

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/17>

Лісовець С.М.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Кисельов В.Б.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Ківа І.Л.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Фуртат О.В.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТУРУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА ПО ШВИДКОСТІ

Слідкуючі системи, які використовуються в електричних (електромеханічних) приводах промислових роботів, в залежності від призначення таких роботів мають різну конструкцію і постійно вдосконалюються. В загальному випадку вони складаються з двох частин: внутрішнього контуру керування, який відповідає за роботу електричного двигуна, і зовнішнього контуру керування, який відповідає за позиціонування ланок промислового робота (лінійне або кутове). Підтримання одночасно і високої швидкодії, і високої точності роботи електричного приводу при збереженні всіх інших його характеристик, таких як імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов або параметр потоку відмов, не завжди можливо. В проведеному дослідженні було розглянуто контур керування електричним приводом промислового робота по швидкості, як один з можливих варіантів проектування слідкуючих систем промислових роботів. Особливістю такого дослідження було те, що змінюючи одночасно ступені стійкості і коливальності перехідного процесу в такому контурі, можливо зменшувати час регулювання за рахунок появи незначного переулювання і навпаки. При цьому статична помилка в такому контурі відсутня. Перевагами такого підходу є достатньо прості розрахунки, які вимагають визначення лише двох коефіцієнтів настроювання регулятора: коефіцієнта підсилення і коефіцієнта інтегрування, а також можливість реалізації запропонованого алгоритму керування за допомогою стандартних засобів автоматизації. До недоліків можна віднести деяку обмеженість такого алгоритму керування, яка не дозволяє враховувати, наприклад, обмеження на максимально можливий керувальний вплив або на максимально можливу швидкість протікання перехідного процесу. Симуляція створеної моделі контуру керування електричним приводом промислового робота по швидкості і порівняння її з результатами розрахунків показала їх практичне співпадіння.

Ключові слова: діаграма Вишнеградського, електричний привід, контур керування, передатна функція, перехідний процес, слідкуюча система.

Постановка проблеми. Слідкуючі системи промислових роботів визначають їх найважливіші характеристики, зокрема точність і швидкодію. Для досягнення високих значень наведених характеристик необхідно подолати ряд складнощів. Не зважаючи на різноманіття технічних реалізацій слідкуючих систем, їх структура є достатньо типовою. Вони використовуються переважно в промислових роботах, приводи яких є електричними (електромеханічними) [1, 2, 3].

Один з варіантів структури слідкуючої системи промислового робота, який має електричний привід і шарнірні з'єднання, наведена на рис. 1. Якщо промисловий робот має, наприклад, чотири ступеня свободи, то він може мати чотири такі або аналогічні слідкуючі системи, які будуть відрізнятися лише певними технічними характеристиками (зокрема, типом електричних двигунів), але загальна структура таких систем останеться однаковою.

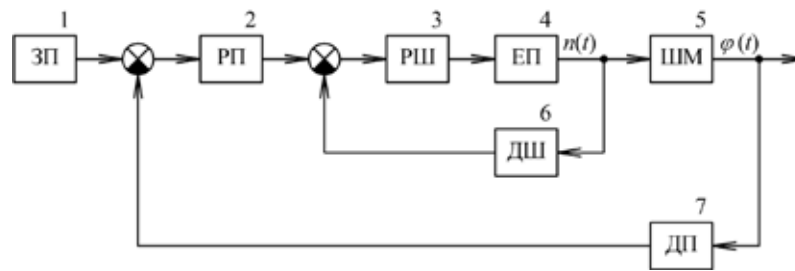


Рис. 1. Структура слідкуючої системи промислового робота

Такі слідкуючі системи керування можуть бути, наприклад, повністю аналоговими. Але часто вимоги сучасного виробництва потребують, щоб в них використовувалися засоби обчислювальної техніки у вигляді мікропроцесорів або мікроконтролерів чи іншого подібного обладнання. Однією з вимог до слідкуючих систем промислових роботів є те, щоб перехідні процеси в усіх контурах керування таких систем були (за деяким виключенням) аперіодичними. Іншими словами, всі ланки повинні переміщуватися плавно, без коливань. Слідкуючі системи промислових роботів звичайно складаються з внутрішнього контуру керування по швидкості і зовнішнього контуру керування по положенню.

