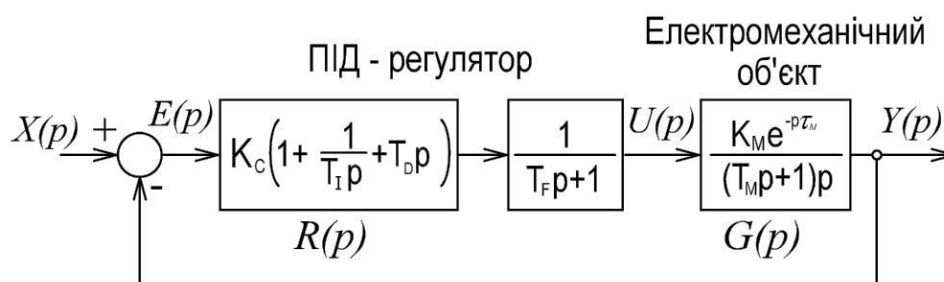


Рисунок 2 – Структурна схема контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з ПІД - регулятором

В роботі [2] для подібного об'єкту управління другого порядку з ланкою чистого запізнювання типу FOLIPD розглянуто більш ніж 70 методів налаштування ПІД-регулятора. З представлених найбільш відповідним методом для заданих умов розробки контуру регулювання обираємо метод Kristiansson and Lennartson (2006), згідно з яким розрахункові співвідношення параметрів регулятора розрізняються для трьох випадків співвідношення часових параметрів об'єкту управління $k = \tau_M / T_M$: випадок значного часу запізнювання $1 \leq k < 50$; випадок співмірних сталих часу $0,25 \leq k \leq 1$; випадок незначного часу запізнювання $0 < k < 0,25$.

Синтез цифрового ПІД-регулятора контуру швидкості проводимо по методу перетворення безперервного регулятора - аналогу.

Передавальна функція аналогового регулятора згідно розрахункової структурної схеми:

$$R(p) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right) \frac{1}{1 + T_F p}, \quad (2)$$

або в стандартному вигляді



$$R(p) = \frac{K_c T_I T_D p^2 + T_I p + 1}{p(T_F p + 1)} = K_R \frac{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (3)$$

На підставі рекомендацій [2] визначимо розрахункові співвідношення для розрахунку параметрів аналогового регулятора.

Для випадку незначної величини часу запізнювання $0 < k < 0,25$.

$$\begin{aligned} b_2 &= T_M^2 (2,4k + 0,9)^2; \\ b_1 &= 2T_M (1 - 0,35 \exp(-4k))(2,4k + 0,9); \quad b_0 = 1; \\ a_2 &= T_M \cdot 0,25 \exp(-8k)(2,4k + 0,9)^2; \\ a_1 &= 1; \quad a_0 = 0; \\ K_R &= \frac{5 \exp(-8k)}{K_M T_M^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для випадку співмірних величин часу запізнювання та малої некомпенсованої сталої часи контуру $2,5 < k < 1$.

$$\begin{aligned} b_2 &= T_M^2 (1,7k + 1,3)^2; \\ b_1 &= 2T_M (1,7 - \exp(-k/1,3))(1,7k + 1,3); \quad b_0 = 1; \\ a_2 &= T_M (0,85k + 0,65); \quad a_1 = 1; \quad a_0 = 0; \\ K_R &= \frac{2 \exp(-4,5k)}{K_M T_M^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для випадку значної величини часу запізнювання $1 < k < 50$.

$$\begin{aligned} K_R &= (0,06 + 0,004k) / (K_M T_M^2); \\ b_2 &= T_M^2 (1,7k + 1,3)^2; \\ b_1 &= 2T_M (1,7 - \exp(-k/1,3))(1,7k + 1,3); \quad b_0 = 1; \\ a_2 &= T_M (0,85k + 0,65); \quad a_1 = 1; \quad a_0 = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Для оцінки якості регулювання в контурі швидкості проведено комп'ютерне моделювання для розробленого регулятора. Параметри об'єкту управління визначені у відповідності з наданими параметрами електромеханічної системи та врахуванням моменту інерції виконавчого механізму: $k_C = 0,0478$; $k_T = 0,111$; T_M



$= 450$ мс; $K_M = 0,494$; $T_{\mu C} = T_M = 15$ мс; причому далі враховане можливе відхилення часу запізнювання τ_M в межах $1 \dots 3$ мс. Результати моделювання – перехідні функції системи за умови різних значень часу запізнювання показані на рисунку 3. Розрахунки регулятора – за рівняннями (4).

