

*Лісовець С.М.*

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОГО ПІД-РЕГУЛЯТОРА В КОНТУРІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Промислові роботи-маніпулятори знаходять все більш широке застосування в різних галузях промисловості. Особливо це стосується галузей, де необхідно постійно виконувати монотонні операції, які одночасно потребують і точності, і швидкодії. Типові роботи-маніпулятори мають від трьох до шести ланок, які можуть рухатися одна відносно іншої (сусідньої) за рахунок здійснення повороту або переміщення. Звичайно в якості приводів для здійснення таких рухів використовуються електромеханічні приводи, в яких застосовуються двигуни постійного або змінного струмів. Але часто є потреба в розробці нових, нестандартних електромеханічних приводів в умовах, коли доступ до технічної документації на сучасні розробки в області робототехніки є відсутнім або його складно отримати. У виконаному дослідженні на прикладі електричного двигуна постійного струму з типовими для електромеханічних приводів параметрами і відповідною типовою передатною функцією розглядалося використання цифрового ПІД-регулятора в якості регулятора кутової швидкості. При цьому, для спрощення моделі такого двигуна, не були враховані нелінійності його механічних, електричних, магнітних характеристик тощо (з практичної точки зору таке спрощення є допустимим). При розрахунку настроювання цифрового ПІД-регулятора передбачалася компенсація полюсів передатної функції електричного двигуна постійного струму його нулями за умови, що перерегулювання перехідного процесу не буде більше заданого. Також у виконаному дослідженні наводяться результати симуляції моделі контуру керування електромеханічним приводом в Simulink, яка проводилася шляхом використання в законі керування спочатку тільки пропорційної складової, а потім шляхом додавання в нього інтегруючої і диференціюючої складових. Як показала симуляція, інтегруюча складова дозволяє отримати перехідний процес без усталеної помилки, а диференціююча – зменшити перерегулювання перехідного процесу.

**Ключові слова:** двигун постійного струму, контур керування, ланка другого порядку, передатна функція, робот-маніпулятор, цифровий ПІД-регулятор.

**Постановка проблеми.** В сучасній промисловості роботи (зокрема, промислові роботи-маніпулятори) все частіше і частіше використовуються для виконання різних виробничих операцій. Це стосується літако- і автомобілебудування, виготовлення електронних виробів, обробки металів і пластмас, переробки сільськогосподарської продукції і так далі. Одним з показників, який визначає ступінь розвитку промисловості певної країни з точки зору роботизації, є питома щільність роботів на тисячу працюючих.

Найбільш затребуваними промисловими роботами на теперішній час є роботи-маніпулятори, які використовуються для зварювання, пайки, різання, фарбування, шліфування і так далі. Основні сучасні тенденції у використанні промислових роботів-маніпуляторів: зменшення вартості, збільшення області використання, покращення механізмів захоплення, удосконалення технічного зору, підвищення безпеки і, як наслідок цього, можливість

виконувати виробничі завдання в одному робочому просторі з людьми. В якості приводів таких роботів-маніпуляторів найчастіше використовуються електромеханічні приводи, в яких застосовуються двигуни постійного струму із збудженням від постійних магнітів та двигуни змінного струму асинхронні з короткозамкненим ротором і синхронні із збудженням від постійних магнітів.

Спрощена структура контуру керування електромеханічним приводом промислових роботів-маніпуляторів наведена на рис. 1.

В ній можна виділити внутрішній контур керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості в складі регулятора кутової швидкості (РКШ), електромеханічного приводу (ЕМП) і датчика кутової швидкості (ДКШ) та зовнішній контур керування із зворотнім зв'язком по кутовому / лінійному положенню в складі розглянутого вище внутрішнього контуру керування, регулятора кутового / лінійного положення (РК/ЛП), шарнір-

