

Семенець Д.А.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Васильчук Д.П.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Арестова Т.В.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

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

У статті розглянуті особливості синтезу цифрового пропорційно-інтегрального регулятора за умови роботи в головному контурі регулювання швидкості обертання електромеханічної системи. Враховані умови модернізації існуючої системи управління з внутрішніми контурами регулювання, оптимізованими за певними відомими критеріями. Взята до уваги можливість нестационарності механічного навантаження електроприводу, а саме – несталість моменту інерції та часу ланки транспортного запізнення. Для реальних параметрів налаштування електроприводу з двигуном постійного струму серії ПБВ та механічним навантаженням, що ідентифікується моделлю об'єкту управління другого порядку з інтегральною складовою та часовою затримкою (FOLIPD) проведений синтез аналогового пропорційно-інтегрального регулятора за критерієм мінімуму інтегральної абсолютної похибки (*minimut IAE*, Shinskey 1994) з додатковим локальним зворотним зв'язком. За аналоговим прототипом розраховані параметри цифрового регулятора. Отримані модифіковані розрахункові співвідношення для визначення параметрів пропорційно-інтегрального регулятора, досліджені залежності показників якості регулювання від параметрів об'єкту управління.

Практична цінність запропонованої методики підтверджена результатами комп'ютерного моделювання з використанням програмного продукту MATLAB Simulink. Отримані результати показали відповідність якості регулювання в системі цифровим регулятором системі з аналоговим прототипом.

Розглянутий метод розрахунку параметрів зовнішнього контуру регулювання швидкості електромеханічної системи характеризується простотою, можливістю швидкого налаштування до зміни параметрів об'єкту управління та низькою чутливістю цифрового регулятора до відхилень параметрів об'єкту управління. Результати дослідження можуть бути корисні для синтезу цифрових регуляторів за безперервним аналогом для електроприводів з різноманітним механічним навантаженням.

Ключові слова: автоматизований електропривод, нестационарність об'єкту управління, контур регулювання, пропорційно-інтегральний регулятор, цифровий регулятор, якість регулювання.

Постановка проблеми. Сучасні електроприводи є основою автоматизації та забезпечення енергоефективності виробничих процесів, пов'язаних з механічним рухом та переміщеннями. Основний тип їх реалізації – комплектні регульовані електроприводи – локальні системи управління електромеханічними об'єктами, які виконують функції стабілізації, стеження та обмеження певних координат електроприводу. Широка номенклатура сучасних електроприводів здатна задовольнити будь-які вимоги з боку

виконвчого механізму, технологічного процесу та системи автоматизації вищого рівня.

Вплив на продуктивність, точність, надійність, енергетичні показники промислового обладнання обумовлюють регулятори певних координат електроприводу. Сучасні тенденції автоматизації виробництва передбачають повсебічне впровадження програмованих засобів керування електроприводами, що обумовлює використання цифрових пристроїв як для управління послідовністю операцій, так і для управління

системою зі зворотним зв'язком. У багатьох системах управління електроприводами ці методи використовуються спільно.

Актуальне завдання автоматизації – розробка методів налаштування регуляторів, які задовольняють вимогам технологічного процесу та забезпечують якісні показники перехідних процесів, точності та продуктивності обладнання.

Відомо, що синтез цифрових регуляторів проводиться одним з трьох методів: синтез цифрового регулятора за безперервним аналогом; синтез цифрових регуляторів методом частотних характеристик; синтез цифрових регуляторів прямими аналітичними методами (поліноміальними) [1]. Причому, в умовах модернізації існуючого електрообладнання часто виникає завдання розробки цифрового пристрою регулювання головної координати електроприводу при збереженні існуючої системи управління підлеглими координатами, реалізованого на базі аналогових елементів.

