

© Шарейко Д.Ю.<sup>1</sup>, Білюк І.С.<sup>2</sup>, Садовий О.С.<sup>3</sup>, Савченко О.В.<sup>4</sup>,  
Фоменко А.М.<sup>5</sup>, Козаченко А.В.<sup>6</sup>

### МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

*Наведено спосіб модернізації промислових роботів за рахунок використання синхронних сервоелектродвигунів з цифровою системою керування. Цифрова система керування може бути побудована або на основі контролера, або з використанням ЕОМ. Отримана методика розрахунку параметрів цифрового регулятора на задані показники якості керування.*

**Ключові слова:** сервоелектропривод, синхронний двигун, цифровий регулятор, цифрова система керування, логарифмічні амплітудні характеристики (ЛАХ), показники якості керування, частота квантування.

*D.Yu. Shareyko, I.S. Biliuk, O.S. Sadovyy, O.V. Savchenko, A.M. Fomenko, A.V. Kozachenko. Modernization of industrial robots. The method of modernization of industrial robots due to the use of synchronous servo electric motors with a digital control system has been given. The digital control system can be arranged either on the basis of the controller, or with the use of a computer. The method of calculation of the digital regulator parameters to get the set indicators of control quality has been received. The use of digital controllers makes it possible not only to improve the control quality, but also to increase the margin of stability. Modern frequency converters that are part of complete electric drives already contain speed and current regulators. These regulators are arranged on different control principles: PI, PD, PID. The parameters of these controls are set in software and cannot be changed in any other way. An alternative is to use a programmable logic controller (PLC). It is connected through the digital inputs of the frequency converter and can also receive information through the digital outputs of that very frequency converter. However, unlike the fixed controllers, which are part of the frequency converter and are set up according to the specifications of the electric drive in accordance with the known methods of linear systems, the setting-up of the PLC software digital controller requires programming in a special programming language for this controller. In addition, the controller can change the settings of the regulators and the regulation law itself, turning the control system into an adaptive one. Therefore, the solution to the problem of setting-up digital controllers is entirely relevant, especially when connecting an electric drive to a computer. This improves the user's dialogue, making it possible to reset up the parameters of the regulators and the control law. In modern robotic manipulators with stringent requirements for positioning accuracy, synchronous servo electric drives are widely used, which are replacing stepper drives. The exception is electric drives with piezoceramic actuators. But they are used in low-power robots. The paper provides an example of calculating the parameters of a digital controller using the method of logarithmic frequency characteristics.*

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, НУК «Національний університет кораблебудування», м. Миколаїв, [dshareyko.mk@gmail.com](mailto:dshareyko.mk@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, НУК «Національний університет кораблебудування», м. Миколаїв, [ivanbiliuk@gmail.com](mailto:ivanbiliuk@gmail.com)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, ст. викладач, МНАУ «Миколаївський національний аграрний університет», м. Миколаїв, ORCID: 0000-0001-9000-6606, [sadovuyos@mnau.edu.ua](mailto:sadovuyos@mnau.edu.ua)

<sup>4</sup> зав. лабораторіями, НУК «Національний університет кораблебудування», м. Миколаїв, [savchenko1984@gmail.com](mailto:savchenko1984@gmail.com)

<sup>5</sup> доцент, НУК «Національний університет кораблебудування», м. Миколаїв, [fomenko.mk@gmail.com](mailto:fomenko.mk@gmail.com)

<sup>6</sup> зав. відділення, Новобузький коледж МНАУ «Миколаївський національний аграрний університет», м. Новий Буг, [andrey.kozachenko2017@gmail.com](mailto:andrey.kozachenko2017@gmail.com)

**Keywords:** *servoelectric drive, synchronous motor, digital regulator, digital control system, logarithmic amplitude characteristics, control quality indicators, quantization frequency.*

**Постановка проблеми.** Існує два технічних рішення у розв'язку задачі контролю робота послідовної дії координат. Перше рішення – це безпосереднє формування сигналу контролером до вузлу робота. Цій підхід простий та може використовуватися у випадках застосування, наприклад, крокових двигунів. Проте, супроводжується проблемами зупинки механізмів при будь-яких неполадках. Якщо ж застосовувати для цих систем зворотній зв'язок, то це може призвести до дуже тривалих коливальних перехідних процесів. Отже, частіше застосовують розташування на вузлах робота сервомеханізму, який відстежує команди положення контролера. Виходячи з цього, доцільно використовувати цифрову систему керування, яка буде здійснювати керування механізмами робота.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз даних літератури і веб-сайтів, у тому числі провідних зарубіжних компаній (KUKA, FANUC, MITSUBISHI, TOSHIBA, KAWASAKI та ін.), що виробляють роботів, показав, що електропривод зайняв пануюче положення у робототехніці і продовжує інтенсивно розвиватися. Але слід зазначити, що інформація про електричні машини приводів роботів у зарубіжних джерелах зазвичай прихована. У вітчизняних джерелах інформації наявний матеріал не узагальнений і не систематизований [1-8].