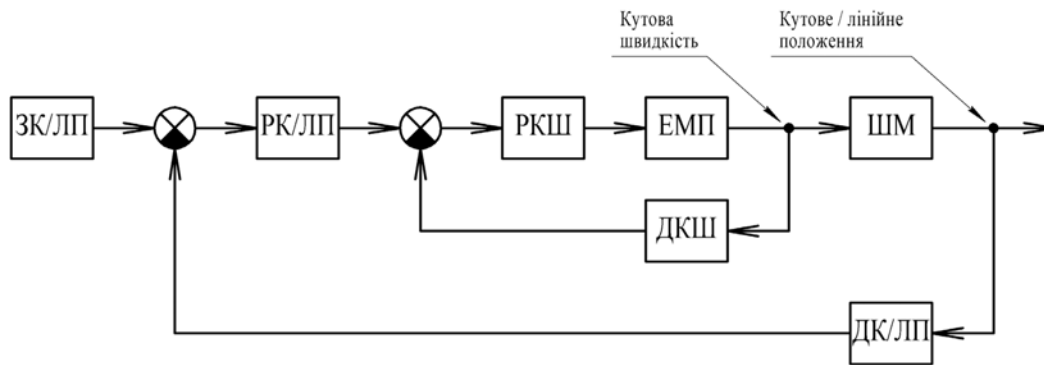


Рис. 1. Спрощена структура контуру керування електромеханічним приводом

ного механізму (ШМ), датчика кутового / лінійного положення (ДК/ЛП) і задатчика кутового / лінійного положення (ЗК/ЛП).

Відповідно до нормативної документації, керування по кутовій швидкості передбачає пропорційну залежність між сигналами на вході і на виході внутрішнього контуру керування по кутовій швидкості. Правильна робота зовнішнього контуру керування визначається переважно правильною роботою внутрішнього контуру керування. При цьому сучасні системи керування електромеханічними приводами роботів-маніпуляторів «вимагають» при позиціонуванні підвищення точності і швидкодії, покращення керованості і надійності, збільшення коефіцієнта корисної дії. В таких системах керування часто використовуються цифрові регулятори (одними з яких є цифрові ПД-регулятори) – від правильності їх роботи залежить правильність роботи всього контуру керування по кутовій швидкості.

Таким чином, синтез цифрових ПД-регуляторів для здійснення заданих впливів на кутову швидкість електромеханічних приводів є однією з актуальних задач робототехніки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Типовим представником двигунів, які використовуються в електромеханічних приводах, є відносно застарілий, але широко розповсюджений електричний двигун постійного струму з незалежним збудженням з дисковим (пласким) якорем ПЯ-250Ф, який має вбудований тахогенератор постійного струму ТП 7520-0,2. Його технічні характеристики: напруга живлення – 36 В, номінальна частота обертання – 3000 об/хв, номінальний обертальний момент – 0,8 Н·м, номінальна потужність – 250 Вт, момент інерції якоря –  $3,5 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>, коефіцієнт корисної дії – 70%. Вихідна напруга тахогенератора має крутизну 0,02 В·хв/об.

Як відомо, з «точки зору» теорії автоматичного керування електричний двигун постійного струму, керування яким здійснюється шляхом зміни напруги на якорі, звичайно представляє собою ланку другого порядку (одну коливальну або дві аперіодичні, з'єднані послідовно), яка визначається трьома параметрами: електромеханічною сталою  $T_{EMEX}$ , електромагнітною сталою  $T_{EMAG}$  і коефіцієнтом передачі  $K_{ДВ}$  [1, 2]. Такий опис електричного двигуна постійного струму є достатньо спрощеним, так як він, зокрема, не враховує нелінійності механічних, електричних, магнітних характеристик тощо такого двигуна. Але для багатьох режимів його роботи точність такого опису є достатньою.

Коефіцієнт передачі

$$K_{ДВ} = \frac{1}{c\Phi}, \quad (1)$$

де  $c$  – коефіцієнт, який залежить від конструкції двигуна;  $\Phi$  – магнітний потік двигуна.

В свою чергу, електромеханічна стала

$$T_{EMEX} = \frac{J_{\Sigma} R_{я}}{k^2 \Phi^2}, \quad (2)$$

де  $J_{\Sigma}$  – сумарний момент інерції, який складається з власного моменту інерції електричного двигуна і приведенного моменту інерції від зовнішнього навантаження (наприклад, редуктора).

Звичайно приведений момент інерції більше власного моменту інерції в 1,5...2,5 рази і в процесі роботи може іноді змінюватися (наприклад, внаслідок зміни маси вантажу, який переміщує промисловий робот-маніпулятор, або положення його ланок одна відносно іншої). Внаслідок цього електромеханічна стала  $T_{EMEX}$  теж може як зменшуватися, так і збільшуватися. Типові її значення лежать в діапазоні десятків і сотень мілісекунд.