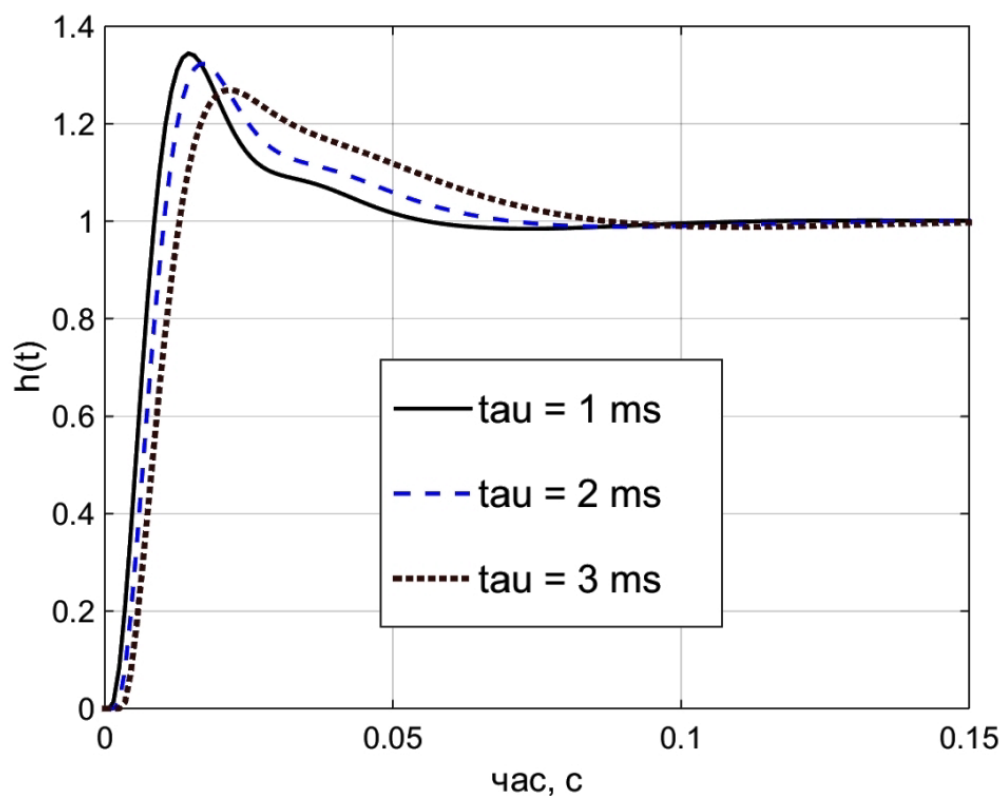


Рисунок 3 – Перехідні функції контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з аналоговим ПД - регулятором

Проведені дослідження показують цілком задовільну якість перехідного процесу з розрахованим регулятором, при варіації часу затримки в межах $(0,1 \dots 3)$ мс, перерегулювання процесу встановлення швидкості змінюється в межах $\sigma = (22 \dots 33)\%$ за складним нелінійним законом та апроксимується з достатньою точністю поліномом 3-порядку:

$$\sigma = 0,214\tau_M^3 - 3,099\tau_M^2 + 5,6737\tau_M + 31,701, \quad (7)$$

тут перерегулювання σ - у відсотках, час – у мілісекундах.

Час встановлення практично залишається незмінним та дорівнює $T_S \approx (7 \dots 8,5)T_M$.