Прогрес в областях електроніки і використовуваних в електротехніці матеріалів змінили ситуації в техніці приводу. Досі в сервотехніці застосовувалися в основному двигуни постійного струму з постійними магнітами. Головний недолік двигунів змінного струму в порівнянні з двигунами постійного струму полягав в обмеженій можливості регулювання швидкості. Останні досягнення в області електроніки, особливо в мікроконтролерах, дозволяють компенсувати цей недолік шляхом використання сучасних засобів керування [2-4].

Нині відбувається зміщення акцентів в приводних системах від двигунів постійного струму до двигунів змінного струму. Тенденція переходу до синхронних двигунів змінного струму особливо очевидна в сервосистемах, які майже завжди виконувалися з використанням електроприводів постійного струму [5-7].

Як діє система керування роботом – від точки до точки, або по суцільній траєкторії – залежить від об'єму пам'яті та типу контролера. Проте, в обох випадках важливо відстежувати точність позиціонування. Адаже навіть з використанням руху по заданій траєкторії програмно це все одно здійснюється від точки до точки, з яких створюється траєкторія [1].

**Мета роботи** – покращити динамічні характеристики промислового робота за рахунок застосування синхронних серводвигунів та цифрової системи керування з використанням програмованого контролера або ЕОМ і цифрових регуляторів.

**Виклад основного матеріалу.** Нині відбувається зміщення акцентів в приводних системах від двигунів постійного струму до двигунів змінного струму. Тенденція переходу до синхронних двигунів змінного струму особливо очевидна в сервосистемах, які майже завжди виконувалися з використанням електроприводів постійного струму.

Нові потужні постійні магніти, виготовлені зі сплавів ніодим-залізо-бора і самарій-кобальта, завдяки їх високій енергоємності можуть істотно поліпшити характеристики двигуна одночасним зниженням масо-габаритних показників електричних машин. У результаті покращуються динамічні характеристики приводу і знижуються його габарити.

У сучасній приводній техніці у багатьох випадках пред'являються високі вимоги до:

- похибки позиціонування;
- похибки стабілізації швидкості;
- керування позицією валу;
- широкого діапазону регулювання;
- стабілізації моменту обертання;
- перевантажувальної здатності;
- високої динаміки.

Вимоги до динаміки, тобто поведінки приводу в часі, складаються з процесів обробки, що все прискорюються, збільшенню циклів обробки і пов'язаної з ними продуктивності машини.

Висока точність дуже часто визначає можливість використання систем електроприводу в нових технологіях. Цим вимогам повинні відповідати сучасні високодинамічні системи приводу, які мають назву сервоприводи.

Отже, завдяки високому максимальному моменту  $M_{\max}$  і малому моменту інерції, синхронний двигун має дуже малий час розгону вхолосту, що дозволяє рекомендувати його для динамічних електроприводів. Відокремимо далі переваги і недоліки сервоприводів.

Переваги, які надає використання синхронного серводвигуна:

- відмінна підтримка швидкості (статична точність підтримки швидкості на валу двигуна до 0,01%);

- діапазон регулювання швидкості більше 1:1000;
- відмінні динамічні можливості;
- широкий діапазон регулювання швидкості;
- висока точність позиціонування;
- висока перевантажувальна здатність (3Мн);
- керування за швидкістю, по моменту або по позиції;
- низька вага та компактні розміри.

Недоліки:

- відносно висока вартість системи.

Порівняння питомої потужності асинхронних і синхронних двигунів (відношення потужності до об'єму двигуна) показує, що питома потужність синхронних двигунів в 1,5-3 рази більше питомої потужності асинхронних. З точки зору вартості асинхронний сервопривод має безперечну перевагу при великих потужностях. Вартість синхронних серводвигунів з рідкоземельними магнітами істотно зростає при крутих моментах, більше 20...30 Н·м. Отже, основні переваги синхронних серводвигунів по відношенню до асинхронних – висока динаміка, точність позиціонування і питома потужність, висока перевантажувальна здатність; основний недолік – відносно висока вартість.

Застосування сервопривода замість крокового двигуна обумовлено наступними чинниками:

- використання крокового двигуна супроводжується жорсткими вимогами щодо редуктора механізму;

- відбувається компенсація люфтів у приводі;
- збільшується точність позиціонування;
- збільшується швидкодійність системи керування;
- зменшуються витрати енергії;
- покращується діагностика системи керування.

Як недоліки можна визначити:

- обов'язкова потрібність у датчику положення;
- ускладнюється система керування;
- фіксація елемента здійснюється за рахунок пригальмовування механізму;
- сервоприводи дорожчі.