При відомих значеннях індуктивності  $L_{я}$  і опору  $R_{я}$  якоря електромагнітна стала

$$T_{EMAG} = \frac{L_{я}}{R_{я}} \quad (3)$$

і в процесі роботи вона є незмінною. Типові її значення лежать в діапазоні одиниць і десятків мілісекунд.

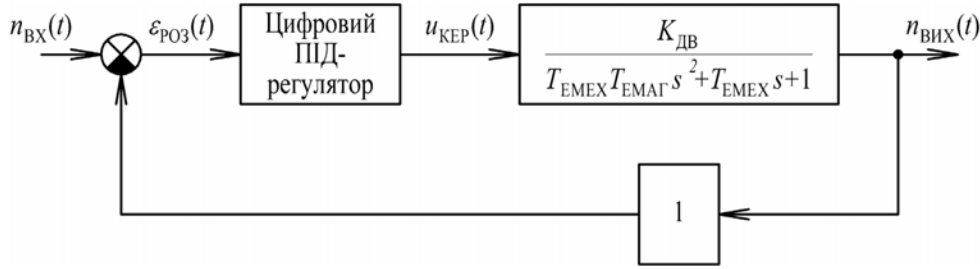


Рис. 2. Спрощена структура внутрішнього контуру керування

Таким чином, неперервна передатна функція електричного двигуна постійного струму буде наступною:

$$W(s) = \frac{K_{ДВ}}{T_{ЕМЕХ} T_{ЕМАГ} s^2 + T_{ЕМЕХ} s + 1} \quad (4)$$

З огляду на це, спрощена структура внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості буде мати вигляд, наведений на рис. 2.

Інерційність датчика кутової швидкості і силової частини цифрового ПІД-регулятора при цьому будемо вважати незначними, внаслідок чого вони в розрахунках можуть не враховуватися. Як відомо, ПІД-регулятори (як неперервні, так і цифрові), реалізують пропорційно-інтегрально-диференціальний закон керування: тобто розугодження  $\epsilon_{РОЗ}(t)$  (різниця між заданим  $n_{ВХ}(t)$  і поточним значенням  $n_{ВИХ}(t)$  керованого параметра) одночасно підсилюється, інтегрується і диференціюється, після чого результати виконання таких операцій підсумовуються з різними ваговими коефіцієнтами, формуючи потрібний керуючий вплив  $u_{КЕР}(t)$  [3].

Підсилення реалізується наступним чином:

$$u_{КЕР}((k+1)\tau) = K_{П} \epsilon_{РОЗ}((k+1)\tau), \quad (5)$$

де  $\tau$  – інтервал дискретизації;  $k$  – порядковий індекс,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $K_{П}$  – коефіцієнт підсилення.

Інтегрування звичайно реалізується на основі алгоритму трапецій:

$$u_{КЕР}((k+1)\tau) = u_{КЕР}(k\tau) + K_I \tau \frac{\epsilon_{РОЗ}((k+1)\tau) + \epsilon_{РОЗ}(k\tau)}{2}, \quad (6)$$

де  $K_I$  – коефіцієнт інтегрування.

А диференціювання – на основі алгоритму обчислення похідної по двом точкам:

$$u_{КЕР}((k+1)\tau) = K_D \frac{\epsilon_{РОЗ}((k+1)\tau) - \epsilon_{РОЗ}(k\tau)}{\tau}, \quad (7)$$

де  $K_D$  – коефіцієнт диференціювання.

Таким чином, дискретна передатна функція цифрового ПІД-регулятора буде наступною:

$$C(z) = K_{П} + K_I \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)} + K_D \frac{z-1}{\tau z}. \quad (8)$$

Для того, щоб керуючий вплив  $u_{КЕР}(t)$  на інтервалі дискретизації  $\tau$  залишався незмінним, використовується фіксатор нульового порядку, неперервна передатна функція якого має наступний вигляд:

$$H(s) = \frac{1 - e^{-s\tau}}{s}. \quad (9)$$

Для різних електричних двигунів постійного струму параметри  $K_{ДВ}$ ,  $T_{ЕМЕХ}$  і  $T_{ЕМАГ}$  мають різне значення. Тому можна, в якості прикладу, розглянути двигун з типовими значеннями таких параметрів.