Синтез цифрового регулятора за безперервним аналогом – одна з найпоширеніших у практиці проєктування методик розрахунку цифрових регуляторів. Суть методу полягає в тому, що об'єкт регулювання вважають безперервним і синтез регулятора проводять за безперервною моделлю об'єкта виду методами, відомими з теорії безперервних систем. Отриманий при цьому безперервний регулятор потім апроксимується цифровим. Можливо кілька варіантів апроксимації. Найпростіший спосіб ґрунтується на поданні інтегрального закону регулювання за допомогою методу прямокутників. Очевидно, що такий підхід до синтезу цифрових пристроїв управління електроприводом не завжди дає змогу забезпечити максимально можливе використання властивостей силової частини та переваг мікропроцесорного керування, проте цей метод синтезу, завдяки своїй простоті та використанню добре відомих із теорії безперервних систем методів, знаходить досить широке застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оптимального налаштування регуляторів для електромеханічних об'єктів різноманітного типу залишаються відкритими, оскільки особливості механічного навантаження у багатьох випадках спричиняє складнощі, а інколи і неможливість застосування того чи іншого інженерного методу налаштування. Це зумовлює потребу у розробленні таких підходів, які б дали змогу без проблем налаштовувати регулятори навіть за нелінійних або погано фор-

малізованих математичних моделей об'єктів регулювання.

Проведений в роботі [2] аналіз тенденцій, пов'язаних з інноваціями у сфері розроблення автоматичних регуляторів та базується на кількісному аналізі отриманих за останні 15 років патентів у розвинутих країнах світу за класами міжнародної патентної кваліфікації G05B11/06 (до 40 патентів у рік), G05B11/36 (до 230 патентів на рік), демонструє стабільну світову тенденцію щодо збільшення кількості розробок, пов'язаних із пропорційно-інтегродиференціальними (ПІД)-регуляторами. На жаль, ця тенденція не стосується України. Лідером у цьому напрямку є Японія та Китай. Крім того, стабільну динаміку щодо кількості отриманих патентів зберігають США, Південна Корея та країни Західної Європи. Це показує велику зацікавленість науково-технічної спільноти у розробленні пристроїв автоматизації цього класу.

Відомо багато методів налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора, і ця кількість 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 сучасних програмованих засобів.

Так, в роботі [2] показана розробка методу оптимального налаштування пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора, який дає змогу врахувати вимоги щодо обмежень у процесі регулювання та забезпечити мінімізацію небажаних показників якості автоматичного регулювання. Розглянуто лише ПІ-регулятор, оскільки саме такий тип регулятора є найпоширенішим на практиці (застосування диференціальної складової передбачає застосування додаткових фільтрів). Сутність методу полягає у зведенні задачі оптимального налаштування регулятора до задачі безумовної оптимізації узагальненого оптимізаційного критерію, який характеризується бажаними топологічними властивостями. Результати застосування розробленого методу для задач налаштування ПІ-регуляторів, які працюють з об'єктами регулювання другого та третього порядків (зокрема із часовою затримкою), показали значне покращення якості регулювання за обраним критерієм (у межах цього дослідження таким критерієм була середньоінтегральна похибка).

В роботах [3], [4], [5] показано, що налаштування ПІД-регуляторів за різних критеріїв

оптимальності можна відносно просто провести шляхом компенсації нулями передаточної функції регуляторів полюсів електромеханічних об'єктів управління (аперіодичних об'єктів 1-го і 2-го порядків). Проведені в роботах дослідження показали, що при правильному проведенні розрахунків цифровий ПД-регулятор може конкурувати з аналогічними аналоговими ПД-регуляторами і може бути використаний для керування електромеханічними об'єктами з достатньо високими вимогами до динамічних процесів регулювання. Так, в роботі [5] ефективність запропонованого методу синтезу автоматичних систем з цифровим ПД-регулятором потребує вплив на чотири параметри настроювання. При цьому забезпечується найвища якість регулювання і гарантується допустимий рівень похибки.

Постановка завдання. Метою статті є розробка цифрового пропорційно-інтегрального регулятора як пристрою регулювання головного контуру системи управління електроприводом постійного струму з врахуванням внутрішніх контурів, вже налаштованих аналоговими регуляторами на певні критерії оптимізації. Причому, за мету не ставиться розробка нового методу налаштування регулятора електромеханічного об'єкту, а досліджується один з простих та ефективних існуючих методів налаштування з введенням додаткових елементів контуру регулювання та врахуванням особливостей об'єкту управління.