Регулятор швидкості (РШ) 3 (складається з формувача керувального впливу і підсилювача керувального впливу), електричний привід (ЕП) 4 (складається з електричного двигуна) і датчик швидкості (ДШ) 6 утворюють внутрішній контур керування слідкуючої системи по швидкості. Його завдання – керувати обертами електричного приводу 4 (тобто обертами електричного двигуна). Датчик положення (ЗП) 1 (визначає, яке лінійне або кутове положення повинна прийняти поточна ланка відносно сусідньої ланки), регулятор положення (РП) 2, внутрішній контур керування слідкуючої системи по швидкості, шарнірний механізм (ШМ) 5 (складається з редуктора, кріплень до шарнірного механізму шарніру, ланки і вантажу, маса якого може змінюватися в будь-який момент часу від нуля до значення, визначеного в документації) і датчик положення (ДП) 7 утворюють зовнішній контур керування слідкуючої системи по положенню. Його завдання – керувати положенням шарнірного механізму 5 (тобто положенням поточної ланки відносно сусідньої ланки).

Такі складові слідкуючої системи, як електричний привід 4, шарнірний механізм 5, датчик швидкості 6 і датчик положення 7 звичайно входять до складу промислового робота, і їх зміна (у випадку

потреби) є або неможливою, або занадто дорогою. З іншого боку, технічні характеристики наведених складових є незмінними і чітко визначеними в документації. Згідно з вимогами до сучасних промислових роботів, кількість можливих положень однієї ланки відносно іншої ланки, яку повинен забезпечувати відповідний контур керування, становить приблизно від 10000 до 500000, що вимагає від такого контуру достатньо великої точності. Відповідно, характеристики таких контурів керування, і особливо характеристики датчика положення 7, повинні бути стабільними упродовж всього часу функціонування промислового робота. Крім того, промисловий робот повинен забезпечувати фіксацію захоплюючого пристрою (або іншого робочого органу) упродовж довільно заданого часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що вдосконалення контурів керування слідкуючих систем промислових роботів (зокрема, які використовують електричні (електромеханічні) приводи) полягає, переважно, у використанні більш сучасної елементної бази, яка покращує технічні характеристики таких систем (наприклад, підвищення точності позиціонування, зменшення енергоспоживання, збільшення напрацювання на відмову) [1]. При цьому загальна структура таких контурів загалом остається незмінною.

В електричному приводі 4 в якості електричного двигуна звичайно використовуються електричні двигуни постійного струму (як колекторні, так і безколекторні). Наприклад, колекторні двигуни, при керуванні за рахунок зміни напруги на якорі, звичайно описуються передатними функціями другого порядку, до складу яких входять електромеханічні і електромагнітні сталі часу. При цьому вдосконалення конструкції колекторних двигунів звичайно не змінює структури їх передатних функцій, а впливає лише на значення параметрів (коефіцієнтів передачі, сталих часу) таких передатних функцій.

Постановка завдання. Метою проведеного дослідження було створення моделі/моделей

і виконання симуляції типового внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості, що передбачає попередній розрахунок параметрів регулятора швидкості 3. Також метою проведеного дослідження було отримання оптимальних (згідно з кількома різними критеріями) параметрів налагодження такого регулятора. В якості середовища для створення моделей було обрано, враховуючи його широке застосування, пакет Simulink, який є частиною пакета MatLAB відомого розробника MathWorks.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо внутрішній контур керування слідкуючої системи по швидкості. В якості регулятора швидкості 3 найчастіше використовується ПІ-регулятор. В такому регуляторі ПІ-закон керування визначає формувач керувального впливу, а інерційністю підсилювача керувального впливу (якщо використовується, наприклад, ШІМ-перетворення) часто можна нехтувати. Таким чином, передатна функція $W_3(s)$ такого регулятора матиме наступний вигляд:

$$W_3(s) = \frac{K_{\text{П}}s + K_{\text{І}}}{s}, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (1)$$

де $K_{\text{П}}$ – коефіцієнт підсилення;
 $K_{\text{І}}$ – коефіцієнт інтегрування;
 s – оператор Лапласа.