**Постановка завдання.** Завдання проведеного дослідження полягало в тому, щоб навести методику синтезу цифрового ПІД-регулятора, яка б дозволяла шляхом проведення нескладних розрахунків визначати оптимальні значення коефіцієнтів підсилення, інтегрування і диференціювання такого регулятора з метою його подальшого використання в контурі керування електромеханічним приводом промислового робота.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Нехай, наприклад,  $K_{ДВ} = 6$  рад/(В·с),  $T_{ЕМЕХ} = 0,2$  с,  $T_{ЕМАГ} = 0,01$  с і  $\tau = 0,02$  с. Звідси передатна функція  $G(s)$  неперервної частини (тобто електричного двигуна постійного струму разом з фіксатором нульового порядку) внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості буде наступною:

$$G(s) = W(s)H(s) = \frac{K_{ДВ}(1 - e^{-s\tau})}{(T_{ЕМЕХ}T_{ЕМАГ}s^2 + T_{ЕМЕХ}s + 1)s} = \frac{6(1 - e^{-0,02s})}{(0,002s^2 + 0,2s + 1)s}. \quad (10)$$

Розкладемо передатну функцію  $G(s)$  на окремі дробі:

$$G(s) = \frac{6,354102(1 - e^{-0,02s})}{(0,189443s + 1)s} - \frac{0,354102(1 - e^{-0,02s})}{(0,010557s + 1)s}. \quad (11)$$

Виконаємо над такою передатною функцією пряме  $z$ -перетворення. Звідси отримана дискретна передатна функція  $G(z)$  буде такою:

$$G(z) = \frac{z-1}{z} Z\{G(s)\} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{6,354102(1-e^{-0,02s})}{(0,189443s+1)s} - \frac{0,354102(1-e^{-0,02s})}{(0,010557s+1)s} \right\} = \\
 &= \frac{0,636624}{z-0,899809} - \frac{0,300843}{z-0,150404} = \frac{0,335781z+0,174951}{(z-0,899809)(z-0,150404)} = \\
 &= \frac{0,335781z+0,174951}{z^2-1,050213z+0,135335}. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Таким чином, вона має два полюси  $z_1 = 0,899809$  і  $z_2 = 0,150404$ . Для симуляції роботи внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості було використано пакет Simulink і розроблено відповідну модель, яка наведена на рис. 3.

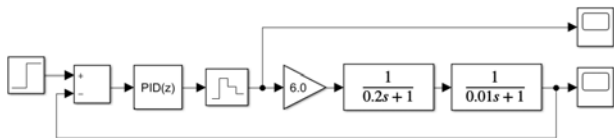


Рис. 3. Модель внутрішнього контуру керування

В такій моделі використовувався цифровий ПД-регулятор  $PID(z)$ , який дозволяв незалежно одне від одного використовувати підсилення, інтегрування і диференціювання. Наприклад, використовуючи тільки П-складову (без І-складової і Д-складової) такого регулятора, можна було реалізувати тільки підсилення (відповідно, без інтегрування і диференціювання). Крім того, було прийнято, що  $n_{\text{вх}}(t) = 50$  об/с і в процесі симуляції не змінюється.

Перехідний процес при використанні тільки П-закону керування (при  $K_{\text{п}} = 1$ ) у внутрішньому контурі керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості в пакеті Simulink наведено на рис. 4, графік 1.

Видно, що замість усталених обертів 50 об/с такий регулятор міг забезпечити тільки усталені оберти 42,86 об/с (усталена помилка 7,14 об/с), причому перерегулювання вже становило 9,99%. Зменшення  $K_{\text{п}}$  до, наприклад, 0,5 приводить до зменшення перерегулювання, але при цьому збільшується усталена помилка (див. рис. 4, графік 2). Збільшення ж  $K_{\text{п}}$  до, наприклад, 2 приводить до зменшення усталеної помилки, але при цьому збільшується перерегулювання (див. рис. 4, графік 3).

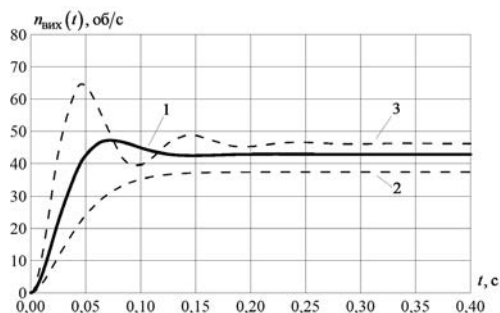


Рис. 4. Перехідний процес при використанні тільки П-закону керування

Зменшити до нуля усталену помилку можливо, якщо додати до П-складової І-складову [4]. Отже, передатна функція внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості (в розімкненому стані) буде наступною:

$$\begin{aligned}
 C(z)G(z) &= (K_{\text{п}} + K_{\text{І}} \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)}) \frac{0,335781z+0,174951}{(z-0,899809)(z-0,150404)} = \\
 &= \frac{(2K_{\text{п}} + K_{\text{І}}\tau) \left( z + \frac{K_{\text{І}}\tau - 2K_{\text{п}}}{2K_{\text{п}} + K_{\text{І}}\tau} \right)}{2(z-1)} \frac{0,335781z+0,174951}{(z-0,899809)(z-0,150404)}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