Виклад основного матеріалу. В роботі розглянутий синтез цифрового регулятора для випадку модернізації електроприводу з двигуном постійного струму серії ПБВ, а саме – синтезу головного контуру регулювання у складі програмованої системи управління з цифровим регулятором. Технічні 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; конструктивна стала ЕРС двигуна $c\Phi = 0,4298$ Вс/рад. ($k_d = 2,327$ рад/В.с).

Враховано, що контур струму якоря в існуючій системі управління реалізовано на базі аналогових елементів комплектного силового перетворювача і оптимізовано за модульним критерієм. На структурній схемі системи управління (рис. 1) оптимізований контур, згідно традиційної методики налаштування [6], 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 швидкодійність контуру регулювання. В контурі регулювання врахована ланка чистого запізнювання з сталою часу τ_M , що обумовлено особливостями механічної трансмісії навантаження та властивостями датчика швидкості.

Таким чином, об'єкт управління ідентифікуємо передавальною функцією

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

де K_M – пропорційна складова передаточної функції об'єкту управління, $K_M = k_C / (k_T J_\Sigma k_d)$;

T_M – стала часу об'єкту управління, в нашому випадку мала некомпенсована стала часу контуру регулювання швидкості.

Розрахункова схема контуру регулювання показана на рис. 2.

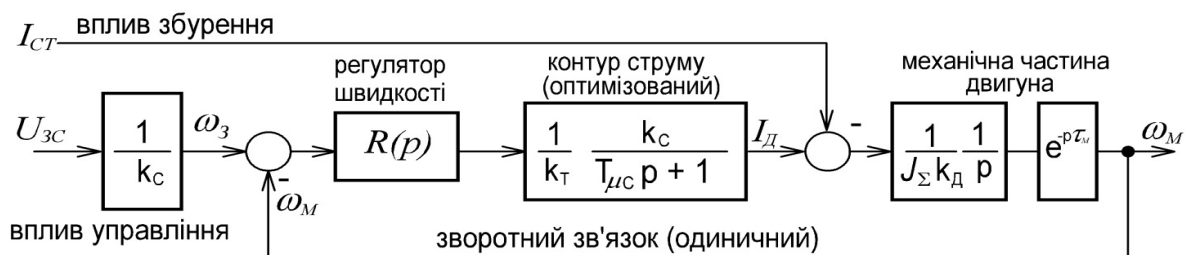


Рис. 1. Вихідна структурна схема контуру регулювання швидкості електромеханічної системи

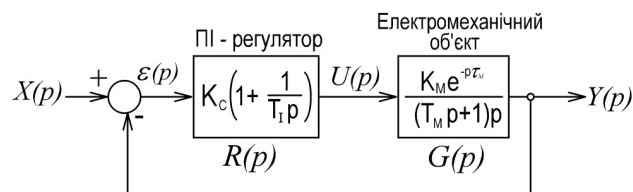


Рис. 2. Розрахункова структурна схема контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з ПІ-регулятором

В системі управління пропонується використання пропорційно-інтегрального регулятора (ПІ-регулятора, як різновиду ПД-регулятора), оскільки такий тип регулятора є найпоширенішим на практиці і простим в реалізації (застосування диференціальної складової вимагає додаткових елементів з метою можливості технічної реалізації регулятора). Крім того, згідно рекомендацій [6] при співвідношенні динамічних характеристик об'єкту $\tau_M / T_M < 0,5$ стандартний ПІ-регулятор в цілому здатний реалізувати більшість бажаних критеріїв налаштування.

