

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 62-52

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.0.7

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ РОБОТА З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Біньковська А. Б., Стипанович М. О., Кузьминих В. В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто системи керування роботами та пристрої керування маніпуляторами роботів. Особливу увагу приділено електричному приводу, для якого засобами програмного пакету Matlab + SIMULINK було виконано синтез регулятора.

Ключові слова: робот-маніпулятор, двигун, моделювання, сервопривод, регулювання швидкості.

Вступ

Робототехніка та гнучкі виробничі системи є найважливішою технічною основою інтенсифікації виробництва. Це, з одного боку, дитя науково-технічного прогресу, з іншого – його рушійна сила в розвитку сучасного промислового виробництва. З кожним роком дедалі більше розширюється застосування робототехнічних систем. З їх допомогою освоюються нові технологічні процеси, що звільняють людей від багатьох видів стомливої, одноманітної, часом важкої ручної праці, зокрема й у шкідливих для здоров'я умовах. Робототехнічні системи можуть виконувати за людину нецікаві для неї рутинні види розумової діяльності.

Робототехнічні системи є одним із нових видів виробничої техніки. Їх застосування вимагає нової організації технологічного процесу і, отже, видів нової спеціальної підготовки інженерів у цій галузі. Тільки за таких умов промислові роботи та роботизація виробництва можуть мати найбільший економічний ефект.

Однак, хоча техніка й ускладнюється з більшою швидкістю, проте принципи, що лежать в основі інтенсивного розвитку, змінюються порівняно повільно.

Моделювання системи регулювання електропривода маніпулятора дозволяє отримувати більш якісні показники його позиціонування.

Позиціонування електропривода та промислових роботів-маніпуляторів досліджує значна кількість авторів.

Аналіз публікацій

У роботі [2] застосовано алгоритм оптимізації рою часток для оптимального налаштування параметрів пропорційно-диференційного регулятора для двигуна постійного струму з метою підвищення швидкості його позиціонування.

У праці [3] досліджено кінематику промислового робота-маніпулятора. Під час програмної реалізації розв'язано пряму та обернену задачі кінематики, звернено увагу на робочу зону робота та появу можливих помилок.

У статті [4] синтезовано робастний регулятор двигуна постійного струму, до того ж розглянуто процеси, що відбуваються під час формування мікроконтролером ШІМ-сигналу та у Н-мості. Проведено порівняльне оцінювання робастних властивостей отриманої системи керування із системою з класичним регулятором.

Мета та постановка завдання

На підставі аналізу наявних рішень виявлено, що в роботах не було розглянуто моделювання сервоприводів маніпуляторів-роботів.

Отже, виникає необхідність у розробленні цифрової системи регулювання кутового положення маніпулятора.

Мета роботи – за допомогою розроблення цифрової системи регулювання кутового положення маніпулятора поліпшити показники якості його позиціонування.

Завдання статті:

- вивчити системи керування роботами;
- дослідити приводи роботів;

- отримати математичну модель електро-двигуна;
- розробити машинну схему цифрового електропривода;
- синтезувати триконтурну систему керування позиціонуванням робота.

Для виконання завдань дослідження впроваджено методи аналізу та синтезу систем автоматичного керування.

Основна частина

Функціональна схема керування електро-механічним роботом зображена на рис. 1 [5].

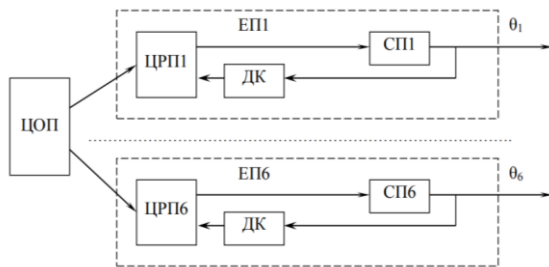


Рис. 1. Функціональна схема керування електромеханічним роботом

Усі шість електроприводів (ЕП1–ЕП6) керуються від загального центрального обчислювального пристрою (ЦОП), який виконує траскторні завдання руху робота й видає сигнали, що управляють, на цифрові регулятори положення (ЦРП1–ЦРП6) окремих приводів. Цифрові регулятори положення управляють сервоприводами (СП1–СП6) відповідно до сигналів від ЦОП і датчиків ДК.

Особливості електроприводів роботів:

- широкий діапазон регулювання за швидкістю та позиціонуванням, високі вимоги до динаміки руху й точності стеження;
- робота в широкому діапазоні зміни моментів навантаження;
- тривала робота двигунів у загальмованому режимі [6].

