

# Дослідження системи керування кроковим електроприводом робота

О.Васильєв, к.т.н., Е. Швець, к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені Макарова, інститут автоматичної і електротехніки  
54025 м. Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9

**Abstract:** The paper provides the description of a schema and work principles of a step electric drive control system of an up rated robot. There are also described the functional schema and the schema of a power section of the system.

**Key words:** industrial robot, control system, step electric drive.

Зараз у промисловості використовується велика кількість роботів та маніпуляторів виробництва 80-90 років [1,2]. При побудові сучасних систем автоматизації виробництва використовувати ці пристрої економічно більш доцільно, ніж закуповувати комплекти сучасних роботизованих систем.

При модернізації робота МП10П.62.01 для забезпечення 4-го ступеня рухомості замість неповноповоротного пневмоприводу встановлений привід на базі крокового двигуна.

Системи з кроковим приводом при дискретному керуванні від ЕОМ більш компактні, надійні і точні. Процес заміни звичайних виконавчих механізмів у цифрових системах керування кроковими двигунами (КД) обумовлений також усталеною роботою останніх при впливі несприятливих кліматичних факторів, механічних перевантажень і інших збурювальних впливів.

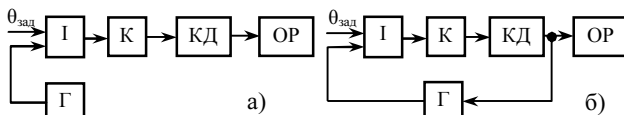


Рис.1. Функціональні схеми розімкнутого а) і локально замкнутого б) крокового приводу  
ОР – об'єкта регулювання; КД – кроковий двигун; К – комутатор; І – суматор; Г – генератор;  $\theta_{зад}$  – задавальний вплив

Найбільш широке застосування одержав у слідкуючих системах, розімкнутий кроковий електропривод (рис.1,а), у якому вихідна величина (кутове або лінійне переміщення) визначається тільки частотою і числом імпульсних посилок на вході. Для забезпечення стійкого руху і збереження отриманої інформації в такому приводі статична і динамічна помилки обмежуються значеннями, що залежать від ціни кроку і числа тактів комутації двигуна.

Загальна тенденція підвищення вимог до точності і швидкості слідкуючих систем, привела до розробки як нових методів керування КД, так і структур, що реалізують ці методи. Якщо спочатку розроблювачів влаштовував кроковий привід з малим споживанням енергії у варіанті з розімкнутою структурою (двигун і комутатор), що забезпечує достатню швидкість відпрацьовування в слідкуючому режимі, і прийнятну дискретність у режимі позиціонування, то надалі пошуки вирішення протиріччя між дискретністю і шви-

дістю виконавчого вала привели до розробки методу електричного дроблення кроку КД. Електрична редукція кроку КД дозволяє підвищити точність позиціонування системи, однак розширити частотний діапазон роботи крокового приводу в режимі спостереження можна тільки за рахунок збільшення динамічної помилки. Технічно задача вирішується локально замкнутим кроковим приводом, що відрізняється від розімкнутого тим, що на валу КД є датчик (рис.1,б), вихід якого включений на вхід комутатора двигуна.

При наявності зовнішнього сигналу двигун починає обертатися під дією імпульсів, що просувають, з датчика, прискорюючи як машина постійного струму. У цьому режимі усуваються обмеження по динамічній помилці, що дозволяє формувати траєкторію руху по оптимальному закону, тому що положення ротора в полі статора постійно контролюється, і поле статора переключасться таким чином, що енергія, яка впливає на ротор, увесь час максимальна.

За законом регулювання всі слідкуючі системи, можна розділити на релейні, пропорційні і оптимальні по швидкодії. Релейний і пропорційний закони регулювання можуть бути реалізовані при використанні в слідкуючій системі, як розімкнутого, так і локально замкнутого крокового приводу. Оптимальна по швидкодії система використовує контроль по швидкості ротора двигуна, тому може бути реалізована тільки з локально замкнутим приводом.

Розімкнутий кроковий електропривод у слідкуючій системі, і з релейним, і з пропорційним законами регулювання може використовуватися як у режимі роботи з основним кроком, так і при штучному дробленні кроку. У релейній слідкуючій системі, може бути використаний стартозупинний режим на основному або дробовому кроці, а також режим програмного розгону двигуна на робочу частоту.