Передавальна функція аналогового ПІ-регулятора згідно розрахункової структурної схеми:

$$R(p) = K_c \frac{T_i p + 1}{T_i p}. \quad (2)$$

В роботі [8] для подібного об'єкту управління другого порядку з ланкою чистого запізнювання типу FOLIPD запропоновано більш ніж 70 методів налаштування ПД-регуляторів за різними критеріями. З представлених для заданих умов розробки контуру регулювання обираємо метод з забезпеченням мінімального значення інтегралу абсолютної похибки (Minimum IAE) Shinskey (1994), згідно з яким розрахункові співвідношення параметрів регулятора наступні.

$$K_R = \frac{K_c}{T_i} = \frac{0,15027}{K_M T_M^2 (1+k)^2}, \quad T_i = 3,7 \cdot T_M (k+1), \quad (3)$$

де $k = \tau_M / T_M$ – коефіцієнт співвідношення динамічних параметрів об'єкту управління.

Для проведення подальшого комп'ютерного моделювання системи управління, в таблиці 1 представлені розраховані параметри регулятора за умови несталості часу запізнювання τ_M та змінювання приведенного до валу двигуна моменту інерції J_Σ в межах (0,02 ... 0,055) кг/м².

Інші параметри об'єкту управління вважаються незмінними та визначеними у відповідності з наданими параметрами електромеханічної системи та врахуванням особливостей виконавчого механізму: $k_c = 0,0478$; $k_T = 0,111$; $J_\Sigma = 0,02$ кг/м²; $K_M = 9,253$; $T_{\mu c} = T_M = 15$ мс. Розрахунки параметрів регулятора проводилися за рівняннями (3).

Результати моделювання – перехідні функції системи за умови різних значень часу запізнювання (на рисунку 3 показані три характеристики для $\tau_M = 1; 2; 5$ мс. у розрахованому діапазоні) демонструють задовільну якість основних параметрів та динамічних властивостей системи з налаштованим регулятором, проте істотним недоліком є значна величина перерегулювання (до 50%), що в більшості випадків є неприпустимим.

Покращення параметрів перехідної функції потребує проведення додаткових заходів, найпростіше з яких – введення додаткового локального зворотного зв'язку між регулятором та електро механічним об'єктом, як показано на рис. 4. При використанні в колі зворотного зв'язку пропорційної ланки $W_{01}(p) = f$ можливе значне зниження перерегулювання при незначному збільшенні часу регулювання, як це демонструють результати моделювання, показані на рис. 5.

Для можливості подальшого аналізу властивостей системи управління визначимо передавальну функцію замкненого контуру регулювання з розробленим ПІ-регулятором:

Таблиця 1

Розраховані параметри комп'ютерної моделі за умови несталості часу запізнювання та моменту інерції

Несталість $\tau_M, J_\Sigma = 0,02$ кг/м²			несталість $J_\Sigma, \tau_M = 5$ мс		
τ_M , м/с	K_c	T_i , с	J_Σ , кг/м²	K_M	T_i , с
5	3,00443	0,074	0,02	9,25000	3,00541
4	3,16256	0,0703	0,025	7,40000	3,75676
3	3,33826	0,0666	0,03	6,16667	4,50811
2	3,53462	0,0629	0,035	5,28571	5,25946
1	3,75554	0,0592	0,04	4,62500	6,01081
0,5	3,87669	0,05735	0,05	3,70000	7,51351
0,25	3,94024	0,05643	0,055	3,36364	8,26486

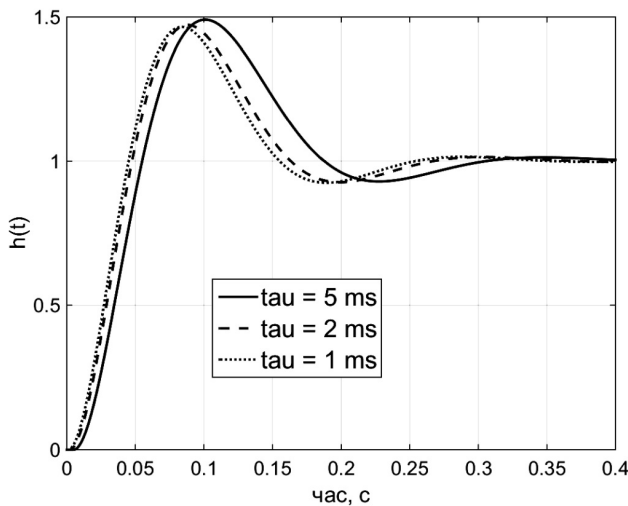


Рис. 3. Перехідні функції контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з аналоговим ПІ-регулятором