Далі проводимо z - перетворення отриманої передаточної функції для



визначення параметрів цифрового регулятора за умови використання екстраполятора нульового порядку. Отримана дискретна передаточна функція цифрового регулятора:

$$R(z) = \frac{s_2 z^2 + s_1 z + s_0}{g_2 z^2 + g_1 z + g_0}. \quad (8)$$

Коефіцієнти поліномів чисельника та знаменника розраховуємо за умови заданої величини часу запізнювання $\tau_M = 3$ мс. Період квантування за часом T_0 обираємо кратним меншим за час затримки та для порівняння та можливості аналізу виконаємо розрахунки для трьох значень: $T_0 = 1,5$ мс; $1,0$ мс; $0,5$ мс.

За умови $T_0 = 1,5$ мс:

$$\begin{aligned} s_2 &= 2699; & s_1 &= -5187; & s_0 &= 2497; \\ g_2 &= 1; & g_1 &= -1,353; & g_0 &= 0,3534; \end{aligned}$$

За умови $T_0 = 1,0$ мс:

$$\begin{aligned} s_2 &= 2699; & s_1 &= -5236; & s_0 &= 2542; \\ g_2 &= 1; & g_1 &= -1,5; & g_0 &= 0,4998; \end{aligned}$$

За умови $T_0 = 0,5$ мс:

$$\begin{aligned} s_2 &= 2699; & s_1 &= -5304; & s_0 &= 2606; \\ g_2 &= 1; & g_1 &= -1,707; & g_0 &= 0,707; \end{aligned}$$

Результати моделювання – перехідні функції системи за умови різних значень періоду квантування T_0 показані на рисунку 4. Як видно, за умови $T_0 = 0,5$ мс перехідна функція системи управління цілком відповідає часовій характеристиці системи з відповідним аналоговим регулятором. Перерегулювання вихідної величини не перевищує 25%, час встановлення – не перевищує 100 мс. Тобто обраний метод налаштування ПІД-регулятора придатний для швидкого синтезу цифрових регуляторів для розглянутого типу об'єкту управління.

Висновки.

В роботі були розглянуті методи розрахунку ПІД-регулятора для роботи в зовнішньому контурі регулювання швидкості електромеханічною системою з двигуном постійного струму за умови наявності оптимізованого внутрішнього



контуру, який виступає в якості об'єкта управління. В об'єкті управління врахована наявність ланки чистого запізнювання.