З приведеного короткого огляду видно, що сервоприводи змінного струму по глибині регулювання швидкості і динаміці керування не поступаються кращим електроприводам постійного струму, а в сукупності з можливостями керування по цифрових каналах фазою, швидкістю, моментом і позицією перевершують не лише двигуни постійного струму, але і крокові двигуни. Технічна цінність високої динаміки керування сервоприводу підвищується ще і завдяки його малим габаритам, а також виключенням необхідності обслуговування електродвигунів. Незважаючи на усі перелічені вище недоліки, гілка синхронних електричних машин найбільш перспективна і найближчий час обіцяє істотний технологічний стрибок. Вже сьогодні є розробки синхронних машин, що мають на порядок поліпшені масогабаритні показники. Ці машини мають абсолютно нову нетрадиційну конструкцію і дуже широкі можливості.

Промисловий робот спроектований по найбільш розповсюдженій і універсальній кінематичній схемі шести рухомого маніпулятора з обертальними кінематичними парами.

Технічні характеристики електропривода:

маса вантажу  $m_{\text{тр}} = 12$  кг;

маса ступеня рухливості  $m_{cn} = 3$  кг;  
кутова швидкість  $\omega = 10,47$  рад/с;  
кутове переміщення  $S_{max} = 720^\circ$ ;  
ексцентриситет відносно вісі привода  $L_{цм} = 0,1$  м;  
передаточне відношення редуктора:  
режим роботи  $i_p = 30$ ;  
ПВ = 80 %.

Основні вимоги до електроприводу:

- відносний статичний перепад швидкості у всьому діапазоні зміни статичного моменту –  $\delta \leq 10\%$ ;
- для зниження кінематичних зусиль при переміщеннях необхідне обмеження прискорення –  $\varepsilon \leq 52,36$  рад/с<sup>2</sup>;
- час пуску не більше 0,2 с;
- діапазон регулювання швидкості  $D$  повинен становити 50:1 для забезпечення точної зупинки приводу;
- допускається зниження живлячої напруги не більше ніж на 10%;
- точність зупинки –  $\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$ .

Статичні моменти в розрахунку на один двигун:

$$M_{c1} = g(m_{ep} + m_{cn})L_{цм}(1 + k_{mp}) = 9,81 \cdot (12 + 3) \cdot 0,1 \cdot (1 + 0,08) = 15,89 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{c2} = |g(m_{ep} + m_{cn})L_{цм}(-1 + k_{mp})| = 9,81 \cdot (12 + 3) \cdot 0,1 \cdot (-1 + 0,08) = 13,53 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Задаємося параметрами тахограми:

- час пуску:  $t_n = 0,2$  с;
- час циклу:  $t_{ц} = 60$  с;
- час роботи на сталій швидкості:

$$t_y = t_{ц} \text{ПВ} - 4t_n = 60 \cdot 0,8 - 4 \cdot 0,2 = 47,2 \text{ с}.$$

Момент інерції  $J$ , кг·м<sup>2</sup>:

$$J = (m_{ep} + m_{cn})L_{цм}^2 = (12 + 3) \cdot 0,1^2 = 0,15.$$

Кутове прискорення  $\varepsilon$ , рад/с<sup>2</sup>:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t_p} = \frac{10,47}{0,2} = 52,36.$$

Динамічний момент  $M_{дин}$ , Н·м:

$$M_{дин} = J\varepsilon = 0,15 \cdot 52,36 = 7,86.$$

Розрахунок еквівалентного моменту  $M_{екв}$  ведеться за умови рівності статичних моментів найбільшому, тому можливо перевертання ступеня рухливості.

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{[(M_{c1} + M_{дин})^2 + (M_{c1} - M_{дин})^2] \cdot 4t_n + M_{c1}^2 t_y}{t_{ц} \text{ПВ}}} =$$

$$\sqrt{\frac{[(15,89 + 7,86)^2 + (15,89 - 7,86)^2] \cdot 4 \cdot 0,2 + 15,89^2 \cdot 47,2}{60 \cdot 0,8}} = 16,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Приведемо еквівалентний момент до ПВ = 80%, тому що номінальний ПВ обраного двигуна складає 100%:

$$M_{екв} = M_{екв} \sqrt{\text{ПВ}} = 16,1 \cdot \sqrt{0,8} = 14,38 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розрахункова потужність двигуна  $P_{роз}$ , Вт:

$$P_{роз} = M_{екв} \omega = 14,38 \cdot 10,47 = 150,64.$$

Умови вибору двигуна:

$$P_{роз} \leq P_n; \omega_{роз} \approx \omega_n.$$

Тахограми і навантажувальна діаграма наведені на рисунку 1.