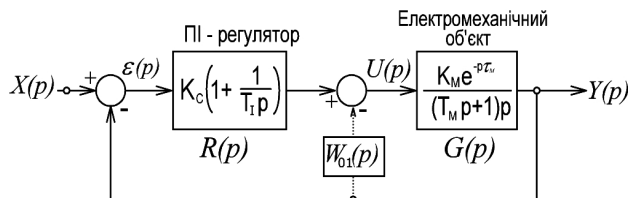


Рис. 4. Структурна схема контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з аналоговим ПІ-регулятором та локальним зворотним зв'язком

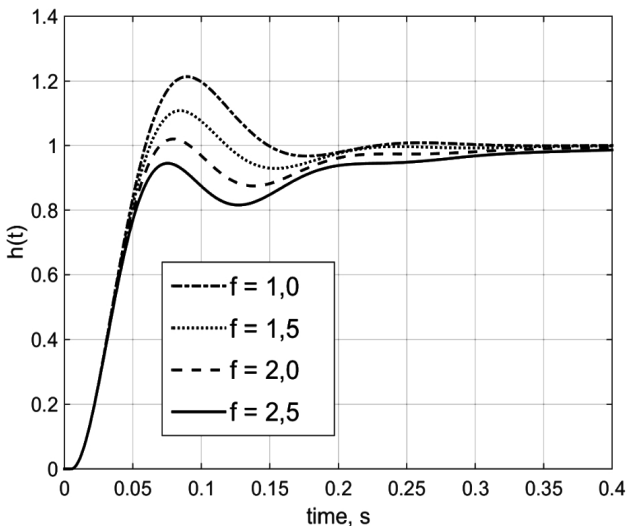


Рис. 5. Перехідні функції контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з аналоговим ПІ-регулятором та локальним зворотним зв'язком

$$\Phi(p) = \frac{R(p)G(p)}{1 + W_{01}(p)G(p) + R(p)G(p)}, \quad (4)$$

або після перетворень

$$\Phi(p) = \frac{K_M K_R (T_I p + 1) \exp(-p\tau_M)}{p^2 (T_M p + 1) + K_M \exp(-p\tau_M) (p K_R T_I + p f + K_R)}. \quad (5)$$

Для зручності розрахунків параметрів та характеристик можливо апроксимувати передавальну функцію ланки чистого запізнювання рядом Пада:

$$e^{-p\tau_M} = \frac{a_0 p^2 - a_1 p + 1}{a_0 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (6)$$

де $a_0 = \tau_M^2 / 12$, $a_1 = \tau_M / 2$.

Синтез цифрового регулятора контуру швидкості проводимо по методу перетворення безперервного регулятора – аналогу. Використовуємо метод трапецій (Tustin). Час квантування за часом T_0 обираємо меншим кратним часу ланки чистого запізнювання $\tau_M = 5$ мс. Для порівняння визначимо передаточну функцію цифрового регулятора для випадків $T_0 = 2,5$ мс; $T_0 = 1,0$ мс; $T_0 = 0,5$ мс. Отримані передаточні функції:

$$R(z)_{2,5} = \frac{3,055z - 2,954}{z - 1}.$$

$$R(z)_1 = \frac{3,025z - 2,984}{z - 1}.$$

$$R(z)_{0,5} = \frac{3,015z - 2,994}{z - 1}.$$

Подальше моделювання системи управління за визначеними параметрами цифрового регулятора (рис. 6) показують цілком задовільну відповідність цифрового регулятора аналоговому прототипу навіть при часі квантування $T_0 = 2,5$ мс. При цьому коефіцієнт локального зворотного зв'язку прийнятий $f = 1,2$.

Перерегулювання вихідної величини не перевищує 20%, час встановлення – не перевищує 250 мс. Обраний метод налаштування ПІ-регулятора придатний для швидкого синтезу цифрових регуляторів для розглянутого типу об'єкту управління.