Вказана особливість належить як до комплексу електроприводів роботів, так і до окремих електроприводів, схеми яких, власне, розрізняються лише потужностями виконавських елементів, що управляють. В іншому вони побудовані за загальною схемою (рис. 2) [7].

Наведена функціональна схема електропривода є аналого-цифровою системою автоматичного керування. У ній поєднуються переваги комбінованої аналогової системи, що працює за принципом триконтурної системи підпорядкованого регулювання з пере-

вагами цифрової системи (висока точність цифрових датчиків, зручність програмування роботи тощо).

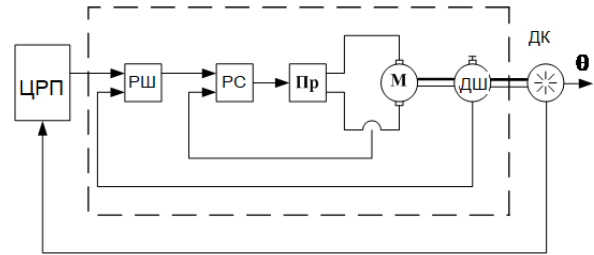


Рис. 2. Функціональна схема електропривода робота

Перший контур утворений двигуном (М) з перетворювачем (Пр) і регулятором струму (РС). Другий контур містить, крім того, датчик швидкості (ДШ) і регулятор швидкості (РШ). Третій контур додатково містить датчик кута (ДК) і цифровий регулятор положення (ЦРП).

Як регулятори струму та швидкості найчастіше використовуються аналогові пристрої, за допомогою яких легко реалізується необхідний закон керування. Датчик швидкості може бути як аналоговим, так і цифровим. У низці випадків застосування датчика швидкості взагалі не доцільне, оскільки сигнал про зміну швидкості може бути обчислений у цифровому регуляторі положення способом диференціювання сигналу з датчика кута.

Отже, аналіз функціональних схем (рис. 1 і 2), показує, що незалежно від конкретної схеми електропривод промислового робота містить такі елементи:

- виконавчий елемент (двигун);
- перетворювач;
- датчики зворотних зв'язків за струмом, швидкістю та кутом;
- регулятори струму, швидкості й кута (положення).

Сучасні тенденції у виробництві електроприводів вказують на те, що основна увага приділяється виробництву сервоприводів, які інтегрують у собі двигун, перетворювач, датчики й регулятори швидкості та струму.

Загалом система управління електроприводом робота містить три контури регулювання (рис. 2) струму, швидкості й положення (кута повороту θ). Кожен із контурів є системою автоматичного управління. Існують різні варіанти побудови цих систем, тобто різні контури можуть бути як аналоговими,

так і цифровими. У розглянутому варіанті функціональної схеми привода (рис. 2) системи регулювання струму та швидкості – аналогові, а система регулювання кута – цифрова.

Розглянемо двоконтурну схему регулювання сервоприводу на прикладі системи регулювання струму та швидкості двигуна постійного струму. Структурна схема такої системи зображена на рис. 3.

Зазначена схема відповідає лінеаризованій моделі системи, у якій нелінійності типу «зона нечутливості» двигуна, «насичення» перетворювача та підсилювачів і «люфт» механічних передач не беруться до уваги.

Для отримання динамічних характеристик необхідно скористатися рівняннями електричної та механічної рівноваги двигуна. Рівняння електричної рівноваги для якійного ланцюга складається на підставі закону Кірхгофа:

$$U_y = iR + L \frac{di}{dt} + e_p, \quad (1)$$

де i – струм у ланцюзі якоря; R – сумарний активний опір якійного ланцюга; L – сумарна індуктивність якійного ланцюга; e_p – е.р.с., що наводиться в обмотці якоря магнітним потоком обмотки збурення Фв, дорівнює

$$e_p = c_e \omega_\partial, \quad (2)$$

де c_e – електрична постійна двигуна, що визначається конструктивними параметрами й величиною потоку Фв; ω_∂ – кутова швидкість якоря двигуна.