Передатна функція $W_4(s)$ електричного приводу 4 визначається його електромеханічною $T_{\text{ЕМЕХ}}$ і електромагнітною $T_{\text{ЕМАГ}}$ сталими (при цьому одночасно може враховуватися і момент опору, який прикладається до валу електричного двигуна зі сторони редуктора). Так як умова $T_{\text{ЕМЕХ}} > 4T_{\text{ЕМАГ}}$ виконується досить часто, то передатна функція $W_4(s)$ може бути аперіодичною передатною функцією другого порядку і мати наступний вигляд:

$$W_4(s) = \frac{K_{\text{ЕП}}}{(T_{\text{ЕМЕХ}}s + 1)(T_{\text{ЕМАГ}}s + 1)}, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (2)$$

де $K_{\text{ЕП}}$ – коефіцієнт передачі електричного приводу 4.

Але якщо, зокрема, буде виконуватися умова $T_{\text{ЕМЕХ}} < 4T_{\text{ЕМАГ}}$, то передатна функція $W_4(s)$ буде коливальною передатною функцією.

Датчик швидкості 6 також може бути практично безінерційним. Часто в його якості замість тахометра використовується інкрементальний енкодер, момент інерції якого є набагато меншим за момент інерції якоря електричного двигуна. Крім того, якщо завдання для регулятора швидкості 3, наприклад, формується у вигляді цифрового коду і поточне значення обертів електричного приводу 4 також формується у вигляді цифрового коду, то можна прийняти, що передатна функція $W_6(s)$ датчика швидкості 6 буде мати наступний вигляд:

$$W_6(s) = 1. \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (3)$$

Отже, внутрішній контур керування слідкуючої системи по швидкості (з урахуванням передатних функцій складових такого контуру) буде мати вигляд, наведений на рис. 2.

Тобто датчик швидкості 6, по суті, буде реалізовувати одиничний від’ємний зворотний зв’язок. Таким чином, передатна функція $W_{\text{ВП}}(s)$ внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості буде наступною:

$$\begin{aligned} W_{\text{ВП}}(s) &= \frac{W_3(s)W_4(s)}{1 + W_3(s)W_4(s)W_6(s)} = \frac{\frac{K_{\text{П}}s + K_{\text{І}}}{s} \frac{K_{\text{ЕП}}}{(T_{\text{ЕМЕХ}}s + 1)(T_{\text{ЕМАГ}}s + 1)}}{1 + \frac{K_{\text{П}}s + K_{\text{І}}}{s} \frac{K_{\text{ЕП}}}{(T_{\text{ЕМЕХ}}s + 1)(T_{\text{ЕМАГ}}s + 1)}} = \\ &= \frac{(K_{\text{П}}s + K_{\text{І}})K_{\text{ЕП}}}{s(T_{\text{ЕМЕХ}}s + 1)(T_{\text{ЕМАГ}}s + 1) + (K_{\text{П}}s + K_{\text{І}})K_{\text{ЕП}}} = \\ &= \frac{\frac{K_{\text{П}}}{K_{\text{І}}}s + 1}{\frac{T_{\text{ЕМЕХ}}T_{\text{ЕМАГ}}}{K_{\text{І}}K_{\text{ЕП}}}s^2 + \frac{T_{\text{ЕМЕХ}} + T_{\text{ЕМАГ}}}{K_{\text{І}}K_{\text{ЕП}}}s + 1}. \end{aligned} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (4)$$

Така передатна функція має третій порядок. Тому для дослідження перехідних процесів у такому внутрішньому контурі можна використати діаграми Вишнеградського, які для практичного застосування є достатньо точними [4, 5, 6].

