

*Лісовець С.М.*

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ В КОНТУРІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА ПО ПОЛОЖЕННЮ

Однією із задач, які необхідно вирішувати під час проектування і подальшої експлуатації промислових маніпуляційних роботів, в тому числі у складі робототехнічних систем та комплексів, є утримання (часто фіксація) робочого органу маніпулятора в заданому положенні протягом заданого часового проміжку із заданою точністю. Це пов'язано, насамперед, із зміною умов роботи промислового маніпуляційного робота (наявність вібрації, ударів, поштовхів), пружною піддатливістю його кінематичного ланцюга і зміною маси його робочого органу (наприклад, внаслідок заміни інструмента, який є складовою частиною робочого органу). З трьох основних способів вирішення такої задачі, перші два з яких полягають у використанні фіксуючих і самогальмівних елементів, найбільш доцільним є відслідковування заданого положення за рахунок роботи контуру керування електромеханічним приводом. Головною особливістю роботи такого контуру є наявність зони нечутливості, в основному пов'язана з обмеженою роздільною здатністю датчика положення. Внаслідок такої роботи робочий орган починає здійснювати в "околиці" точки позиціонування періодичні (квазіперіодичні) рухи, подібні до автоколиваний. При правильному налаштуванні такі рухи не будуть перевищувати заданої точності, і робота контуру керування буде коректною. У виконаному дослідженні здійснено розрахунок контуру керування згідно з критерієм стійкості Михайлова і методом гармонічної лінеаризації, в результаті якого було отримано амплітуду і частоту автоколиваний в такому контурі. Одночасно з цим було виконано симуляцію цього ж контуру у вигляді моделі в Simulink. Результати розрахунку, незважаючи на його наближеність, і симуляції збіглися в межах допустимої похибки. Крім цього, було встановлено, що отримані в результаті розрахунку і симуляції параметри автоколиваний є близькими до параметрів автоколиваний однієї з координат багатопільового робота «Універсал-5», отриманих іншими авторами.

**Ключові слова:** автоколивання, електромеханічний привід, контур керування, метод гармонічної лінеаризації, промисловий маніпуляційний робот, система позиціонування.

**Постановка проблеми.** Системи позиціонування сучасних промислових маніпуляційних роботів використовують переважно електромеханічні приводи, в яких застосовуються електричні двигуни постійного (колекторні чи безколекторні) або змінного струмів. Основними задачами робота, який має маніпулятор, є переміщення робочого органу маніпулятора в задане положення (разом з деталлю або інструментом, які таким органом утримуються) і утримання робочого органу маніпулятора в заданому положенні протягом заданого часового проміжку. В таких системах навантаження на робочий орган внаслідок виконання певних виробничих операцій може бути змінено в будь-який час (наприклад, внаслідок зменшення маси фарби в фарборозпилювачі), через що його положення також буде змінено відносно заданого. Абсолютна похибка позиціонування (орієнтування) робочого органу при цьому може значно збільшитись і перевищити допустиме значення. Для того, щоб надійно позиціону-

вати (орієнтувати) робочий орган, використовуються три основні способи.

Згідно з першим способом, для цього використовуються різні фіксуєчі елементи (муфти, гальма і так далі). В такому випадку, особливо при виникненні нештатних або аварійних ситуацій, робочий орган буде надійно зафіксований. Але такі елементи значно ускладнюють конструкцію маніпуляційного робота, а іноді їх встановлення і використання є технічно неможливими. Згідно з другим способом, використовуються різні самогальмівні елементи. Але в такому випадку може в кілька раз збільшитись "сухе" тертя, внаслідок чого керування положенням робочого органу значно ускладниться. Згідно з третім способом, який є найбільш ефективним і який застосовується в сучасній робототехніці найчастіше, вал електричного двигуна (і, відповідно, вал механічного редуктора) утримується в заданому положенні за рахунок роботи контуру керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота по положенню.

