

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ДВОХШВИДКІСНОМУ КРОКОВОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ З ДРОБЛЕННЯМ ОСНОВНОГО КРОКУ

Проведено аналіз існуючих та можливих перспективних рішень в галузі побудови сучасних крокових електроприводів, що працюють з дробленням основного кроку, виявлені границі переходу з максимальної швидкості на мінімальну. Розроблена спрощена модель розглянутого приводу для визначення найбільш доцільної структури даного приводу.

Ключові слова: управління електроприводом, кроковий електродвигун, частота присутності, дроблення кроку.

Вступ

Постановка проблеми. Кроковий електропривод широко застосовується в сучасних автоматизованих системах як елемент, що вдало поєднується з ЕОМ. Системи з кроковим приводом при дискретному керуванні від ЕОМ більш компактні, надійні та точні. Процес заміни звичайних виконавчих механізмів в цифрових системах управління кроковими двигунами (КД) обумовлений також стійкою роботою останніх при впливі несприятливих кліматичних факторів, механічних перевантажень та інших збурювальних впливів. В розімкненому кроковому електроприводі вихідна величина визначається тільки частотою й кількістю імпульсних посилок на вході. Для забезпечення стійкого руху і збереження отриманої інформації статична й динамічна помилки обмежуються значеннями, що залежать від ціни кроку та числа тактів комутації двигуна. Помилки, що виникають в такому приводі при пуску, гальмуванні, реверсі та резонансах, не піддаються управлінню. Тенденція підвищення вимог до точності і швидкості слідкуючих систем призвела до необхідності розроблення як нових методів управління КД, так і структур, які реалізують ці методи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням розробки і дослідження крокових електроприводів різноманітних верстатів присвячені праці таких вчених, як Чилікін М.Г., Гумен В.Ф., Калінінська Т.В., Морев Л.Н., Ісмаїлов Ш.Ю., Ільїнський Н.Ф., Глазов М.Н. та ін. Проведений аналіз літератури показує, що кроковий привод з розімкненою системою на сучасному етапі розвитку не вирішує протиріччя між дискретністю і швидкістю виконавчого валу механізму. Тому задача вирішується локально-замкненим кроковим приводом з датчиком, вихід якого підключений на вхід комутатора двигуна. В такому режимі усуваються обмеження по динамічній похибці, що дозволяє формувати траєкторію руху по оптимальному закону.

Мета. Для поліпшення якості продукції та покращення характеристик роботи крокового приводу необхідно підвищити добротність слідкуючого контуру електропривода за рахунок збільшення граничної швидкості обертання двигуна або зменшення його динамічної похибки за допомогою програмного частотного розгону двигуна до робочих частот, а також використання штучного дроблення кроку.

Матеріал і результати дослідження

Для проведення досліджень була розроблена структурна схема двохшвидкісного крокового електроприводу, яка наведена на рис. 1.

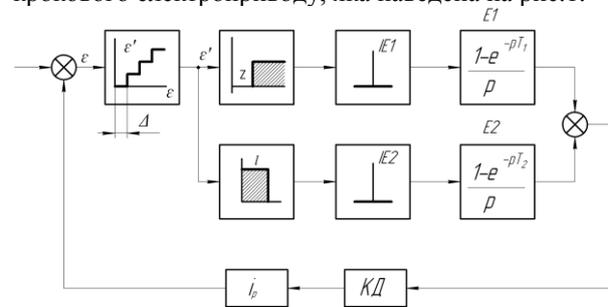


Рисунок 1 – Структурна схема двохшвидкісного крокового електроприводу

Двигун працює з дробленням основного кроку. При цьому використовувалися наступні режими роботи:

- пуск із стану спокою на частоті швидких переміщень;
- неграничний синхронний режим відпрацювання кроків на частоті швидких переміщень;
- неграничний синхронний режим відпрацювання кроків на частоті доведення;
- перехід з частоти швидких переміщень на частоту доведення;
- фіксація ротора.