Перехідний процес в такому внутрішньому контурі переважно визначається характеристичним рівнянням

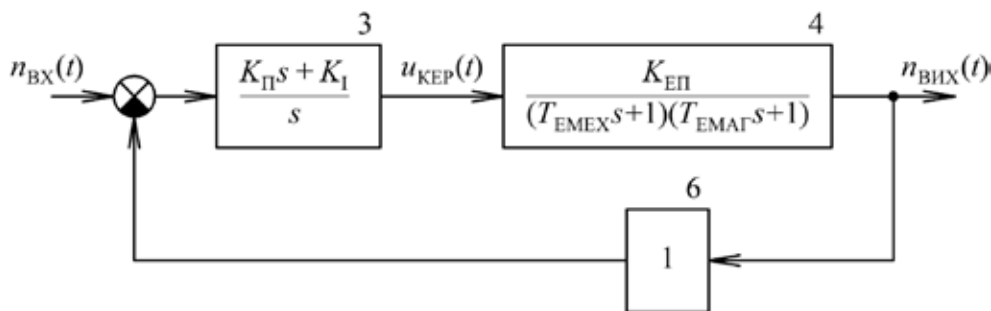


Рис. 2. Структура внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості

$$\frac{T_{EMEX}T_{EMAG}}{K_I K_{EP}} s^3 + \frac{T_{EMEX} + T_{EMAG}}{K_I K_{EP}} s^2 + \frac{K_{II} K_{EP} + 1}{K_I K_{EP}} s + 1 = 0, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (5)$$

яке може бути приведене до вигляду

$$D^3 + A_1 D^2 + A_2 D + 1 = 0, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (6)$$

де D – допоміжна змінна,

$$D = \sqrt[3]{\frac{T_{EMEX} T_{EMAG}}{K_I K_{EP}}}; \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (7)$$

A_1 – безрозмірний коефіцієнт,

$$A_1 = \frac{T_{EMEX} + T_{EMAG}}{\sqrt[3]{K_I K_{EP} T_{EMEX}^2 T_{EMAG}}}; \quad (8)$$

A_2 – безрозмірний коефіцієнт,

$$A_2 = \frac{K_{II} K_{EP} + 1}{\sqrt[3]{K_I^2 K_{EP}^2 T_{EMEX} T_{EMAG}}}. \quad (9)$$

Маючи фіксоване значення K_{EP} і задаючи потрібні значення безрозмірного ступеня стійкості h_0 і ступеня коливальності μ (наприклад, якщо перехідний процес у внутрішньому контурі керування не повністю аперіодичний, а з невеликою коливальністю), можна визначити K_{II} і K_I (див. рис. 3 і рис. 4). Припустимо, що $K_{EP} = 20$ рад/(В · с), $T_{EMEX} = 0,035$ с, $T_{EMAG} = 0,008$ с, $h_0 = 0,5$ і $\mu = 1$. Оберемо на діаграмах Вишнеградського, наприклад, значення $A_1 = 2,5$ і $A_2 = 2,5$.

З одного боку, такі значення A_1 і A_2 знаходяться в області, яка з усіх боків обмежується межею $h_0 = 0,5$ (див. рис. 3). Таким чином, в цій області будь-які перехідні процеси у внутріш-

ньому контурі керування будуть мати значення h_0 , не більше ніж 0,5.

З іншого боку, такі значення A_1 і A_2 знаходяться в області, яка з усіх боків обмежується межею $\mu = 1$ (див. рис. 4). Таким чином, в цій області будь-які перехідні процеси у внутрішньому контурі керування будуть мати значення μ , не більше ніж 1.

Отже, з формули (8) можна отримати, що

$$K_I = \frac{(T_{EMEX} + T_{EMAG})^3}{A_1^3 K_{EP} T_{EMEX}^2 T_{EMAG}} = \frac{(0,035 + 0,008)^3}{2,5^3 \cdot 20 \cdot 0,035^2 \cdot 0,008^2} = 3,2452, \quad (10)$$

а з формули (9) можна отримати, що

$$K_{II} = \frac{A_2 \sqrt[3]{K_I^2 K_{EP}^2 T_{EMEX} T_{EMAG}} - 1}{K_{EP}} = \frac{2,5 \cdot \sqrt[3]{3,2452^2 \cdot 20^2 \cdot 0,035 \cdot 0,008} - 1}{20} = 0,0821. \quad (11)$$

Ступінь стійкості h має наступний вигляд:

$$h = \sqrt[3]{\frac{K_I K_{EP}}{T_{EMEX} T_{EMAG}}} h_0 = \sqrt[3]{\frac{3,2452 \cdot 20}{0,035 \cdot 0,008}} \cdot 0,5 = 30,7143. \quad (12)$$