Далі розглянутий вплив на динаміку системи управління з цифровим регулятором зміни часу запізнювання τ_M та змінювання приведенного до валу двигуна моменту інерції J_Σ без переналаштування параметрів регулятора. Регулятор налаштований на базові параметри механічного навантаження – $\tau_M = 5$ мс, $J_\Sigma = 0,02$ кг·м². На рис. 7 представлені перехідні характеристики у випадку зміни часу запізнювання τ_M від 1 мс до 7 мс; на рисунку 8 – аналогічні характеристики при варіюванні приведенного моменту інерції в межах 0,02–0,035 кг·м².

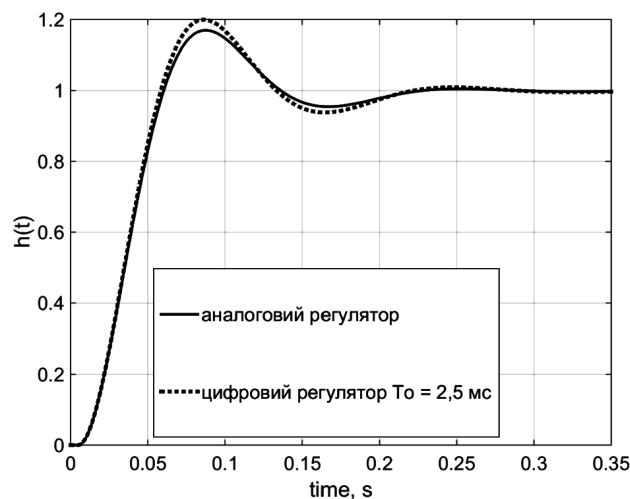


Рис. 6. Перехідні функції контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з цифровими та аналоговим регуляторами

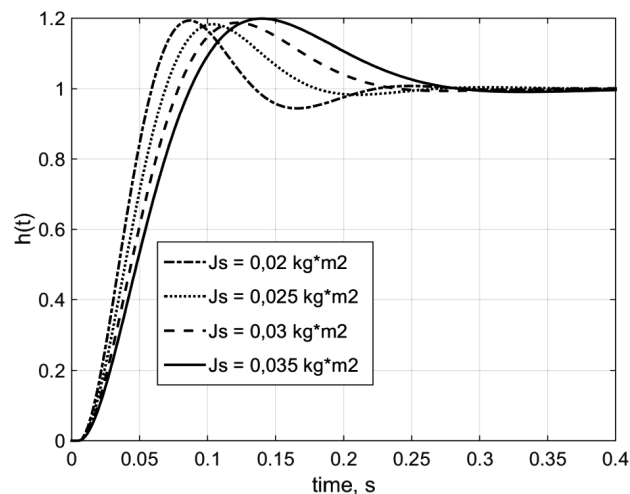


Рис. 8. Перехідні функції контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з цифровим регулятором при несталому моменті інерції

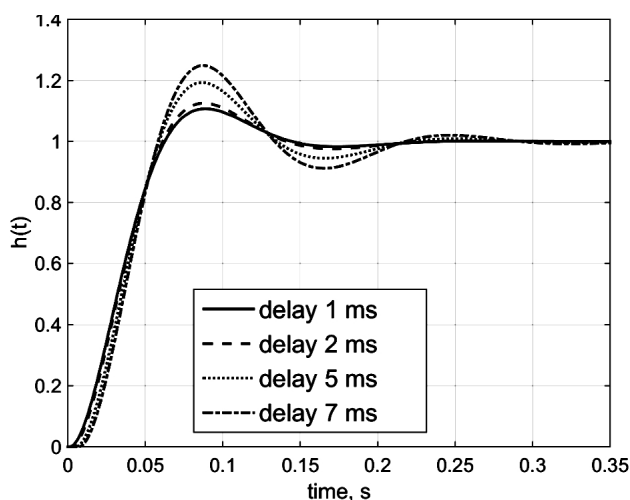


Рис. 7. Перехідні функції контуру регулювання швидкості електромеханічної системи з цифровим регулятором при несталому часі запізнювання

Варіювання часу запізнювання передбачуване пропорційно впливає на величину перерегулювання, та в межах реальної нестабільності часу запізнювання перерегулювання знаходиться в межах (15–22)%. При зростанні моменту інерції зростає час першого узгодження, але перере-

гулювання та час регулювання залишається практично незмінними. Тобто, розроблений регулятор має низьку чутливість до нестабільності параметрів об'єкту регулювання.