Робота того чи іншого швидкісного каналу задається релейними елементами, що перемикаються при рівності неузгодженості \mathcal{E}' величиною l , яка відповідає сумі кроків, що відпрацьовуються в режимі доведення.

При аналізі були прийняті наступні допущення:

- 1) струми в обмотках управління двигуна змінюються миттєво, так як в якості підсилювачів потужності, що живлять обмотки управління, використовуються широтно-імпульсні модулятори, які працюють на частоті, котра значно перевищує частоту приємності двигуна, і, отже, час електромагнітних перехідних процесів набагато нижче часу відпрацювання кроку;
- 2) кутова статична характеристика синхронізуючого моменту є синусоїдальною, так як використана машина спеціальної конструкції, що призначена для режиму дроблення основного кроку, в якій конструктивно досягнуто розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі за синусоїдальним законом;
- 3) двигун навантажений моментом типу «сухе тертя»:

$$M_{mp} = M_{mp} \operatorname{sign} \left[\frac{d\alpha}{dt} \right] = \begin{cases} +M_{mp} & \text{при } \frac{d\alpha}{dt} \geq 0, \\ -M_{mp} & \text{при } \frac{d\alpha}{dt} < 0. \end{cases} \quad (1)$$

З урахуванням прийнятих припущень диференційне рівняння електромеханічної рівноваги має вигляд:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + M_{mp} \operatorname{sign} \left[\frac{d\alpha}{dt} \right] = M_m \sin(\alpha - \gamma), \quad (2)$$

де $J = J_p + J_n$ – приведений момент інерції ротора двигуна і навантаження, D – внутрішнє електромагнітне демпфірування, M_{mp} – момент тертя, M_m – максимальний статичний синхронізуючий момент, $\alpha - \gamma$ – динамічна помилка, α – кут повороту ротора, γ – кут повороту поля статора.

При дослідженнях приймалися наступні чисельні значення параметрів: момент інерції ротора $J_p = 0,98 \cdot 10^{-5}$ кг·м²; максимальний синхронізуючий момент, $M_m = 0,56$ Н·м; момент інерції навантаження $J_n = 0,98 \cdot 10^{-4}$ кг·м²; число зубців ротора $z = 90$; момент тертя $M_{mp} = 0,028$ Н·м; частота власних колових коливань ротора $\omega_0 = \sqrt{z M_m / (J_p + J_n)} = 680$ с⁻¹; напруга живлення обмоток двигуна $U = 27$ В; струм в обмотці двигуна $I = 6,4$ А; опір обмотки двигуна $R = 4,2$ Ом;

безрозмірне внутрішнє демпфірування $\delta = 1,13$; внутрішнє електромагнітне демпфірування $D = \delta^2 / U^2 (\omega_0^2 R) = 4,85 \cdot 10^{-4}$ Н·м·с.

Так як значення задавальної частоти генератора при коливаннях ротора навколо точки стійкої рівноваги дорівнює 0, то й кут повороту поля статора γ приймається також рівним 0. Тоді рівняння руху має вигляд:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + D \frac{d\alpha}{dt} + M_{mp} \operatorname{sign} \left[\frac{d\alpha}{dt} \right] = M_m \sin(\alpha - \gamma), \quad (3)$$

Це рівняння вирішуємо за допомогою ЕОМ методом Рунге-Кутта. Для цього диференційне рівняння (3) запишемо у вигляді системи з двох рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{M_m}{J} \sin \alpha - \frac{D}{J} \omega - \frac{M_{mp}}{J} \operatorname{sign}[\omega]. \end{cases} \quad (4)$$

Після підстановки чисельних значень отримуємо

$$\begin{cases} \frac{d\alpha_{mex}}{dt} = \omega_{mex}, \\ \frac{d\omega_{mex}}{dt} = -5200 \sin(90\alpha_{mex}) - 4,5 \cdot 90 \omega_{mex} - 260 \operatorname{sign}[\omega_{mex}]. \end{cases} \quad (5)$$

У зв'язку з тим, що результати рішення повинні бути приведені до валу двигуна, в рівняннях (5) враховується $\omega = 90\omega_{mex}$, $\alpha = 90\alpha_{mex}$.