Маніпуляційний робот, який має певну кількість ступенів свободи, звичайно має таку ж кількість електромеханічних приводів і контурів керування такими приводами. Отже, робота одного (рідше кількох) з таких контурів призводить до того, що робочий орган постійно знаходиться в «околиці» потрібної точки позиціонування, здійснюючи періодичні (квазіперіодичні) рухи, подібні до автоколивань. Так як динаміка таких рухів має явно нелінійний характер, то її дослідження представляє собою достатньо актуальну задачу [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо, що одним з основних недоліків позиціонування робочого органу за рахунок автоколивань є підвищені вимоги до точності датчика положення. Але, наприклад, типовий сучасний датчик кутового положення RCS 3100 виробництва ATEK Electronics Sensor Technologies Inc. вартістю не більше \$100 (див. рис. 1) забезпечує повторюваність вимірювання кутового положення не гірше  $\pm 0,1^\circ$ , що при довжині останньої ланки маніпулятора 0,5 м забезпечує повторюваність лінійного положення робочого органу не гірше приблизно  $\pm 0,9$  мм – для багатьох практичних застосувань така точність є достатньою.



Рис. 1. Зовнішній вигляд датчика кутового положення RCS 3100

Мета роботи полягала в розрахунку режимів роботи і подальшій симуляції у вигляді моделі в Simulink контуру керування електромеханічним приводом промислового робота по положенню, регулятор положення якого має нелінійності у вигляді зони нечутливості (а часто і гістерезису) і обмежень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Спрощена структура контуру керування електромеханічним приводом промислового робота по положенню наведена на рис. 2.

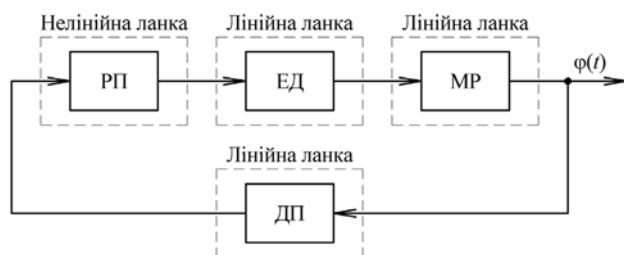


Рис. 2. Спрощена структура контуру керування електромеханічним приводом промислового робота по положенню

При цьому було припущено наступне: по-перше, такий контур керування дозволяє керувати кутовим положенням електромеханічного приводу  $\varphi(t)$ , а по-друге, точка позиціонування може бути будь-якою в діапазоні допустимих кутів повороту електромеханічного приводу, і розглядаються тільки рухи в «околиці» такої точки.

Така структура складається з регулятора положення (РП), електричного двигуна (ЕД), механічного редуктора (МР) і датчика положення (ДП). З точки зору теорії автоматичного керування, регулятор положення є нелінійною ланкою, а електричний двигун, механічний редуктор і датчик положення – лінійними ланками. Структура регулятора положення з нелінійністю у вигляді зони нечутливості наведена на рис. 3.

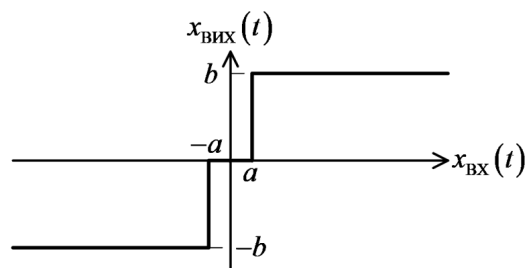


Рис. 3. Структура одного з найпростіших регуляторів положення

Регулятор положення являє собою типову нелінійну ланку з двома видами симетричних відносно відповідних координатних осей обмежень: відносно осі ординат він має для вхідного сигналу  $x_{вх}(t)$  зону нечутливості шириною  $\pm a$ , а відносно осі абсцис він має для вхідного сигналу  $x_{вих}(t)$  обмеження на рівні  $\pm b$  [2]. Така ланка може бути реалізована як у вигляді аналогової електричної схеми, так і у вигляді програмного коду в мікропроцесорі / мікроконтролері.