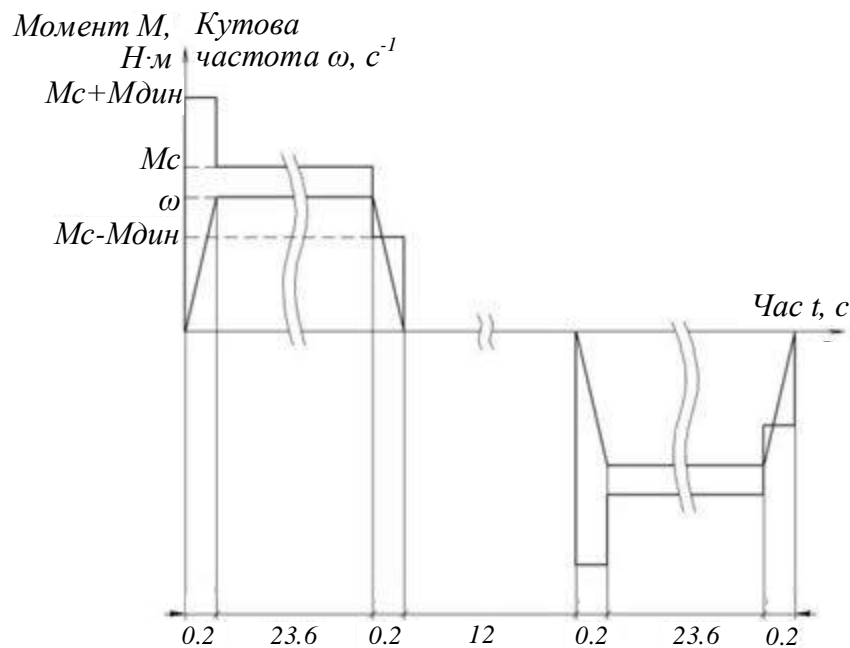


Рис. 1 – Тахограми і навантажувальна діаграма механізму

Виходячи с даного розрахунку, обираємо синхронний серводвигун Estun EMJ-04A потужністю 0,4 кВт, характеристики якого наведені у таблиці.

Таблиця

Технічні характеристики серводвигуна Estun EMJ-04A

Параметр	Значення
Модель серводвигуна	EMJ-04A
Напруга, В	200 АС
Номінальна вихідна потужність, кВт	0,4
Номінальний момент, N·m	1,27
Піковий момент, Н·м	3,82
Номінальний струм, А	2,8
Максимальний струм, А	8,4
Номінальна швидкість, об/хв	3000
Максимальна швидкість, об/хв	4500
Номінальна напруга гальмування, В	24DC ±10%
Номінальна потужність гальмування, Вт	7,2
Утримуючий момент гальмування, Н·м	1,3
Енкодер	Інкрементальний
Стандарт, іпм/об	2500
Енкодер	Абсолютний,
Опція, іпм/об	131072
Робоче середовище	Температура: от 0°C до +40°C, вологість: від 20 до 80% відносної вологості (без конденсації), вібрація: менш ніж 49 м/с <sup>2</sup>
Клас ізоляції	F

Спрощену структурну схему цифрової системи подано на рис. 2. Безперервний сигнал похибки  $\varepsilon(t)$  імпульсним елементом ІЕ1 перетворюється в решітчасту цифрову функцію  $\varepsilon[n]$  і надходить на вхід ЦОМ, яку подано у вигляді передаточної функції  $D(z)$ . Вихідний сигнал

ЦОМ імпульсним елементом ІЕ2 і формувачем імпульсів  $W_{\phi}(p)$  перетворюється в ступінчастий сигнал. Безперервну частину системи подано ланкою з передаточною функцією  $W_{\phi n}(p)$  [8].

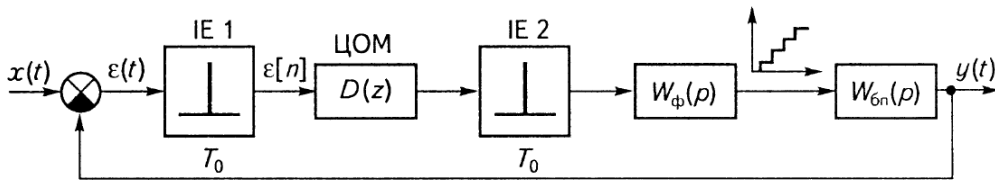


Рис. 2 – Спрощена структурна схема цифрової системи керування

Для керування синхронним двигуном використаємо систему підпорядкованого керування із зворотнім зв'язком за швидкістю. Skorиставшись спрощеною структурною схемою, зображеною на рисунку 2, побудуємо структурну схему керування синхронним двигуном (рис. 3).