Рівняння механічної рівноваги двигуна можна записати на підставі закону збереження моментів:

$$M_\partial = M_o + M_i, \quad (3)$$

де M_∂ – момент на валу двигуна:

$$M_\partial = c_m i; \quad (4)$$

c_m – механічна постійна двигуна, що визначається конструкцією двигуна та значенням потоку збурення Фв; M_o – момент опору; M_i – динамічний момент якоря двигуна, рівний творенню моменту інерції якоря J на його кутове прискорення:

$$M_i = J \frac{d\omega_\partial(t)}{dt}. \quad (5)$$

Оскільки момент опору M_o за відсутності навантаження на валу якоря дорівнює моменту тертя в осях, то його значенням можна нехтувати. Тоді (3) запишеться як

$$c_m i(t) = J \frac{d\omega_\partial(t)}{dt}. \quad (6)$$

Звідси

$$i(t) = \frac{J}{c_m} \frac{d\omega_\partial(t)}{dt}. \quad (7)$$

Продиференціюємо рівняння (7):

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{J}{c_m} \frac{d^2\omega_\partial(t)}{dt^2}. \quad (8)$$

Підставивши залежності (7) і (8) в (1) і додавши позначки

$$T_m = \frac{RJ}{c_m c_e}, \quad T_e = \frac{L}{R}, \quad k = \frac{1}{c_e}, \quad (2.9)$$

матимемо

$$T_m T_e \frac{d^2\omega_\partial(t)}{dt^2} + T_m \frac{d\omega_\partial(t)}{dt} + \omega_\partial(t) = k U_y(t). \quad (10)$$

Застосовуючи метод перетворення Лапласа, отримаємо передатну функцію двигуна:

$$W_{\partial e}(s) = \frac{\omega_\partial(s)}{U_y(s)} = \frac{k}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1}. \quad (11)$$

Оскільки електрична постійна часу T_e на порядок менша за електромеханічну постійну T_m , то корені характеристичного рівняння рівні $p_1 = -\frac{1}{T_e}$, $p_2 = -\frac{1}{T_m}$, а передатна функція набуває вигляду

$$W_{\partial e}(s) = \frac{\omega_\partial(s)}{U_y(s)} = \frac{k}{(T_m s + 1) \cdot (T_e s + 1)}. \quad (12)$$

Часто постійною часу T_e нехтують, зважаючи на її мале значення, та вважають двигун щодо кутової швидкості аперіодичною ланкою з передатною функцією:

$$W_{\partial e}(s) = \frac{\omega_\partial(s)}{U_y(s)} = \frac{k}{T_m s + 1}, \quad (13)$$

а щодо кута повороту вала $\theta(t) = \int_0^t \omega_\theta(t) dt$
 передатна функція визначається за формулою

$$W_\theta(s) = \frac{\theta(s)}{U_y(s)} = \frac{k}{s(T_M s + 1)}, \quad (14)$$

що відповідає послідовному з'єднанню інтегруючої та аперіодичної ланок.

Як датчики швидкості в електроприводі робота найчастіше застосовують тахогенератори.

У динаміці тахогенератор описується передатною функцією аперіодичної ланки:

$$W_{TG} = \frac{U_{вих}(s)}{\omega_{TG}(s)} = \frac{k_{TG}}{(1 - sT_{TG})}, \quad (15)$$

де k_{TG} – передатний коефіцієнт ТГ; T_{TG} – постійна часу тахогенератора.

Характеристики регуляторів швидкості та струму будуть обрані з огляду на такі вимоги:

- точність у режимі, що встановився;
- якості перехідного процесу.

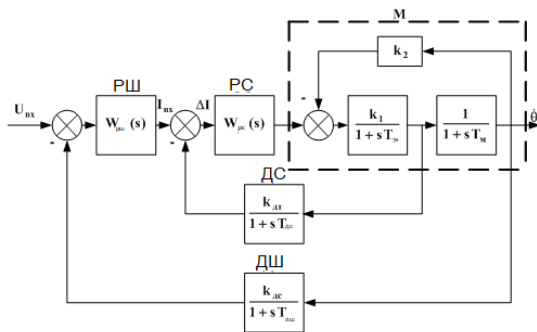


Рис. 3. Структурна схема двоконтурної системи регулювання сервоприводу: РШ – регулятор швидкості; РС – регулятор струму; М – електродвигун; ДС – датчик струму; ДШ – датчик швидкості

Структурна схема двигуна постійного струму (рис. 3), власне, відповідає передатній функції другого порядку. Проте в схемі для зручності вона подана у вигляді двох блоків, що описують електричні (з постійною часу T_e) і електромеханічні (з постійною часу T_m) властивості двигуна та блоку зворотного зв'язку з коефіцієнтом посилення k_2 , що бере до уваги вплив зміни моменту навантаження на валу двигуна на зміну струму якоря.

Постійна часу T_m бере до уваги також інерційні властивості об'єкта (маніпулятора).

Структурну схему, зображену на рис. 3, можна перетворити на простіший вигляд (рис. 4).