Згідно з методом гармонічної лінеаризації (який є достатньо точним, але принципово є наближенням), в контурі керування кутовим положенням існують коливання з незмінною амплітудою і частотою (автоколивання), форма яких є гармонійною внаслідок того, що лінійні ланки (всі або їх частина) такого контуру виконують роль фільтра основної гармоніки [3, 4, 5]. Коефіцієнт передачі регулятора положення  $K_{рп}$  на основній гармоніці є однозначною функцією амплітуди такої гармоніки  $A$  на своєму вході:

$$K_{рп}(A) = \frac{4b}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}. \quad (1)$$

Наприклад, на рис. 4 наведено залежність  $K_{рп}(A)$  при  $a = 0,1$  і  $b = 1$ .

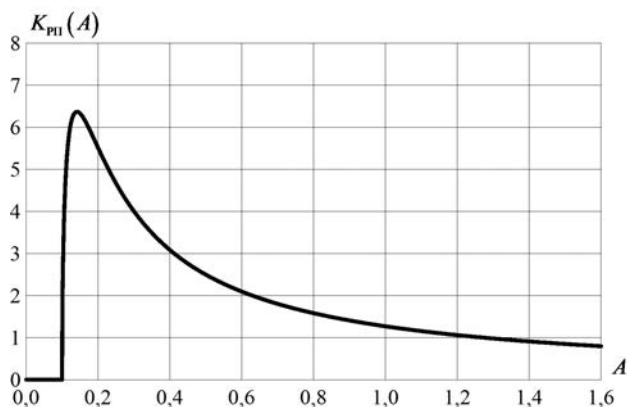


Рис. 4. Залежність  $K_{PP}(A)$  при  $a = 0,1$  і  $b = 1$

При інших значеннях  $a$  і  $b$  залежність  $K_{PP}(A)$  буде мати вигляд, аналогічний наведеному на рис. 4. Відповідно, передатна функція  $W_{PP}(s, A)$  буде такою:

$$W_{PP}(s, A) = K_{PP}(A), \quad (2)$$

або ж

$$W_{PP}(s, A) = \frac{4b}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}. \quad (3)$$

Передатну функцію  $W_{ED}(s)$  електричного двигуна (як аперіодичної ланки 2-го порядку) можна представити наступним чином:

$$W_{ED}(s) = \frac{K_{ED}}{(T_{ED}^{MEX} s + 1)(T_{ED}^{MAG} s + 1)}, \quad (4)$$

де  $K_{ED}$  – коефіцієнт передачі;  $T_{ED}^{MEX}$  – електроємнісна стала;  $T_{ED}^{MAG}$  – електромагнітна стала.

А передатну функцію  $W_{MP}(s)$  механічного редуктора (як інтегруючої ланки) таким чином:

$$W_{MP}(s) = \frac{K_{MP}}{s}, \quad (5)$$

де  $K_{MP}$  – коефіцієнт передачі.

Якщо прийняти, що датчик положення реалізує одиничний від'ємний зворотний зв'язок, то його передатна функція  $W_{DP}(s)$  буде такою:

$$W_{DP}(s) = 1. \quad (6)$$

Отже, з урахуванням визначеності передатних функцій контур керування електромеханічним приводом матиме вигляд, наведений на рис. 5. Звідси можна отримати, що в розімкненому стані передатна функція  $W_{PO3}(s, A)$  контуру керування кутовим положенням буде такою:

$$W_{PO3}(s, A) = W_{PP}(s, A) W_{ED}(s) W_{DP}(s) W_{MP}(s) = \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{(T_{ED}^{MEX} s + 1)(T_{ED}^{MAG} s + 1) s}. \quad (7)$$