Висновки. В роботі були розглянуті методи розрахунку ПІ-регулятора для роботи в зовнішньому контурі регулювання швидкості електромеханічної системи 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.

Для вибраного методу Minimum IAE Shinskey (1994) з додатковим введенням локального зворотного зв'язку була визначена передаточна функція замкненого контуру регулювання, 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.

Список літератури:

1. Benjamin C. Kuo. Digital Control Systems (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering). Oxford University Press; 2nd edition (June 1, 1995). 784 p.
2. Ромасевич Ю.О., Ловейкін В.С., Ляшко А.П., Макарець В.В. Розроблення методу оптимального налаштування ПІ-регуляторів. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2019. Вип. 53. С. 56–65.
3. Лісовець С.М. Використання цифрового ПІД-регулятора в контурі керування електромеханічним приводом промислового робота. Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34 (73) № 5 С. 161–165.

4. Ковела І.М., Іванюк О.О. Інженерна методика синтезу автоматичних систем з ПД-регуляторами. Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Вимірювальна техніка та метрологія». 2008. № 69. С. 43–51.
5. Ковела І.М., Наконечний А.О. Синтез автоматичних систем на основі цифрового ПД-регулятора з чотирма параметрами настроювання. Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». 2011. № 719. С. 27–36.
6. Бурик М.П. Електромеханічні системи підпорядкованої структури з властивостями слабкої чутливості до параметричних та координатних збурень: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 268 с.
7. Лорія М.Г., Поркуян О.В., Ананьєв М.В., Целішев О.Б. Оптимальні настроювання регуляторів промислових систем управління технологічними об'єктами: монографія. Сєверодонецьк: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2019. 192 с.
8. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3-nd Edition) / Aidan O'Dwyer/ – Ireland: Imperial College Press, 2009. 623 p.
9. Solving control engineering problems with MATLAB (MATLAB curriculum series) / K. Ogata. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2014.5 27 p.

Semenets D.A., Vasylychuk D.P., Arestova T.V. DIGITAL PROPORTIONAL-INTEGRAL CONTROLLER FOR A SECOND-ORDER ELECTROMECHANICAL OBJECT WITH A DELAY

The article deals with the peculiarities of synthesizing a digital proportional-integral controller for operation in the main speed control loop of an electromechanical system. The conditions for modernizing an existing control system with internal control loops optimized according to certain known criteria are taken into account. The possibility of non-stationarity of the mechanical load of the electric drive, namely, the instability of the moment of inertia and the time of the transport delay link, was taken into account. For the actual tuning parameters of the electric drive with a DC motor of the PBV series and a mechanical load identified by the model of a second-order control object of the type with an integral component and time delay (FOLIPD), an analog proportional-integral controller was synthesized according to the criterion of minimum integral absolute error (minimum IAE, Shinsky 1994) with additional local feedback. The parameters of the digital controller were calculated using the analog prototype. The modified design relations for determining the parameters of the proportional-integral controller were obtained, and the dependencies of the control quality indicators on the parameters of the control object were investigated.

The practical value of the proposed methodology is confirmed by the results of computer modeling using the MATLAB Simulink software product. The obtained results showed that the quality of control in the system with a digital controller is comparable to the system with an analog prototype.

The considered method for calculating the parameters of the external speed control loop of an electromechanical system is characterized by simplicity, the ability to quickly adjust to changes in the parameters of the control object, and the low sensitivity of the digital controller to deviations in the parameters of the control object. The results of the study can be useful for the synthesis of digital controllers by continuous analog for electric drives with various mechanical loads.

Key words: *automated electric drive, non-stationarity of the control object, control loop, proportional-integral controller, digital controller, control quality.*