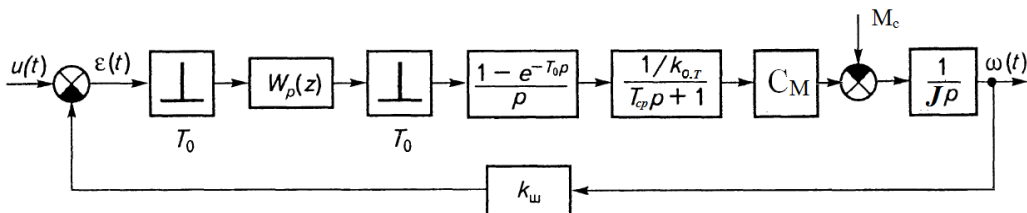


Рис. 3 – Структурна схема цифрової системи керування синхронним двигуном

Виконаємо синтез цифрового регулятора системи автоматичного регулювання синхронного сервоприводу. Одним з найефективніших інженерних методів синтезу систем автоматичного керування є метод, в основу якого покладено використання ЛАХ розімкненої системи. Ідея методу ґрунтується на тому, що для стійких мінімально-фазових систем існує однозначний зв'язок між перехідною характеристикою замкнутої системи і виглядом ЛАХ відповідної розімкненої системи. Виходячи з бажаного вигляду перехідного процесу, будують ЛАХ, яка відповідає такому процесу (бажану ЛАХ). Далі, знаючи вигляд бажаної ЛАХ, до неї наближують ЛАХ вихідної системи, запроваджуючи різні коректувальні пристрої.

Будь-яка система автоматичного регулювання (САР) з електроприводом складається з незмінної частини, до якої належить об'єкт регулювання, електродвигун, силовий керований перетворювач, а також елементи головного зворотного зв'язку та порівняння. Об'єкт регулювання вважається відомим при проектуванні САР, двигун вибирають, виходячи з технологічних характеристик об'єкта. Природно, що ці елементи не підлягають зміні при корекції динамічних властивостей САР. Елементи САР, що не змінюються, визначають ЛАХ вихідної системи. Вимоги до показників якості системи: добротність за швидкістю  $k_v = 50 \text{ c}^{-1}$ , час регулювання, перерегулювання  $\sigma < 25\%$ .

Розрахунок коефіцієнтів передаточної функції.

Прийmemo:  $C_m = \frac{M_{\text{дв}}}{I_{\text{инв}}} = \frac{14,08}{8,4} = 1,71$  – коефіцієнт пропорційності між моментом двигуна та

струмом інвертора.

$$k_{o.m} = \frac{U_{\text{змmax}}}{I_{cm}} ;$$

при умовах:

$$U_{\text{змmax}} \leq 10\text{В};$$

$$I_{cm} = (2 \dots 3) I_n = 2 \cdot I_n = 2 \cdot 2,8 = 5,6\text{А};$$

$$k_{o.m} = \frac{U_{\text{змmax}}}{I_{cm}} = \frac{10}{5,6} = 1,8 \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

Момент інерційності двигуна  $J$ , кг·м<sup>2</sup>:

$$J = (m_{zp} + m_{cn})L_{cm} = (12 + 3) \cdot 0,1 = 0,15.$$

З урахуванням невеликої постійної часу фільтру  $T_\phi$  у колі датчика струму постійна часу  $T_{cp} = 1,5 \cdot 10^{-3}$  с.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю –  $k_{ш} = 0,01$  Ом.

Загальний коефіцієнт підсилення:

$$k = \frac{C_M k_{ш}}{J k_{o,m}} = \frac{1,71 \cdot 0,01}{0,15 \cdot 0,8} = \frac{0,017}{0,27} = 0,06.$$

Передаточна функція безперервної частини системи  $W_{\text{бп}(p)}$ :

$$W_{\text{бп}(p)} = \frac{C_M k_{ш}}{J k_{o,m} (T_{cp} p + 1)}$$

Побудуємо ЛАХ безперервної частини.

Вибираємо період квантування так, щоб злам асимптотичної ЛАХ був ліворуч від частоти

$$\omega = \frac{2}{T_0}.$$

Частота зламу ЛАХ безперервної частини системи становить  $\omega_1$ , с<sup>-1</sup>:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,0015} = 666.$$

Приймаємо  $T_0 = 0,003$  с (умова  $T > 0,5 T_0$  виконується). У низькочастотній зоні  $\omega \approx \lambda$ . Знаходимо абсолютну псевдочастоту зламу асимптотичної ЛАХ  $\lambda$ , с<sup>-1</sup>:

$$\lambda = \frac{2}{T_0} \operatorname{tg} \frac{\omega_1 T_0}{2} = \frac{2}{0,003} \operatorname{tg} \frac{666 \cdot 0,003}{2} = 660,$$

тобто похибка становить усього ~ 2%.

Через те, що високочастотна частина ЛАХ практично не впливає на якість перехідних процесів, під час синтезу коректувальної ланки можна обмежитися спрощеною побудовою ЛАХ приведеної безперервної частини системи  $W_n(j\lambda)$ :

$$W_n(j\lambda) = \frac{\left(1 - j\lambda \frac{T_0}{2}\right) 0,06}{j\lambda(0,0015 j\lambda + 1)}.$$

Побудовану характеристику  $L_n(\lambda)$  зображено на рисунку 4.