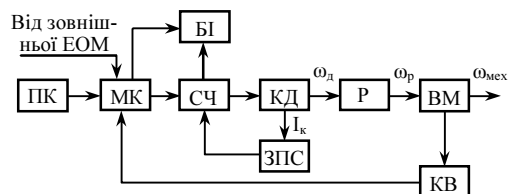


Рис.2. Функціональна схема системи керування кроковим двигуном. ПК – пульт керування; МК – мікроконтролер; СЧ – силова частина; КД – кроковий двигун; Р – редуктор; ВМ – виконавчий механізм; БІ – блок індикації; ЗПС – блок захисту по струму; КВ – кінцеві вимикачі

Локально замкнутий кроковий привід у слідкуючих системах, використовується, як правило, у режимі роботи з основним кроком двигуна. І, нарешті, широкі можливості відкриваються при використанні перемінних структур, що реалізуються гнучкою змі-

ною дискретності двигуна в залежності від режиму роботи слідкуючої системи, переведенням розімкнутого крокового приводу в локально замкнутий і т.д.

Функціональна схема системи керування кроковим електроприводом зображена на рис.2.

Керування здійснюється за допомогою мікроконтролера (МК), який отримує сигнали від пульта керування та від кінцевих вимикачів. У схемі передбачена можливість керування від зовнішньої ЕОМ.

На рис.3. наведена силова частина системи, яка підсилює імпульси, що надходять з мікроконтролера.

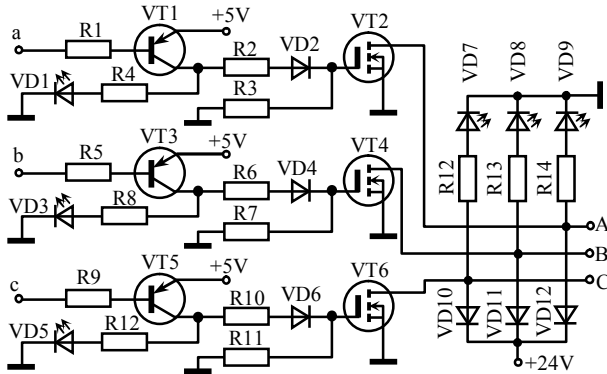


Рис.3. Силова частина принципової електричної схеми системи керування

Силовая частина складається з трьох однакових каналів, по одному на кожен фазу. Кожен канал зібраний на біполярному транзисторі VT1, (VT3, VT5), та польовому транзисторі VT2, (VT4, VT6).

Математичний опис поведінки  $m$ -фазного КД описується системою з  $m+1$  рівнянь, причому  $m$  рівнянь електричної рівноваги й одне рівняння руху ротора:

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e; \quad (1)$$

$$J_{\text{пр}} \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + K \frac{d\alpha(t)}{dt} + F \frac{d\alpha(t)}{dt} + M_{\text{н}}(t) = M(t), \quad (2)$$

де  $u(t)$ ,  $i(t)$  - миттєві значення напруг і струмів у фазі статора;  $R$  - опір фази статора;  $L$  - індуктивність фази;  $e$  - наведена Е.Р.С. обертання у фазі обмотки;  $\alpha$  - кут повороту ротора;  $J_{\text{пр}}$  - приведений момент інерції привода;  $K$  - коефіцієнт демпфування силами тертя;  $F$  - момент сухого тертя;  $M_{\text{н}}(t)$  - спільний момент навантаження, крім моменту сухого тертя;  $M(t)$  - миттєве значення синхронізуючого моменту КД.

Якщо миттєве значення статичного синхронувального моменту при одночасному збудженні трьох фаз

$$M(t) = k \cdot \sum_{i=1}^m I_m \cdot \sin \alpha_m(t), \quad (3)$$

то відповідно до викладеного можна записати рівність механічного моменту (2) і моменту двигуна (3), якщо знехтувати моментом сухого тертя:

$$k \sum_{i=1}^m I_m \sin \alpha_m(t) = J \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + K \frac{d\alpha(t)}{dt} + M_{\text{н}}. \quad (4)$$

Зробивши лінеаризацію рівнянь електричної рівноваги і рівнянь рівності механічного моменту і моменту двигуна, перетворимо рівняння по Лапласу.