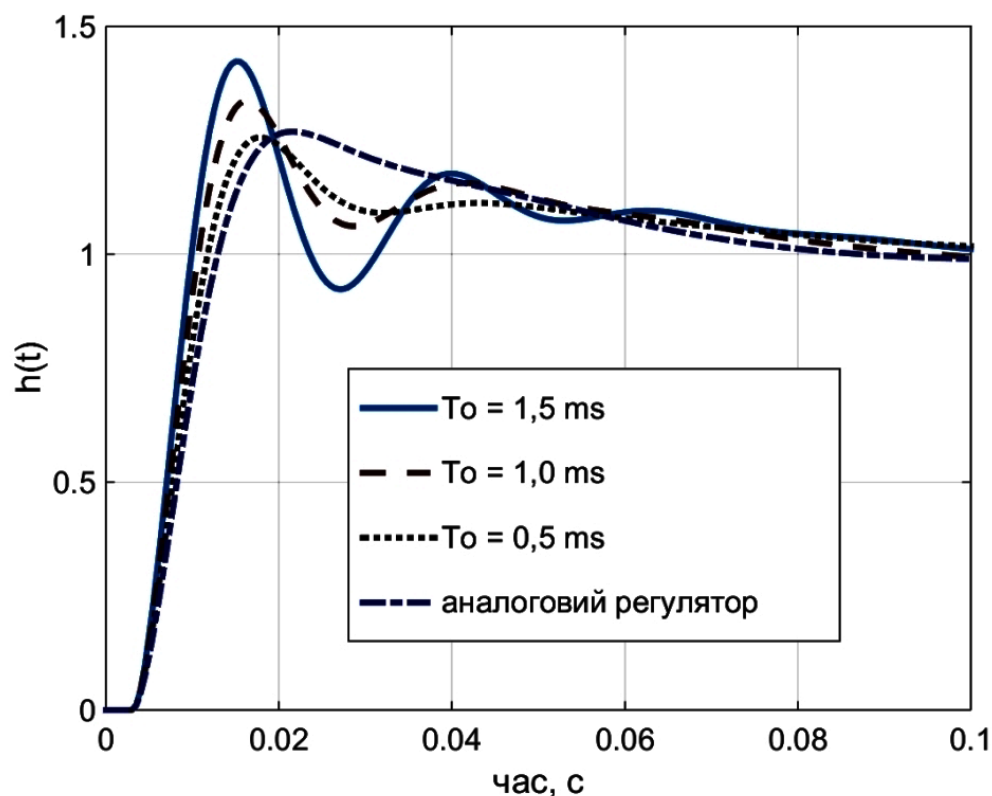


Рисунок 4 – Перехідні функції контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з цифровими та аналоговим ПІД - регуляторами

Для вибраного методу Kristiansson and Lennartson (2006) були отримані модифіковані розрахункові співвідношення для визначення параметрів аналогового регулятора з подальшим його перетворенням у цифровий формат. Проведене комп'ютерне моделювання доводить відповідність вибраного методу поставленому завданню. Отримані результати можуть бути корисними при модернізації існуючих локальних систем управління електроприводами.

Література:

1. Benjamin C. Kuo. Digital Control Systems (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering). Oxford University Press; 2nd edition (June 1, 1995). 784 pages.



2. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd Edition) / Aidan O'Dwyer/ - Ireland: Imperial College Press, 2009. – 623 p.

3. Solving control engineering problems with MATLAB (MATLAB curriculum series) / K. Ogata. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2014. – 527 p.

4. Електромеханічні системи підпорядкованої структури з властивостями слабкої чутливості до параметричних та координатних збурень [Електронний ресурс]: монографія / М. П. Бурик; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,24 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 268 с.

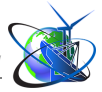
5. Ковела І.М. Інженерна методика синтезу автоматичних систем з ПД-регуляторами / І.М. Ковела, О.О. Іванюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Вимірювальна техніка та метрологія». – 2008. - №69. – С.43-51.

6. Ковела І.М. Синтез автоматичних систем на основі цифрового ПД-регулятора з чотирма параметрами настроювання / І. Ковела, А. Наконечний, Ю. Яцук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – 2011. - № 719. – С. 27 – 36.

7. Лісовець С.М. Використання цифрового ПД-регулятора в контурі керування електромеханічним приводом промислового робота / С.М. Лісовець // Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. Том 34 (73) № 5 С. 161 – 165

8. Лорія М.Г. Оптимальні настроювання регуляторів промислових систем управління технологічними об'єктами: монографія / М.Г. Лорія, О.В. Поркуян, М.В. Ананьєв, О.Б. Целіщев [під ред. М.Г. Лорія]. – Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2019. – 192 с.

9. Ромасевич Ю.О. Розроблення методу оптимального налаштування ПД-регуляторів / Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, А. П. Ляшко, В. В. Макарець // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2019. - Вип. 53. С. 56 – 65



Abstract. The article analyzes the methods of tuning PID controllers when they operate in the main speed control loop of an electromechanical system. The possibility of modernizing existing control systems with internal control loops optimized according to known criteria is provided. The peculiarity of non-stationarity of the mechanical load of the electric drive is taken into account, namely, the instability of the moment of inertia and the time of the transport delay link. For the real conditions of tuning a DC electric drive with a FOLIPD-type control object, a digital controller was synthesized by a continuous analog, and the control system with the tuned controller was modeled in MATLAB Simulink. The modified design relations for determining the parameters of the PID controller and the dependence of the control quality on the parameters of the control object were obtained. The results of the study can be useful for the synthesis of digital controllers by continuous analog.

Key words: automated electric drive, control loop, PID controller, control quality, digital controller.

Статтю надіслано: 24.04.2025 г.

© Семенець Д.А.