Відповідно, в замкненому стані передатна функція  $W_{ZAMK}(s, A)$  такого контуру буде такою:

$$W_{ZAMK}(s, A) = \frac{W_{PP}(s, A) W_{ED}(s) W_{DP}(s) W_{MP}(s)}{1 + W_{PP}(s, A) W_{ED}(s) W_{DP}(s) W_{MP}(s)} = (8)$$

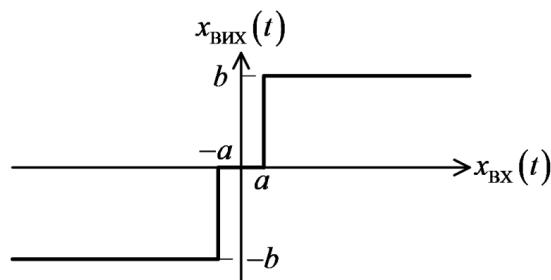


Рис. 5. Контур керування кутовим положенням з урахуванням визначеності передатних функцій

$$\begin{aligned} &= \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{(T_{ED}^{MEX} s + 1)(T_{ED}^{MAG} s + 1) s} = \\ &= \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{1 + \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{(T_{ED}^{MEX} s + 1)(T_{ED}^{MAG} s + 1) s}} = \\ &= \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{(T_{ED}^{MEX} s + 1)(T_{ED}^{MAG} s + 1) s + K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}} = \\ &= \frac{K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}{T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} s^3 + (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) s^2 + s + K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}}. \end{aligned}$$

Характеристичний поліном  $H(s)$  такої передатної функції має наступний вигляд:

$$T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} s^3 + (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) s^2 + s + K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP}. \quad (9)$$

Підставляючи  $j\omega$  замість  $s$ , можна отримати  $H(j\omega)$  в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} (j\omega)^3 + (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) (j\omega)^2 + j\omega + K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP} = \\ &= (K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP} - (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) \omega^2) + j(\omega - T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} \omega^3). \end{aligned} \quad (10)$$

Згідно з критерієм стійкості Михайлова для неперервних лінійних систем керування, для знаходження контуру керування кутовим положенням на межі стійкості (в автоколивальному режимі роботи) характеристичний поліном  $H(j\omega)$  (крива Михайлова) повинен проходити через точку з координатами  $(0,0)$  (початок координат комплексної площини). Виходячи з цього, було отримано наступну систему з двох рівнянь:

$$\begin{cases} K_{PP}(A) K_{ED} K_{MP} - (T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}) \omega^2 = 0; \\ \omega - T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG} \omega^3 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

З другого рівняння системи (11) випливало, що колова частота

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG}}}. \quad (12)$$

Підставляючи рівняння (12) в перше рівняння системи (11), можна було отримати, що