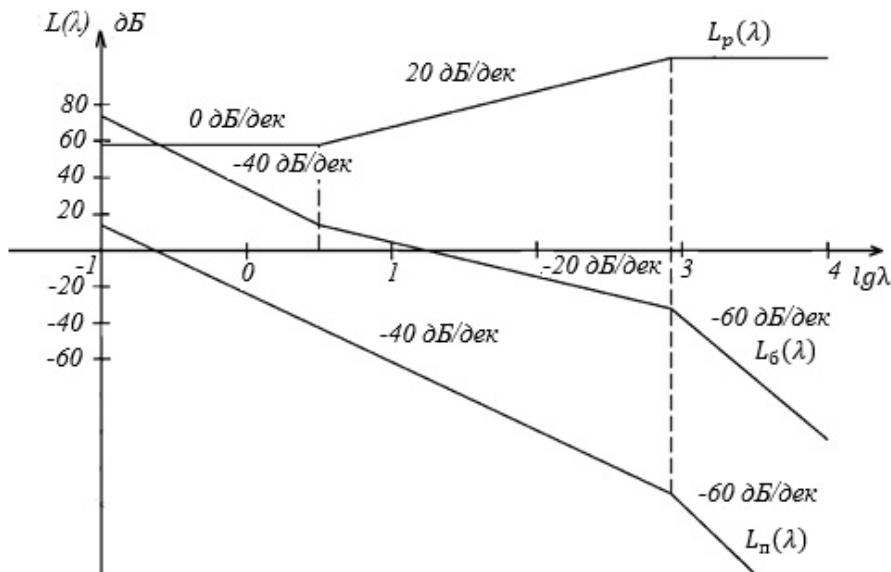


Рис. 4 – Побудова ЛАХ системи

Бажану ЛАХ побудуємо за методикою, що застосовується для безперервних систем. Виходячи із заданої добротності системи за швидкістю, низькочастотну частину ЛАХ  $L_6(\lambda)$  проводимо через точку з координатами  $\lg\lambda = 0$ ,  $L_6(\lambda) = 20$ ,  $\lg k_v = 34$  дБ з нахилом  $-20$  дБ/дек. Виходячи із заданого часу регулювання  $t_p = 0,5$  с і перерегулювання  $\sigma < 25\%$ , визначимо частоту зрізу  $\lambda_3$ ,  $c^{-1}$ :

$$\lambda_3 = \frac{c}{t_p} = \frac{8}{0,5} = 16.$$

де  $c = 8$  – коефіцієнт, що визначається за графіком [8].

Середньочастотну частину  $L_6(\lambda)$  проводимо через точку з координатами  $L(\lambda) = 0$ ,  $\lg\lambda_3$  з нахилом  $-20$  дБ/дек і сполучаємо її з низькочастотною частиною на частоті  $\lg\lambda_2 = 0,5$ ,  $\lambda_2 = 3,2$   $c^{-1}$ .

Виходячи з типу бажаної ЛАХ, частоти сполучення середньочастотної частини з низькочастотною і високочастотною частинами визначаємо з умов:

$$\lambda_3/\lambda_2 = 10; 2 < \lambda_2/\lambda_3 < 4.$$

Високочастотну частину характеристики  $L_6(\lambda)$  проводимо паралельно характеристиці  $L_n(\lambda)$ .

ЛАХ цифрового регулятора  $L_p(\lambda)$  визначається як різниця  $L_6(\lambda) - L_n(\lambda)$ . За виглядом ЛАХ  $L_p(\lambda)$  знаходимо комплексно-частотну функцію

$$W_p(j\lambda) = \frac{794(j\tau_1\lambda + 1)}{j\tau_2\lambda + 1} = \frac{794(j0,31\lambda + 1)}{j0,0015\lambda + 1},$$

в якій  $\lg\lambda_1 = 0,5$ ,  $\lambda_1 = 3,2$   $c^{-1}$ ,  $\tau_1 = 0,31$  с;  $\lg\lambda_2 = 2,8$ ,  $\lambda_2 = 660$   $c^{-1}$ ,  $\tau_2 = 0,0015$  с визначено за характеристикою  $L_p(\lambda)$  (рис. 4).

Виконавши підстановку:

$$j\lambda = \frac{2}{T_0} \frac{z-1}{z+1},$$

дістанемо  $W_p(z)$ :

$$W_p(j\lambda) = \frac{123864z-1}{1985+1}.$$

Цей вираз зведемо до вигляду, зручному для складання різницевого рівняння  $W_p(z)$

$$W_p(z) = \frac{U_p(z)}{\varepsilon(z)} = \frac{62,4z-61,6}{z-0,2} = \frac{62,4-61,6z^{-1}}{1-0,2z^{-1}}.$$

Введемо співмножник  $z^{-1}$ , що забезпечує виконання програми корекції на мікро-ЕОМ у реальному масштабі часу  $\frac{U_p(z)}{\varepsilon(z)}$ :

$$\frac{U_p(z)}{\varepsilon(z)} = \frac{62,4z^{-1}-61,6z^{-2}}{1-0,2z^{-1}}.$$

Запишемо різницеве рівняння корекції

$$U_p[nT_0] = 0,2U_p[n(-1)T_0] + 62,4\varepsilon[(n-1)T_0] - 61,6\varepsilon[(n-2)T_0].$$

У цьому рівнянні  $U_p[nT_0]$  – число, що подається на ЦАП, увімкнений на виході цифрового регулятора;  $\varepsilon[nT_0]$  – число на виході АЦП, що перетворює різницю сигналів завдання і зворотного зв'язку за швидкістю в цифровий код.