Отриманий вираз можна представити у виді:

$$\Delta\alpha(p) = \frac{-\Delta M_{\text{н}}(p)}{Jp^2 + Kp + M_m}.$$

Таким чином, передатна функція КД при відпрацюванні одиничного кроку може бути представлена таким чином:

$$W(p) = \frac{1}{T_{20}^2 p^2 + T_{10} p + 1}, \quad (5)$$

$$\text{де } T_{20} = \sqrt{\frac{J_{\text{пр}}}{z_r \cdot M_m}}, \quad T_{10} = \frac{K}{z_r \cdot M_m},$$

$z_r$  - число зубців ротора двигуна.

Електромагнітні перехідні процеси можуть бути враховані ланкою чистого запізнювання. Передатна функція при цьому приймає вигляд:

$$W(p) = \frac{e^{-\tau_{\text{дв}} p}}{T_{20}^2 p^2 + T_{10} p + 1} = \frac{e^{-\tau_{\text{дв}} p}}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (6)$$

$$\text{де } T = \frac{1}{\omega_0}, \quad \xi = \frac{9,81 \cdot 10^{-5} M_m}{z_r \cdot I^2 \cdot R} \omega_0 \cdot k_{\text{ш}},$$

$k_{\text{ш}}$  - коефіцієнт, що враховує демпфування обмоток КД з розрядним контуром, що змінюється в межах від 1 до 2, причому нижня границя відповідає роботі з ідеальним переключенням без шунтувального ланцюга, верхній - із шунтувальним діодом;  $\omega_0 = \pi f_n / m_1$  - кутова частота (частота власних кругових коливань ротора), яка залежить від амплітуди коливань і положення точки рівноваги стану на характеристиці синхронізуючого моменту і визначається жорсткістю цієї характеристики в точці стійкої рівноваги,  $m_1 = 8$  - кількість тактів комутації.

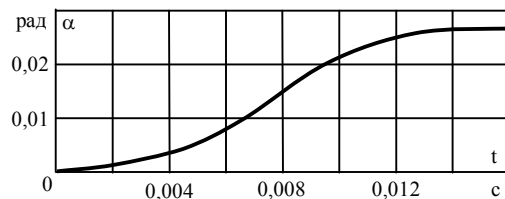


Рис.4. Перехідний процес відпрацювання одиничного кроку

Як видно з рис.4 перехідний процес відпрацювання одиничного кроку носить аперіодичний характер.

При аналізі прийняті наступні допущення:

- струми в обмотках двигуна змінюються миттєво;
- кутова статична характеристика синхронувального моменту є синусоїдальною;
- двигун навантажений моментом типу "сухе тертя":

$$M_{тр} = M_{тр} \text{sign} \left[ \frac{d\alpha}{dt} \right] = \begin{cases} +M_{тр} & \text{при } \frac{d\alpha}{dt} \geq 0 \\ -M_{тр} & \text{при } \frac{d\alpha}{dt} < 0. \end{cases}$$

З урахуванням прийнятих допущень диференціальне рівняння електромеханічної рівноваги має вигляд:

$$J_{пр} \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + M_m \text{sign} \left[ \frac{d\alpha}{dt} \right] = M_m \sin(\alpha - \beta), \quad (7)$$

де  $J_{пр} = J_{дв} + J$  - приведений момент інерції ротора двигуна і навантаження,  $D$  - внутрішнє електромагнітне демпфування,  $(\alpha - \beta)$  - динамічна помилка,  $\alpha$  - кут повороту ротора,  $\beta$  - кут повороту статора,  $M_m$  - максимальний статичний синхронувальний момент.

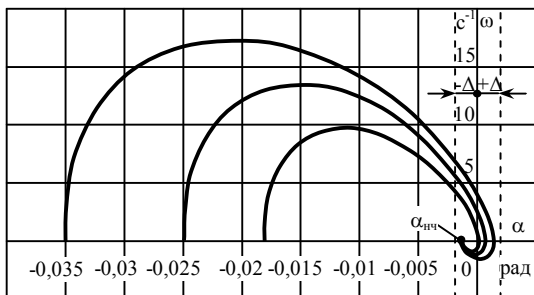


Рис.5. Родина фазових портретів синхронізуючого моменту

Оскільки значення задавальної частоти генератора при коливаннях ротора навколо точки стійкості рівноваги дорівнює нулю, то  $\beta$  також приймається рівним нулю. Тоді рівняння руху приймає вид:

$$J_{пр} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + M_m \text{sign} \left[ \frac{d\alpha}{dt} \right] = M_m \sin \alpha. \quad (8)$$