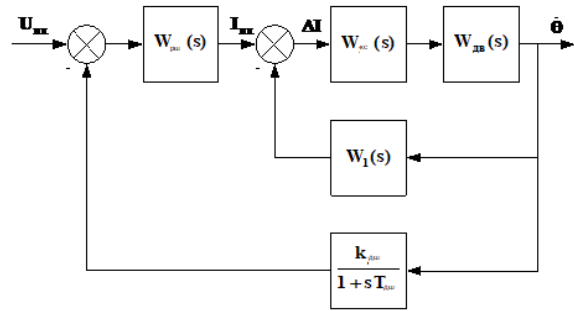


Рис. 4. Структурна схема контура регулювання швидкості

На рис. 4 запропоновано такі позначки:

- $W_{дв}(s)$ – передатна функція двигуна, отримана на основі структурного перетворення схеми:

$$W_{дв}(s) = \frac{1}{k_1 k_2} \frac{1}{s^2 T_e T_m + s T_m + 1}; \quad (16)$$

- $W_{кc}(s)$ – передатна функція контура регулювання струму, вигляд якої залежить від типу регулятора;

- $W_1(s)$ – передатна функція ланцюга зворотного зв'язку контура регулювання струму:

$$W_1(s) = \frac{k_{дс} k_1 k_2}{(1 + sT_{дс}) * (1 + sT_e)}. \quad (17)$$

Моделювання сервопривода

Для моделювання двоконтурної системи регулювання сервопривода скористаємося пакетом *MATLAB + Simulink*. На підставі структурної схеми двоконтурної системи (рис. 4) і структури ПІД-регуляторів у контурах регулювання струму та швидкості двигуна складаємо машинну схему моделювання (рис. 5).

Моделювання проводилося в декілька етапів. На першому підбиралися коефіцієнти k_p , k_d , k_i для регулятора струму, використовувалася машинна схема, зображена на рис. 6.

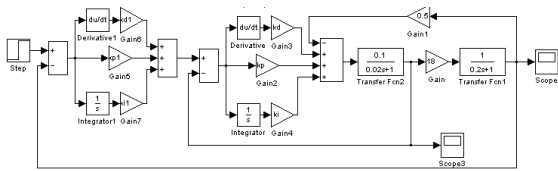


Рис. 5. Машинна схема моделювання двоконтурної системи регулювання сервопривода

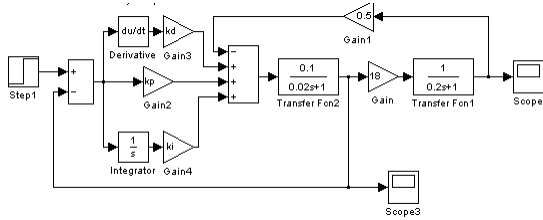


Рис. 6. Машинна схема моделювання контура струму

Коефіцієнти регулятора підбиралися по черзі. Спочатку був підібраний коефіцієнт k_p , потім k_d , і останнім був визначений коефіцієнт k_i . Якість роботи контура регулювання струму оцінювалася за графіками перехідних процесів.

Унаслідок моделювання контура струму отримано такі результати:

- за умови коефіцієнта $k_p=10,866$ перехідних процесів за струмом та швидкістю обертання двигуна аперіодичні з тривалістю $t_{nn \text{ струм}}=0,6$ с і $t_{nn \text{ шв}}=0,9$ с, перерегулювання за струмом становить 25 % (рис. 7 і 8);

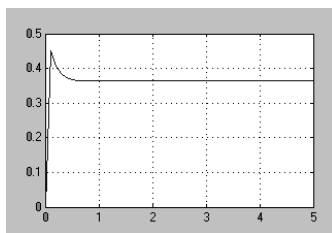


Рис. 7. Графік перехідного процесу струму для ПІ-регулятора (контур струму)

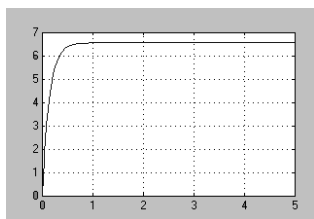


Рис. 8. Графік перехідного процесу швидкості обертання двигуна для ПІ-регулятора (контур струму)

- диференційний складник k_d (ПД-регулятор) позитивно не впливає на якість роботи регулятора струму;

- додавання інтегрального складника $k_i=250$ (ПІ-регулятор) приборало перерегулювання, збільшило швидкість обертання двигуна й тривалість перехідних процесів ($t_{nn \text{ струм}}=0,9$ с і $t_{nn \text{ шв}}=1,7$ с), статична помилка регулятора струму становила 0,64 % (рис. 9, 10).