Компенсуємо один з полюсів  $G(z)$  (нехай це буде полюс, більший за модулем) нулем  $C(z)$ :

$$z + \frac{K_{\text{І}}\tau - 2K_{\text{п}}}{2K_{\text{п}} + K_{\text{І}}\tau} = z - z_1, \quad (14)$$

звідси

$$K_{\text{І}} = K_{\text{п}} \frac{2 - 2z_1}{\tau(z_1 + 1)}. \quad (15)$$

Обираючи певні значення  $K_{\text{п}}$ , можна однозначно визначати  $K_{\text{І}}$ . Перехідний процес при використанні тільки П-закону керування (при  $K_{\text{п}} = 1$ ) у внутрішньому контурі керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості в пакеті Simulink наведено на рис. 5, графік 1.

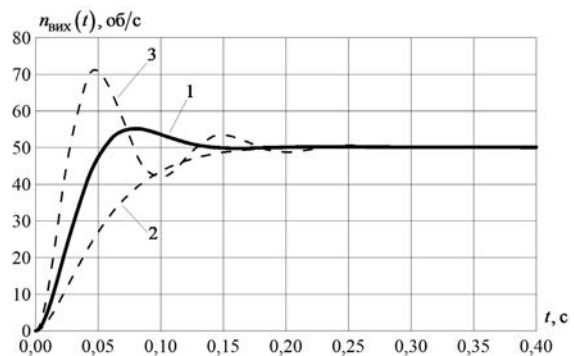


Рис. 5. Перехідний процес при використанні тільки П-закону керування

Як можна було побачити, усталена помилка дійсно відсутня, але перерегулювання є достатньо великим (10,26%). Зменшення  $K_{\text{п}}$  до 0,5 приводить до зменшення перерегулювання, але при цьому збільшується час регулювання (рис. 5, графік 2). І навпаки, при збільшенні  $K_{\text{п}}$  до 2 перерегулювання різко збільшується.

Зменшити перерегулювання можливо, якщо додати до П- і І-складових Д-складову [4]. Отже, передатна функція внутрішнього контуру керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості (в розімкненому стані) буде наступною:

$$\begin{aligned}
 C(z)G(z) &= (K_{\text{п}} + K_{\text{І}} \frac{\tau(z+1)}{2(z-1)} + K_{\text{Д}} \frac{z-1}{\tau z}) \frac{0,335781z+0,174951}{(z-0,899809)(z-0,150404)} = \\
 &= \frac{(2K_{\text{п}}\tau + K_{\text{І}}\tau^2 + 2K_{\text{Д}})z^2 + (-2K_{\text{п}}\tau + K_{\text{І}}\tau^2 - 4K_{\text{Д}})z + 2K_{\text{Д}}}{2\tau z(z-1)}
 \end{aligned}$$

$$\times \frac{0,335781z + 0,174951}{(z - 0,899809)(z - 0,150404)}. \quad (16)$$

Компенсуємо обидва полюси  $G(z)$  нулями  $C(z)$ :

$$z^2 + \frac{-2K_{\text{п}}\tau + K_1\tau^2 - 4K_{\text{д}}}{2K_{\text{п}}\tau + K_1\tau^2 + 2K_{\text{д}}}z + \frac{2K_{\text{д}}}{2K_{\text{п}}\tau + K_1\tau^2 + 2K_{\text{д}}} = (z - z_1)(z - z_2).$$

Отримане рівняння є квадратним рівнянням, в яке входить три незалежних коефіцієнти  $K_{\text{п}}$ ,  $K_1$  і  $K_{\text{д}}$ . Таким чином (так само як і у випадку з ПІ-регулятором), обираючи певні значення  $K_{\text{п}}$ , можна однозначно визначити  $K_1$  і  $K_{\text{д}}$ .