Виконаємо розрахунок коефіцієнтів передатної функції $W_{ВП}(s)$ (див. формулу (4)):

$$\frac{K_{II}}{K_I} = \frac{0,0821}{3,2452} = 2,529 \cdot 10^{-2}, \quad (13)$$

$$\frac{T_{EMEX} T_{EMAG}}{K_I K_{EP}} = \frac{0,035 \cdot 0,008}{3,2452 \cdot 20} = 4,3141 \cdot 10^{-6}, \quad (14)$$

$$\frac{T_{EMEX} + T_{EMAG}}{K_I K_{EP}} = \frac{0,035 + 0,008}{3,2452 \cdot 20} = 6,6252 \cdot 10^{-4}, \quad (15)$$

$$\frac{K_{II} K_{EP} + 1}{K_I K_{EP}} = \frac{0,0821 \cdot 20 + 1}{3,2452 \cdot 20} = 4,0698 \cdot 10^{-2}. \quad (16)$$

Отже, передатна функція $W_{ВП}(s)$ буде мати наступний вигляд

$$W_{ВП}(s) = \frac{2,529 \cdot 10^{-2} s + 1}{4,3141 \cdot 10^{-6} s^3 + 6,6252 \cdot 10^{-4} s^2 + 4,0698 \cdot 10^{-2} s + 1}. \quad (17)$$

Зокрема, для такої передатної функції перехідний процес $n_{ВИХ}(t)$ (в нормованому вигляді) у внутрішньому контурі керування слідкуючої системи по швидкості (отриманий в результаті розрахунку) буде мати наступний вигляд (див. рис. 5):

$$n_{ВИХ}(t) = 1 + 1,1071e^{-61,4286t} - 2,1071e^{-46,0714t} \cos(40,6312t) - 0,7155e^{-46,0714t} \sin(40,6312t). \quad (18)$$

Максимальне значення перехідного процесу становитиме 1,0999 і буде досягнуто в момент часу 0,0596 с. Час регулювання (за умови входження в зону $\pm 5\%$ від усталеного значення) становитиме 0,0851 с, час регулювання (за умови входження в зону $\pm 2,5\%$ від усталеного значення) становитиме 0,0973 с.

Модель внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості (в пакеті Simulink) наведена на рис. 6.