$$K_{PP}(A) = \frac{T_{ED}^{MEX} + T_{ED}^{MAG}}{K_{ED} K_{MP} T_{ED}^{MEX} T_{ED}^{MAG}}. \quad (13)$$

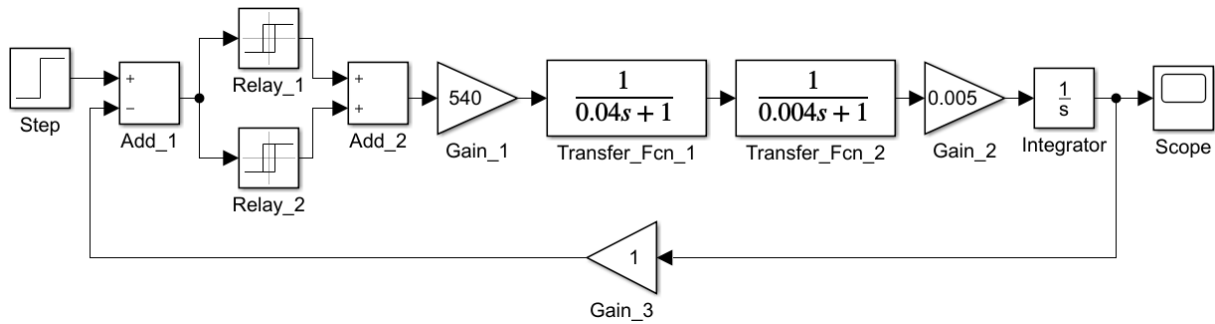


Рис. 6. Модель контуру керування електромеханічним приводом

Було розглянуто типовий електромеханічний привод промислового маніпуляційного робота. Для зручності розрахунків і моделювання кутові величини було застосовано в градусах, а регулятор положення був аналоговим і його параметри  $a$  і  $b$  були задані в вольтах. Було прийнято, що напруга живлення електричного двигуна становить 60 В і  $K_{\text{ЕД}} = 540 \text{ }^\circ/(\text{В} \cdot \text{с})$  – тобто при зміні напруги на 1 В швидкість обертання електричного двигуна зміниться на 540  $^\circ/\text{с}$  (1,5 об/с або 90 об/хв), і при напрузі 60 В становитиме 32400  $^\circ/\text{с}$  (90 об/с або 5400 об/хв). Крім цього, було прийнято, що  $T_{\text{ЕД}}^{\text{МЕХ}} = 0,04 \text{ с}$  і  $T_{\text{ЕД}}^{\text{МАГ}} = 0,004 \text{ с}$  та  $K_{\text{МР}} = 0,005$  (тобто механічний редуктор має коефіцієнт передачі 1:200), а також що коефіцієнт передачі датчика положення становить 1 В/ $^\circ$ . Також було визначено зону нечутливості регулятора положення як  $a = \pm 0,1 \text{ В}$  (тобто  $\pm 0,1 \text{ }^\circ$ ), а його керувальний вплив як  $b = \pm 60 \text{ В}$  (тобто в межах напруги живлення).

В результаті виконання розрахунку колової частоти  $\omega$  і амплітуди  $A$  автоколивань, згідно з формулою (12), було отримано, що колова частота автоколивань

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{0,04 \text{ с} \cdot 0,004 \text{ с}}} = 79,1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (14)$$

що відповідає частоті автоколивань  $f = 12,6 \text{ Гц}$  і періоду автоколивань  $T = 0,0795 \text{ с}$ . Згідно з формулою (13) було отримано, що коефіцієнт передачі регулятора положення

$$K_{\text{РП}}(A) = \frac{0,04 \text{ с} + 0,004 \text{ с}}{540 \cdot 0,005 \cdot 0,04 \text{ с} \cdot 0,004 \text{ с}} = 101,9. \quad (15)$$

Таким чином, згідно з формулою (1), мали наступне нелінійне рівняння:

$$101,9 = \frac{4 \cdot 60}{3,1416 \cdot A} \sqrt{1 - \frac{0,1^2}{A^2}}, \quad (16)$$

розв'язання якого дало  $A = 0,743$ .

Моделювання, в свою чергу, дало значення частоти автоколивань  $f = 12,1 \text{ Гц}$  і періоду автоколивань  $T = 0,0826 \text{ с}$  та амплітуди авто-

коливань  $A = 0,784$ . Враховуючи те, що формула (1) (а також інші формули, пов'язані з нею) є не точною, а наближеною, можна вважати, що результати розрахунків і моделювання співпали достатньо точно. Модель контуру керування електромеханічним приводом в Simulink наведена на рис. 6.

Автоколивання в контурі керування електромеханічним приводом, отримані в Simulink при  $\varphi_{\text{ВХ}}(t) = 15 \text{ }^\circ$ , наведені на рис. 7. Необхідно зауважити, що в залежності від налаштувань регулятора положення перехідний процес в такому контурі може бути не тільки автоколивальним, але й із загасаючими коливаннями або аперіодичним.

Отримані в результат розрахунку і моделювання параметри автоколивань є близькими до параметрів автоколивань однієї з координат багатопільового робота «Універсал-5», отриманих іншими авторами.