Перехідний процес при використанні ПІД-закону керування (при  $K_{\text{п}} = 1$ ,  $K_1 = 5,18$  с,  $K_{\text{д}} = 0,00329$  с) у внутрішньому контурі керування із зворотним зв'язком по кутовій швидкості в пакеті Simulink наведено на рис. 6, графік 1.

Порівнюючи графіки 1 на рис. 5 і рис. 6 можна побачити, що додавання в ПІД-закон керування Д-складової не дуже суттєво, але все ж таки помітно зменшує як перерегулювання, так і час регулювання (зокрема, перерегулювання зменшилося з 10,26 до 4,65 %).

При зменшенні значення  $K_{\text{п}}$  перехідний процес приймає все більш аперіодичний характер, і вплив Д-складової стає все менш помітним.

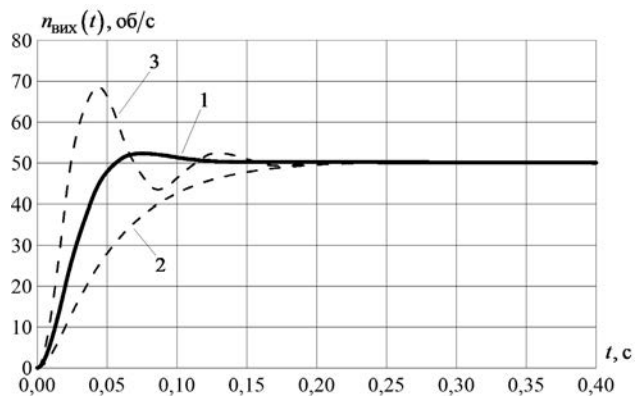


Рис. 6. Перехідний процес при використанні ПІД-закону керування

І навпаки, збільшення значення  $K_{\text{п}}$  приводить до більш коливального перехідного процесу, а зменшення перерегулювання стає більш помітним.

**Висновки.** Проведене дослідження показало, що при правильному проведенні розрахунків цифровий ПІД-регулятор може конкурувати з аналогічними аналоговими ПІД-регуляторами і може бути використаний для керування електромеханічним приводом промислового робота.

#### Список літератури:

1. Ткачук В.І. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму / В.І. Ткачук, І.Є. Біляковський, О.В. Макаручук, Л.В. Каша, О.В. Грещук. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 288 с.
2. Електропривод: Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко, О.Ю. Синівський, Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко; За ред. Ю.М. Лавріненка. К.: Видавництво «Ліра-К», 2009. 504 с.
3. Гоголюк П.Ф. Теорія автоматичного керування. Навч. посіб. / П.Ф. Гоголюк, Т.М. Гречин. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009.
4. Benjamin C. Kuo. Digital Control Systems (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering). Oxford University Press; 2nd edition (June 1, 1995). 784 pages.

#### Lisovets S.M. USE OF DIGITAL PID REGULATOR IN CONTROL CIRCUIT OF ELECTROMECHANICAL DRIVE OF INDUSTRIAL ROBOT

*Industrial robot manipulators are becoming more and more widely used in various industries. This is especially true for industries where monotonous operations need to be performed at all times, which simultaneously require both accuracy and speed. Typical robot manipulators have three to six links that can move relative to each other (adjacent) by rotating or moving. Of course, electromechanical drives are used as drives for such movements, in which DC or AC motors are used. But there is often a need to develop new, non-standard electromechanical drives in conditions when access to technical documentation for modern developments in the field of robotics is absent or difficult to obtain. In the performed study, using the example of an electric DC motor with parameters typical for electromechanical drives and the corresponding typical transmission function, the use of a digital PID regulator as an angular velocity regulator was considered. At the same time, in order to simplify the model of such an engine, the nonlinearities of its mechanical, electrical, magnetic characteristics, etc. were not taken into account (from a practical point of view, such a simplification is permissible). When calculating the adjustment of the digital PID regulator, it was assumed to compensate the poles of the transmission function of the DC electric motor with its zeros, provided that the re-regulation of the transition process will not be more than the specified one. Also, the performed study provides the results of simulation of the electromechanical drive loop model in Simulink, which was carried out by using only a proportional component in the control law, and then by adding integrating and differentiating components to it. As the simulation showed, the integrating component allows you to obtain a transition process without an established error, and the differentiating one to reduce the rearrangement of the transition process.*

**Key words:** DC motor; control loop, second order link, transmission function, robot-manipulator; digital PID controller.