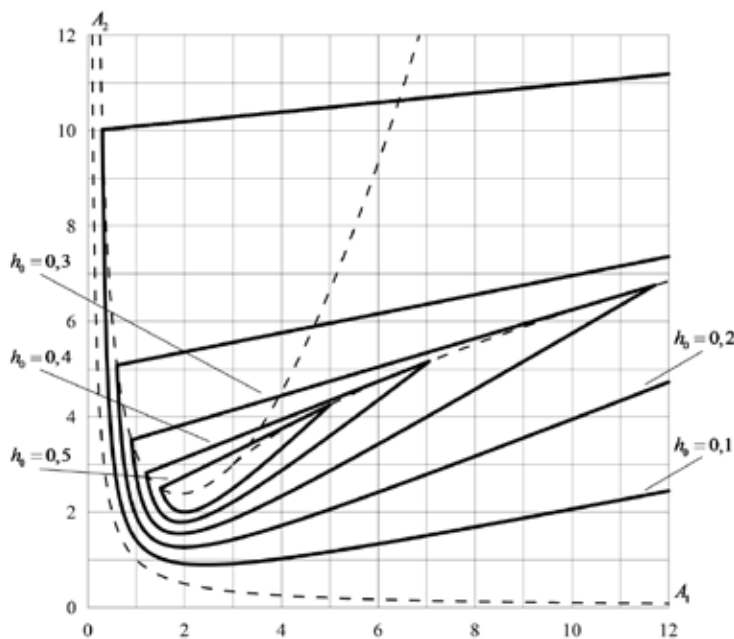


Рис. 3. Діаграма Вишнеградського для h_0

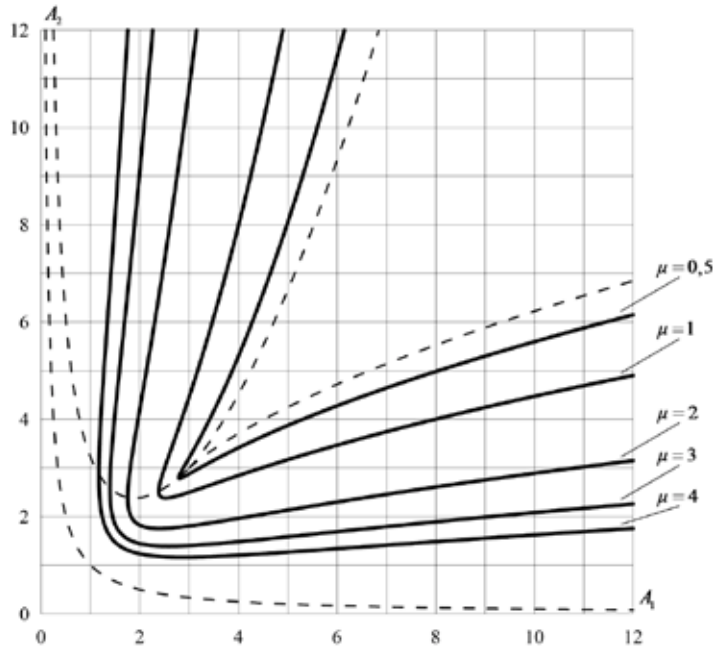


Рис. 4. Діаграми Вишнеградського для μ

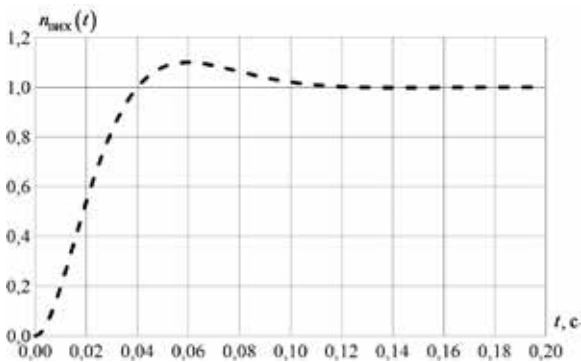


Рис. 5. Перехідний процес $n_{\text{вих}}(t)$ (в нормованому вигляді, отриманий в результаті розрахунку)

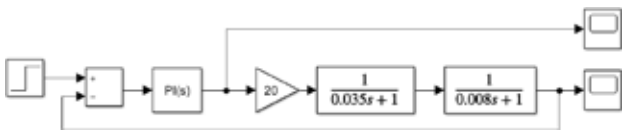


Рис. 6. Модель внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості

Перехідний процес $n_{\text{вих}}(t)$ (в нормованому вигляді) у внутрішньому контурі керування слідкуючої системи по швидкості (в пакеті Simulink) наведено на рис. 7.

Порівнюючи перехідний процес, отриманий в результаті розрахунку (див. рис. 5), з перехідним процесом, отриманим в пакеті Simulink (див. рис. 7), можна побачити, що вони співпадають.

Керувальний вплив $u_{\text{КЕР}}(t)$ (в нормованому вигляді) у внутрішньому контурі керування слід-

куючої системи по швидкості (в пакеті Simulink) наведено на рис. 8.

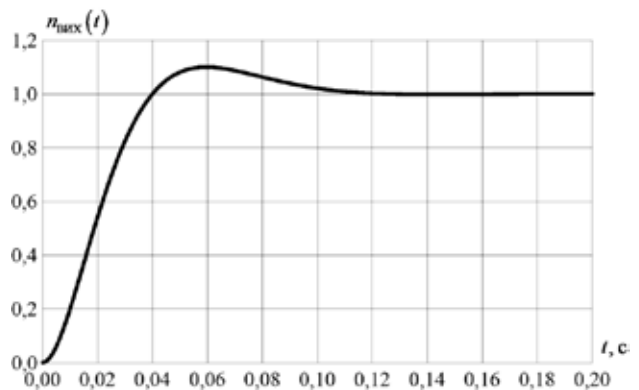


Рис. 7. Перехідний процес $n_{\text{вих}}(t)$ (в нормованому вигляді, отриманий в пакеті Simulink)