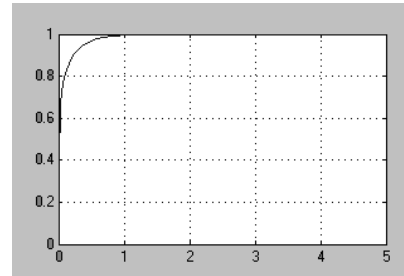


Рис. 9. Графік перехідного процесу струму для ПІ-регулятора (контур струму)

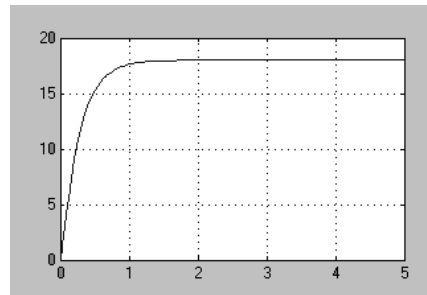


Рис. 10. Графік перехідного процесу швидкості обертання двигуна для ПІ-регулятора (контур струму)

На наступному етапі проводилося моделювання регулятора (визначення коефіцієнтів k_{p1} , k_{d1} і k_{i1}) у контурі керування швидкістю обертання двигуна, для чого використовувалася машинна схема (рис. 5).

У схемі були встановлені значення коефіцієнтів $k_p=10,866$, $k_d=0$ і $k_i=250$, отримані на попередньому етапі для контура регулювання струму. Графіки перехідних процесів за швидкістю обертання двигуна зображені на рис. 11 і 12.

У цьому разі маємо такі результати:

- за умови $k_{p1} = 1,2$ тривалість перехідного процесу $t_{nn \text{ шв}}=0,16$ с, але з'явилося перерегулювання $\sigma=10$ %, і статична помилка регулювання швидкості становила 4,44 % (рис. 11);

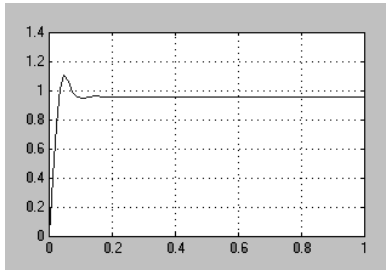


Рис. 11. Графік перехідного процесу швидкості обертання двигуна для П-регулятора (контур швидкості)

- додавання диференційного складника $k_{dI}=0,1$ прибрало перерегулювання, але збільшило тривалість перехідного процесу за швидкістю $t_{nn \text{ шв}}=0,5$ с і не зменшило статичної помилки (рис. 12);

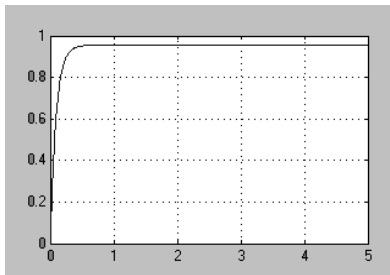


Рис. 12. Графік перехідного процесу швидкості обертання двигуна для ПД-регулятора (контур швидкості)

- додавання інтегрального складника $k_{iI}=0,5$ у закон регулювання збільшило тривалість перехідного процесу до 0,6 с і підвищило точність регулювання швидкості до 0,1 % (рис. 13).

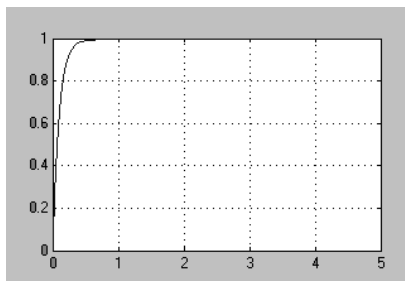


Рис. 13. Графік перехідного процесу швидкості обертання двигуна для ПІД-регулятора (контур швидкості)

Отже, результати моделювання двоконтурної системи керування сервопривода показали, що динамічні характеристики електропривода за струмом і швидкістю обертання відповідають заданим вимогам, забезпечують

ПІ-регулятор у контурі керування струмом і ПІД-регулятор у контурі керування швидкістю обертання.

Цифрова система регулювання положення

Оскільки внаслідок досліджень параметри регуляторів швидкості та струму обрані, вважатимемо, що передатна функція двоконтурної системи регулювання швидкості $W_{\Delta\theta_3}(s)$ відома. Розглянемо функціональну схему третього контура – цифрової системи регулювання кута (рис. 14).

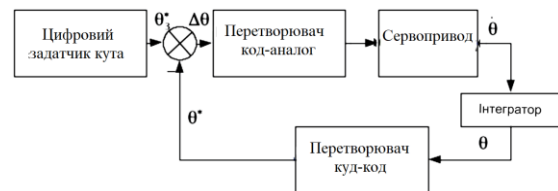


Рис. 14. Функціональна схема цифрового привода

Для перетворення безперервного сигналу в дискретний у цифровій системі здійснюється квантування сигналу за рівнем і часом. Цифровий сигнал помилки $\Delta\theta$, рівний різниці цифрових значень заданого θ_3^* і контрольованого θ^* кутів, надходить на перетворювач код-аналог.