Під час обчислення  $U_p[nT_0]$  приймається, що  $U_p[nT_0] = 0$  при  $n < 0$  і функція  $\varepsilon[nT_0]$  прикладається в момент  $n = 0$ . Тоді  $U_p[nT_0]$  обчислюємо у такій послідовності: в кінці першого такту  $n = 1$  і  $U_p[1T_0] = 62,4\varepsilon[0]$ , в кінці другого такту  $n = 2$  і

$$U_p[2T_0] = 0,2U_p[1T_0] + 62,4\varepsilon[1T_0] - 61,6\varepsilon[0].$$

Для дослідження стійкості системи скористуємося пакетом програм Matlab, а саме середовищем Simulink. Опираючись на структурну схему, сформуємо математичну модель системи.



Для реалізації АЦП використаємо ланку екстраполятора нульового порядку, математична модель якого присутня у середовищі Simulink [9]. Формувач імпульсів змодуємо за допомогою цифрового диференціатора та інтегруючої ланки. Цифровий регулятор представляє собою підсилювальну ланку та дискретну передаточну функцію. Загальний вигляд математичної моделі системи зображений на рисунку 5.

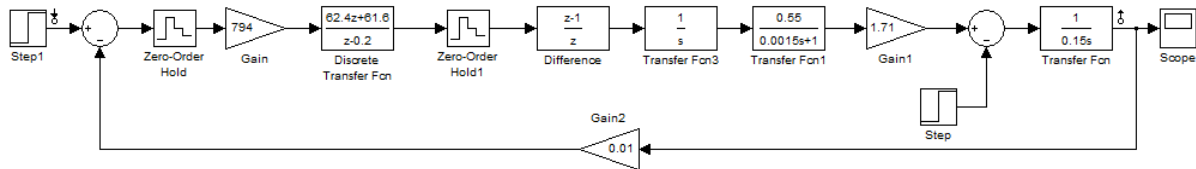


Рис. 5 – Математична модель системи

Результат моделювання перехідних процесів у середовищі Simulink зображений на рисунку 6.

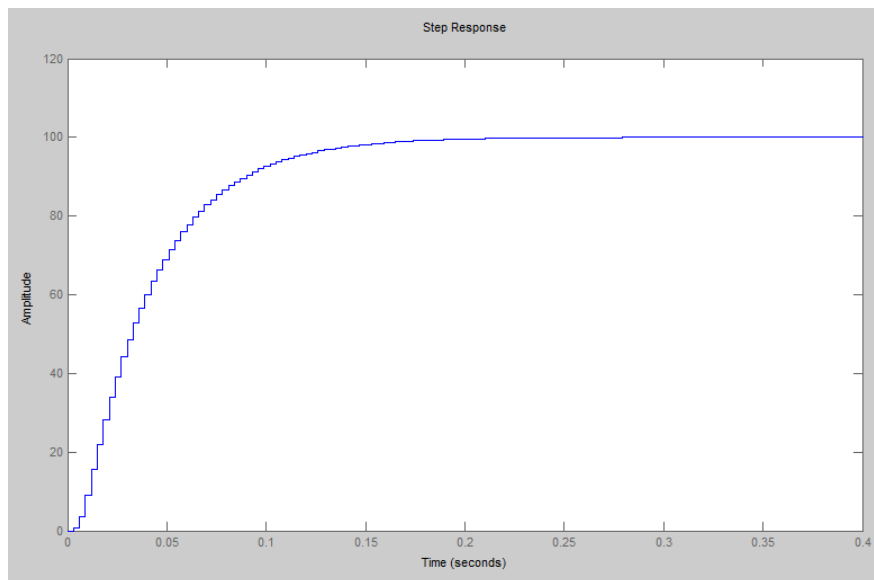


Рис. 6 – Перехідна характеристика системи

З рисунку 6 впливають показники якості керування:

- перегулювання складає  $\sigma = 0\%$ ;
- час перехідного процесу  $t_p = 0,15$  с.

### Висновки

1. Наведено спосіб удосконалення промислових роботів з жорсткими вимогами до точності позиціонування.
2. Застосування цифрової системи керування дозволить гнучко змінювати алгоритм керування.
3. Використання цифрового регулятора дозволить поліпшити показники якості керування електроприводом разом на відміну від звичайних лінійних систем, які розповсюджені в роботах.