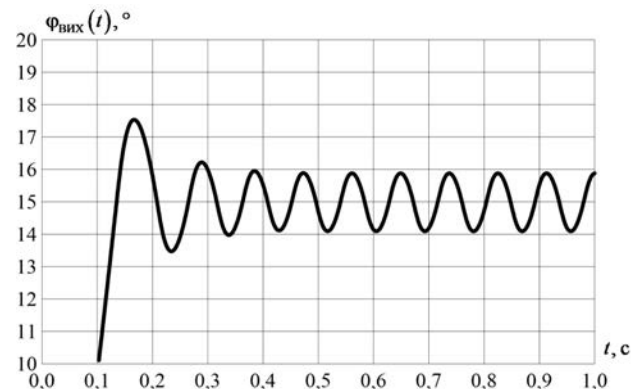


Рис. 7. Автоколивання в контурі керування електромеханічним приводом

**Висновки.** В проведеному дослідженні, використовуючи критерій стійкості Михайлова і метод гармонічної лінеаризації, показано, що утримання робочого органу маніпулятора в заданому положенні за рахунок роботи контуру керування електромеханічним приводом є одним з дієвих способів керування промисловим маніпуляційним роботом.

**Список літератури:**

1. Луцька Н.М. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами. Монографія / Н.М. Луцька, А.П. Ладанюк. К.: Видавництво Ліра-К, 2015. 288 с.
2. Alberto Isidori. Nonlinear Control Systems (3rd edition). Springer London. 1995. Pp. 1–549.
3. Гоголюк П.Ф. Теорія автоматичного керування. Навч. посіб. / П.Ф. Гоголюк, Т.М. Гречин. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. 279 с.
4. Корчемний М.О. Теоретичні основи автоматики. Навч. посібн. / М.О. Корчемний, П.Б. Клендій, М.В. Потапенко. Тернопіль: Навчальна книга-Богдан, 2011. 304 с.
5. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. К.: Либідь, 1997. 544 с.

**Lisovets S.M. RESEARCH OF AUTO-OSCILLATIONS IN THE CONTROL CIRCUIT OF THE ELECTROMECHANICAL DRIVE OF THE INDUSTRIAL MANIPULATION ROBOT BY POSITION**

*One of the tasks that must be solved during the design and further operation of industrial manipulation robots, including as part of robotic systems and complexes, is to maintain (often fix) the working body of the manipulator in a given position during a given time interval with a given accuracy. This is primarily due to a change in the operating conditions of an industrial manipulation robot (the presence of vibrations, shocks, jerks), the elastic flexibility of its kinematic chain and a change in the mass of its working body (for example, due to the replacement of a tool that is a component of the working body). Of the three main methods of solving such a problem, the first two of which consist in the use of locking and self-braking elements, the most appropriate is the tracking of the given position due to the operation of the control circuit of the electromechanical drive. The main feature of the operation of such a circuit is the presence of an insensitivity zone, mainly associated with the limited resolution of the position sensor. As a result of such work, the working body begins to make periodic (quasi-periodic) movements similar to self-oscillations in the “neighborhood” of the positioning point. With proper adjustment, such movements will not exceed the specified accuracy, and the operation of the control circuit will be correct. In the performed study, the calculation of the control circuit was carried out according to the Mikhailov stability criterion and the method of harmonic linearization, as a result of which the amplitude and frequency of self-oscillations in such a circuit were obtained. At the same time, the simulation of the same circuit was performed in the form of a model in Simulink. The results of the calculation, despite its approximation, and the simulations coincided within the permissible error. In addition, it was established that the self-oscillation parameters obtained as a result of calculation and simulation are close to the self-oscillation parameters of one of the coordinates of the «Universal-5» multi-purpose robot obtained by other authors.*

**Key words:** *self-oscillation, electromechanical drive, control loop, harmonic linearization method, industrial manipulation robot, positioning system.*