На підставі машинної схеми для безперервних контурів регулювання сервопривода (рис. 5) і функціональної схеми цифрового привода (рис. 14) складаємо повну машинну схему електропривода (рис. 15).

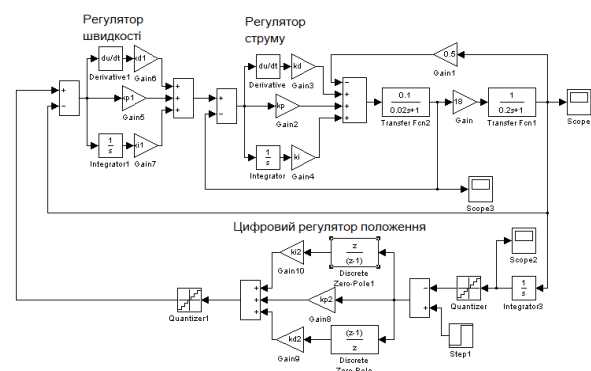


Рис. 15. Повна машинна схема електропривода

У процесі моделювання цифрової системи регулювання кутового положення маніпулятора використовувалися результати моделювання сервопривода. Для цього в схемі, зображеній на рис. 15, додані такі значення

коефіцієнтів: $k_p=10,866$; $k_d=0$; $k_i=250$; $k_{p1}=1,2$; $k_{d1}=0,1$; $k_{i1}=0,5$. Під час моделювання цифрової системи необхідно було підібрати значення коефіцієнтів регулятора k_{p2} , k_{d2} , k_{i2} і оцінити якість регулювання за перехідними процесами.

Моделювання проводилося як послідовне дослідження привода за умови різних регуляторів: пропорційного (П), пропорційно-диференційного (ПД), пропорційно-інтегрального (ПІ) і пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД).

Результати дослідження такі:

- у разі пропорційного цифрового регулятора з коефіцієнтом передачі $k_{p2}=1,1$ графік перехідного процесу кутового положення маніпулятора аперіодичний (без перерегулювання), статична точність 0,45 %, тривалість перехідного процесу 10 с (рис. 16);

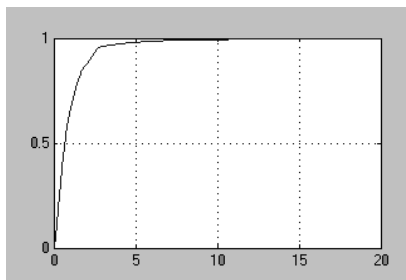


Рис. 16. Графік перехідного процесу кутового положення (П-регулятор)

- за умови постійного положення маніпулятора робота (режим, що встановився) струм і швидкість обертання електродвигуна встановлюються в нульове значення, проте спостерігається незначне коливання в межах $\pm 0,15$ % (рис. 17 і 18);

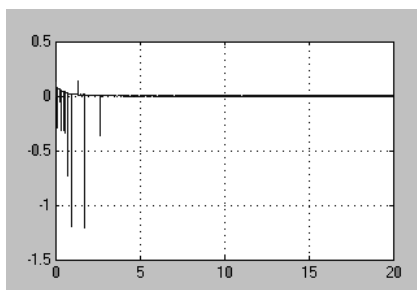


Рис. 17. Графік перехідного процесу струму (П-регулятор)

- додавання диференційного та інтегрального складників у закон регулювання не поліпшило динамічних властивостей позиціонування маніпулятора робота.

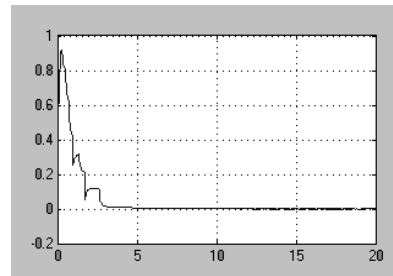


Рис. 18. Графік перехідного процесу швидкості обертання двигуна (П-регулятор)

Отже, дослідження показало, що для цифрового привода кутового положення маніпулятора робота найбільш відповідним є пропорційний (П) регулятор.

Висновки

У статті розроблено триконтурну систему керування електроприводом робота з двигуном постійного струму.

У процесі дослідження розв'язано такі питання:

- проаналізовано системи керування та приводи роботів;
- сформовано математичну модель електродвигуна;
- побудовано структурну схему ЕП у програмному пакеті *MATLAB + Simulink*;
- синтезовано систему керування маніпулятором робота.