### Перелік використаних джерел:

1. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов / О.П. Михайлов. – М. : Машиностроение, 1990. – 302 с.
2. Фоменко А.М. Комплектні електроприводи : у 3 ч. Ч. 1. Аналогові комплектні електропри-

- води : навч. посібник / А.М. Фоменко, Д.Ю. Шарейко. – Миколаїв : НУК, 2010. – 144 с.
3. Фоменко А.М. Комплектні електроприводи : у 3 ч. Ч. 2. Цифрові комплектні електроприводи: навч. посібник / А.М. Фоменко, Д.Ю. Шарейко. – Миколаїв : НУК, 2014. – 32 с.
  4. Шарейко Д.Ю. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Комплектні електроприводи» : у 3 ч. Ч. 1. / Д.Ю. Шарейко, А.М. Фоменко. – Миколаїв : НУК, 2014. – 32 с.
  5. Білюк І.С. Комплектні електроприводи : у 3 ч. Ч. 3. Сервоелектроприводи : навчальний посібник / І.С. Білюк, Д.Ю. Шарейко, А.М. Фоменко, О.В. Савченко. – Миколаїв : НУК, 2018. – 210 с.
  6. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Н.Л. Рассудов. – 3-е изд., испр. – М. : Академия, 2007. – 576 с.
  7. Ловыгин А.А. Современный станок с ЧПУ и САД/САМ система / А.А. Ловыгин, А.В. Васильев, С.Ю. Кривцов. – М. : Литкон-Пресс, Эльф ИПР, 2006. – 286 с.
  8. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков. – Київ : Либідь, 2005. – 680 с.
  9. Дашенко А.Ф. MATHLAB в инженерных и научных расчетах / А.Ф. Дашенко, В.Ф. Кириллов, Л.В. Коломиец, В.Ф. Оробей. – Одесса : Астропринт, 2003. – 212 с.

#### References:

1. Mikhaylov O.P. *Avtomatizirovannyi elektropriwod stankov i promyshlennykh robotov* [Automated electric drive of machine tools and industrial robots]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 302 p. (Rus.)
2. Fomenko A.M., Shareyko D.Yu. 2010. *Komplektni elektroprivodi: u 3 ch. Ch. 1: Analogovi komplektni elektroprivodi: navchal'niy posibnik* [Complete set of electric drives: in 3 parts. Part 1: Analogs of set of electric drives]. Mikolaiv, NUK Publ., 2010. 144 p. (Ukr.)
3. Fomenko A.M., Shareyko D.Yu. *Komplektni elektroprivodi: u 3 ch. Ch. 2: Tsifrovi komplektni elektroprivodi: navchal'niy posibnik* [Complete set of electric drives: in 3 parts. Part 2: Digital set of electric drives] Mikolaiv, NUK Publ., 2014. 32 p. (Ukr.)
4. Shareyko D.Yu., Fomenko A.M. *Metodichni vkazivki do vikonannya laboratornikh robit z kursu «Komplektni elektroprivodi», chastina 1* [Methodical instructions for laboratory work on the course «Complete electric drives», part 1]. Mikolaiv, NUK Publ, 2014. 32 p. (Ukr.)
5. Bilyuk I.S., Shareyko D.Yu., Fomenko A.M., Savchenko O.V. *Komplektni elektroprivodi. Ch. 3: Servoelektroprivodi* [Complete electric drives. Part 3: Servoelektroprivodi]. Mikolaiv, NUK Publ., 2018. 210 p. (Ukr.)
6. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov N.L. *Avtomatizirovannyi elektropriwod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov: uchebnik dlya stud.* [Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes: a textbook for students]. Moscow, Academy Publ., 2007. 576 p. (Rus.)
7. Lovygin A.A., Vasiliev A.V., Krivtsov S.Yu. *Sovremennyi stanok s ChPU i CAD/CAM sistema* [Modern CNC machine and CAD / CAM system]. Moscow, Litkon-Press, El'f IPR Publ., 2006. 286 p. (Rus.)
8. Popovich M.G., Lozinsky O.Yu., Klepikov V.B. *Elektromekhanichni sistemi avtomatichnogo keruvannya ta elektroprivodi* [Electromechanical automatic control systems and electric drives]. Kiev, Libid Publ, 2005. 680 p. (Ukr.)
9. Dashchenko A.F., Kirillov V.F., Kolomiets L.V., Orobei V.F. *MATHLAB v inzhenernykh i nauchnykh raschetakh* [MATHLAB in engineering and scientific calculations]. Odessa, Astroprint Publ., 2003. 212 p. (Rus.)

Рецензент: І.П. Атаманюк

д-р техн. наук, проф., Миколаївський національний аграрний університет

Стаття надійшла 01.10.2020