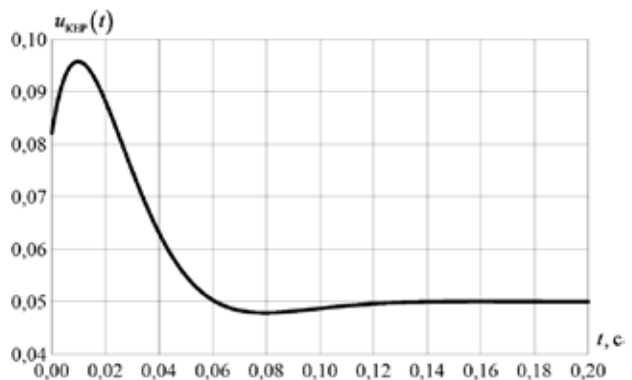


Рис. 8. Керувальний вплив $u_{\text{КЕР}}(t)$ (в нормованому вигляді, отриманий в пакеті Simulink)

Висновки. В статті показано, що розрахунок параметрів регулятора швидкості внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості може бути здійснений з використанням діа-

грам Вишнеградського для безрозмірного ступеня стійкості h_0 і ступеня коливальності μ . Результати розрахунків підтверджуються результатами симуляції в пакеті Simulink.

Список літератури:

1. Пелевін Л.Є. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: Підручник / Л.Є. Пелевін, К.І. Почка, О.М. Гаркавенко, Д.О. Міщук, І.В. Русан. – К.: ТОВ “НВП “Інтерсервіс””, 2016. – 258 с.
2. Пелевін Л.Є. Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика / Л.Є. Пелевін, Д.О. Міщук, В.П. Рашківський, Є.В. Горбатюк, Г.О. Аржаєв, В.Ф. Красніков. – К.: КНУБА, МОНУ, 2015. – 340 с.
3. Пелевін Л.Є. Мехатронні системи гідропневмоавтоматики / Л.Є. Пелевін, М.М. Балака, Г.О. Аржаєв. – К.: Аграр Медіа Груп, 2014. – 192 с.
4. Гоголюк П.Ф. Теорія автоматичного керування. Навч. посіб. / П.Ф. Гоголюк, Т.М. Гречин. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. – 279 с.
5. Ладанюк А.П. Методи сучасної теорії управління: Підручник / А.П. Ладанюк, Н.М. Луцька, В.Д. Кишенько, Л.О. Власенко, В.В. Іващук. – К.: Видавництво Ліра-К, 2018. – 368 с.
6. Мокін Б.І. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів. Навч. посіб. / Б.І. Мокін, В.Б. Мокін, О.Б. Мокін. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2005. – 300 с.

Lisovets S.M., Kyselov V.B., Kiva I.L., Guida O.G., Furtat O.V. RESEARCH OF CONTROL CIRCUIT OF ELECTRIC DRIVE OF INDUSTRIAL ROBOT BY SPEED

Tracking systems used in electric (electromechanical) drives of industrial robots, depending on the purpose of such robots, have different designs and are constantly being improved. In general, they consist of two parts: an internal control circuit, which is responsible for the operation of the electric motor, and an external control circuit, which is responsible for positioning the links of the industrial robot (linear or angular). It is not always possible to simultaneously maintain high speed and high accuracy of electric drive operation while preserving all its other characteristics, such as the probability of failure-free operation, the intensity of failures or the failure flow parameter. In the conducted study, the control circuit of the electric drive of an industrial robot based on speed was considered as one of the possible options for the design of tracking systems of industrial robots. The peculiarity of this research was that by simultaneously changing the degrees of stability and fluctuation of the transition process in such a circuit, it is possible to reduce the adjustment time due to the appearance of a slight overshoot and vice versa. At the same time, there is no static error in such a circuit. The advantages of this approach are fairly simple calculations that require the determination of only two adjustment coefficients of the regulator: the gain coefficient and the integration coefficient, as well as the possibility of implementing the proposed control algorithm using standard automation tools. The disadvantages include some limitations of such a control algorithm, which does not allow taking into account, for example, restrictions on the maximum possible control influence or on the maximum possible speed of the transition process. The simulation of the created model of the control circuit of the electric drive of the industrial robot in terms of speed and its comparison with the results of the calculations showed their practical coincidence.

Key words: *Vyshnegradsky diagram, electric drive, control circuit, transfer function, transient process, tracking system.*