Досягнуто таких результатів:

- найкращим законом керування для контура струму є пропорційно-інтегральний (ПІ) закон;
- найкращим законом керування для контура швидкості є пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) закон;
- найкращим законом керування для цифрового контура керування позиціонуванням є пропорційний (П) закон.

Отже, внаслідок моделювання цифрового електропривода з трьома контурами регулювання за струмом, швидкістю та позиціонуванням був забезпечений аперіодичний перехідний процес із показниками якості, що повністю відповідають заданим вимогам.

Література

1. Що таке робот. URL: <https://obrobka.pp.ua/3151-scho-take-robot.html> (дата звернення 18.04.2024).
2. Gurko A., Petrenko Yu. PSO-Based Controller Tuning for a Laser Technical Vision System // Proceeding of 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv,

- Ukraine, October 03–07, 2022. P. 400–404. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916393>.
3. Колесник К. Імітаційне моделювання руху маніпулятора промислового робота за допомогою прикладної програми MATLAB. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/53fcfae3-e19b-4b8b-941c-263c21a6c41d/content> (дата звернення 18.04.2024).
 4. Gurko A.G., Sergiyenko O.Yu., Lindner L. Robust Laser Positioning in a Mobile Robot Machine Vision System // Vehicle and electronics. Innovative technologies, N. 20, 2021. P. 27–36. DOI: 10.30977/VEIT.2021.XX.0.03.
 5. Конспект лекцій з курсу «Автоматизація виробничих процесів» для студентів спеціальності 181 «Харчові технології» / В.Б. Савкін, Р.І. Михайлишин, І.Р. Козбур. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – 89 с.
 6. Сучасні електромехатронні комплекси і системи: підручник / Т.П. Павленко, В.М. Шавкун, О.С. Козлова; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 265 с.
 7. Основи автоматики та робототехніки: навчальний посібник / А.М. Гуржій, А.Т. Нельга, В.М. Співак, О.С. Ітякін. – Дніпро: Гарант СВ, 2021. – 243 с.
 8. Reduction of Angular Position Error of a Machine Vision System Using the Digital Controller LM629 / M. Reyes-Garcia, L. Lindner, M. Rivas-López, A. Gurko et al // Proceeding of 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2018). Washington D.C., USA, 21–23 October. P. 3200–3205.
 9. Kozlov L. Digital PD controller for dynamic correction of the differential component coefficient for a mechatronic hydraulic system. Tehnomus journal: Proceedings of the XVIIth International Conference “New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies”. – Suceava, Romania, May 17–18, 2013. – P. 120–125.
 10. Класифікація електроприводів. URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/768-klassifikacija-jelektroprivodov.html> (дата звернення 20.04.2024).
 11. Регулювання швидкості. URL: <https://studfile.net/preview/5830923/page:16/> (дата звернення 20.04.2024).
 12. Схеми замкнутих структур електроприводу. URL: <https://studfile.net/preview/7598166/page:9/> (дата звернення 20.04.2024).
 13. Стійкість лінійних систем. URL: <https://studfile.net/preview/733728/page:6/> (дата звернення 20.04.2024).
 14. Гурко О.Г., Єрьоменко І.Ф. Аналіз і синтез систем автоматичного керування в MATLAB: навчальний посібник. – Харків: ХНАДУ, 2012. – 300 с.
- ### References
1. Shcho take robot. URL: <https://obrobka.pp.ua/3151-scho-take-robot.html> (accessed: 18.04.2023).
 2. Gurko A., Petrenko Yu. PSO-Based Controller Tuning for a Laser Technical Vision System // Proceeding of 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv, Ukraine, October 03–07, 2022. P. 400–404. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916393>.
 3. Kolesnyk K. Imitatsiine modeliuвання rukhu manipulatora promyslovoho robota za dopomohoiu prykladnoi prohramy MATLAB. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/53fcfae3-e19b-4b8b-941c-263c21a6c41d/content> (accessed: 18.04.2024).
 4. Gurko A.G., Sergiyenko O.Yu., Lindner L. Robust Laser Positioning in a Mobile Robot Machine Vision System // Vehicle and electronics. Innovative technologies, N. 20, 2021. P. 27–36. DOI: 10.30977/VEIT.2021.XX.0.03.
 5. Konspekt leksii z kursu «Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv» dlia studentiv spetsialnosti 181 «Kharchovi tekhnolohii» / V.B. Savkin, R.I. Mykhailyshyn, I.R. Kozbur. – Ternopil: TNTU, 2018. – 89 p.
 6. Suchasni elektromekhatronni komplekxy i systemy: pidruchnyk / T.P. Pavlenko, V.M. Shavkun, O.S. Kozlova; Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova. – Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova, 2021. – 265 p.
 7. Osnovy avtomatyky ta robototekhniky: Navchalnyi posibnyk / A.M. Hurzhii, A.T. Nelha, V.M. Spivak, O.S. Itiakyn. – Dnipro: Harant SV, 2021. – 243 p.
 8. Reduction of Angular Position Error of a Machine Vision System Using the Digital Controller LM629 / M. Reyes-Garcia, L. Lindner, M. Rivas-López, A. Gurko et al // Proceeding of 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2018). Washington D.C., USA, 21–23 October. pp. 3200–3205.
 9. Kozlov L. Digital PD controller for dynamic correction of the differential component coefficient for a mechatronic hydraulic system. Tehnomus journal: Proceedings of the XVIIth International Conference “New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies”. – Suceava, Romania, May 17–18, 2013. – P. 120–125.
 10. Klasyfikatsiia elektroprivodiv. URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/768-klassifikacija-jelektroprivodov.html> (accessed: 20.04.2024).
 11. Rehuliuвання shvydkosti. URL: <https://studfile.net/preview/5830923/page:16/> (accessed: 20.04.2024).
 12. Skhemy zamknytykh struktur elektroprivodu. URL: <https://studfile.net/preview/7598166/page:9/> (accessed: 20.04.2024).