Рівняння запишемо у виді системи з двох рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{M_m \sin(\alpha)}{J_{пр}} - \frac{D}{J_{пр}} \omega - \frac{M_{тр}}{J_{пр}} \text{sign} \left[ \frac{d\alpha}{dt} \right]. \end{cases} \quad (9)$$

Внутрішнє електромагнітне демпфування і приведений сумарний момент інерції двигуна і механізму:

$$D = \frac{\delta^2 U^2}{\omega_0^2 R}, \quad J_{пр} = \frac{J}{i_p^2} + J_{дв},$$

де  $J = K_2 \cdot J_r$  - момент інерції механічної частини,  $K_2 = 2$  - конструктивний коефіцієнт;  $J_r = 0,5mS^2$  - момент інерції максимального корисного вантажу.

Родина фазових портретів, приведена на рис.5.

Дві штрихових вертикальних лінії нанесені на графіку, обмежують область нечутливості системи, що прийнята в межах  $\Delta = \pm 2,5\alpha$ . Ділянка  $\alpha_{нч}$  в нульовій області визначає зону нечутливості двигуна за наявності моменту сухого тертя.

Усі фазові портрети починаються на лівій пів-

осі кута  $\alpha$  при швидкості  $\omega_{дв} = 0$  і закінчуються на горизонталі  $\alpha_{нч}$ .

Найбільший вплив на вид фазового портрета робить коефіцієнт демпфування. У припущенні, що при пуску швидкість двигуна не змінює знак, момент навантаження типу "сухе тертя" прийнятий також одного знака.

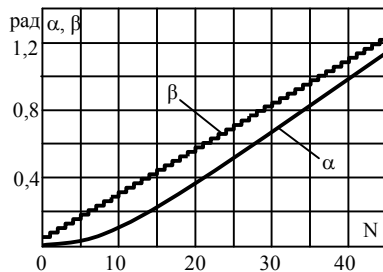


Рис.6. Графіки кутових характеристик при пуску двигуна

З рис.6 видно, що ротор двигуна відстає від поля статора в процесі розгону, однак по мірі збільшення  $N$ , невідповідність зменшується.

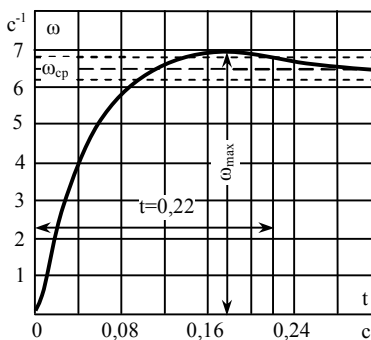


Рис.7. Графік зміни миттєвої швидкості обертання вала двигуна

максимальна динамічна помилка не перевищує одного основного кроку.

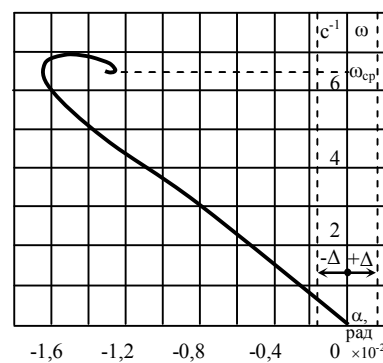


Рис.8. Фазовий портрет пуску двигуна

Графіки кутових характеристик при пуску двигуна та графік зміни миттєвої швидкості обертання вала двигуна показані на рис.6 та рис.7.

З рис.6 видно, що ротор двигуна відстає від поля статора в процесі розгону, однак по мірі збільшення  $N$ , невідповідність зменшується.

Коливання миттєвої швидкості обертання ротора  $\omega$  відображають, що двигун досягає середньої швидкості обертання за 25 імпульсів. Найбільшу наочність перехідних процесів дає фазовий портрет пуску (рис.8), з якого видно, що

При цьому ротор втягується в синхронізм при значному запасі стійкості, так як гранична неузгодженість між ротором та полем статора не повинна перевершувати одного полюсного ділення або двох кроків.

[1] Васильєв О.Г., Швець Е.А. Розробка системи керування кроковим двигуном робота. Автоматика-2013, XX Міжнародна конференція з автоматичного управління, присвячена 100-річчю з дня народження академіка О.Г. Івахненка. Миколаїв: Видавництво Національний університет кораблебудування. 2013, - с. 178-179.

[2] Ткачук В. І. Електромеханотроніка: Навчальний посібник. - Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". 2001. - 404 с.