13. Stiikist liniinykh system. URL: <https://studfile.net/preview/733728/page:6/> (accessed: 20.04.2024).
14. Hurko O.H., Yeromenko I.F. Analiz i syntez system avtomatichnoho keruvannia v MATLAB: Navchalnyi posibnyk. – Kharkiv: KhNADU, 2012. – 300 p.

Біньковська Анжела Борисівна, к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, тел. +38(050)301-87-46, binkovska@khadi.kharkov.ua, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Стипанович Микола Олегович, студент групи МА-21мб-22 механічного факультету, тел. +38(096)5126537, akit.khnadu@gmail.com, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Кузьминих Василь Вячеславович, студент групи МА-21мб-22 механічного факультету, тел. +38(096)7846803, akit.khnadu@gmail.com, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Control system of the electric drive of a robot with a DC motor

Abstract. Problem. Robotics and flexible production systems are the most important technical basis for the intensification of production. The use of robotic systems is expanding every year. This paper considers a two-circuit servo control system using the example of a DC motor current and speed control system and examines the functional diagram of the third circuit, a digital angle control system. Using the Matlab + SIMULINK software package, the servo drive and the digital system for controlling the angular position of the robot manipulator were modelled. **Goal.** As a result of the analysis, the purpose of the study was highlighted: the development of a digital system for adjusting the angular position of the manipulator, improve the quality of its positioning. **Tasks:** to study work management systems; to study the drives of robots; to get a mathematical model of an electric motor; to develop a machine diagram of a digital electric drive; to synthesize a three-loop robot positioning control system.

Methodology. The research problems should be solved by methods of analysis and synthesis of automatic control systems. **Results.** In the work, a three-circuit control system of the electric drive of a robot with a direct current motor was developed. Thus, as a result of modeling the operation of a digital electric drive with three control circuits for current, speed and positioning, an aperiodic transient process was provided with quality indicators. **Originality.** Thus, the results of simulation of the two-loop servo control system showed that the dynamic characteristics of the electric motor in terms of current and speed of rotation, which meet the requirements of the task, are provided by the PI controller in the current control circuit and the PID controller in the speed control circuit. Thus, as a result of modeling the operation of a digital electric drive with three control circuits for current, speed and positioning, an aperiodic transient process was provided with quality indicators. **Practical value.** The following results were obtained during the research: the best control law for the current circuit is the proportional-integral (PI) law; the best control law for the speed contour is the proportional-integral-differential (PID) law; the best control law for a digital positioning control loop is the proportional (P) law.

Keywords: robot manipulator, motor, modeling, servo drive, speed control.

Binkovska Anzhela, Associate Professor, PhD, Automation and Computer-Integrated Technologies Department, ORCID: 0000-0001-9788-4321. tel. +380(50)301-87-46, binkovska@khadi.kharkov.ua, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Stypanovych Mykola, student of the group MA-21jb-22 of the mechanical faculty, tel. +38(096)5126537, akit.khnadu@gmail.com, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Kuzmynykh Vasyl, student of the group MA-21jb-22 of the mechanical faculty, tel. +38(096) 7846803, akit.khnadu@gmail.com, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.