Було розглянуто режим пуску двигуна і неграничний синхронний режим на частоті швидких переміщень. Характеристика пуску двигуна знаходиться з рішення диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{M_m}{J} \sin(\alpha - \gamma) - \frac{D}{J} \omega - \frac{M_{mp}}{J}, \end{cases} \quad (6)$$

які після підстановки чисельних значень мають вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = -5200 \sin 90(\alpha_{mex} - \gamma_{mex}) - 4,5 \cdot 90 \omega_{mex} - 260, \end{cases} \quad (7)$$

де $\gamma_{mex} = N\alpha_{d.mex}$ – кут повороту поля статора; $N = \tau f$ – порядковий номер імпульсу, що надходить з генератора імпульсів на комутатор; $f = 6600$ Гц – частота пуску (робоча частота швидких переміщень, яка збільшена на 10%); $\tau = 1/f$ – інтервал часу між двома черговими імпульсами; $\alpha_{d.mex} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ рад.

У припущенні, що при пуску швидкість двигуна не змінює знак, в рівняннях (7) момент навантаження типу «сухе тертя» прийнятий також одного знака. Результати обчислень оформлені графічно і представлені на рис. 2,3.

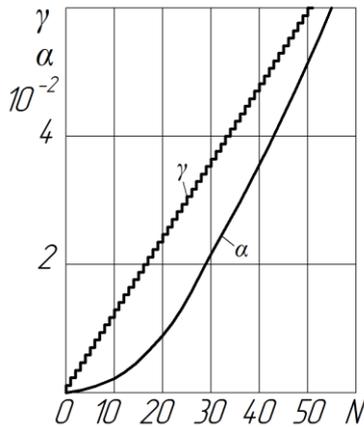


Рисунок 2 – Графіки куткових характеристик при пуску двигуна на частоті швидких переміщень

На рис. 2 побудовані графіки залежності $\gamma_{\text{мех}} = f(N)$ і $\alpha_{\text{мех}} = f(N)$, на рис. 3 – графік залежності $\omega_{\text{мех}} = f(N)$.

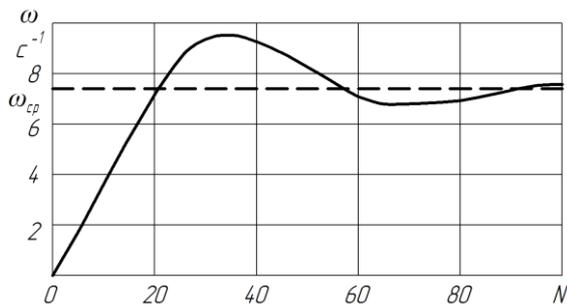


Рисунок 3 – Графік зміни миттєвої швидкості обертання ротора на частоті швидких переміщень

З рис. 2 видно, що ротор двигуна відстає від поля статора в процесі розгону, проте по мірі збільшення порядкового номера N імпульсу розузгодження зменшується, прагнучи до деякої межі. Коливання миттєвої швидкості обертання ротора $\omega_{\text{мех}}$ (рис. 3) показують, що двигун досягає середньої швидкості обертання за 21 імпульс, а процес встановлення руху займає 90 тактів комутації. Максимальна швидкості обертання ротора не суттєво перевершує середню ($\omega_{\text{м}} / \omega_{\text{сп}} = 1,3$), що досягається дробленням кроку, і за рахунок малих дискрет переміщення поля статора в систему вводиться енергія більш рівномірно, ніж на основному кроці.

Розрахунок пуску і неграничного синхронного режиму на частоті 440Гц (з 10% запасу по частоті щодо частоти, прийнятої за робочу) проводиться за тими ж рівняннями, що і розрахунок пуску на частоті швидких переміщень, тобто за виразами (7).

Результати розрахунку представлені на рис.4.

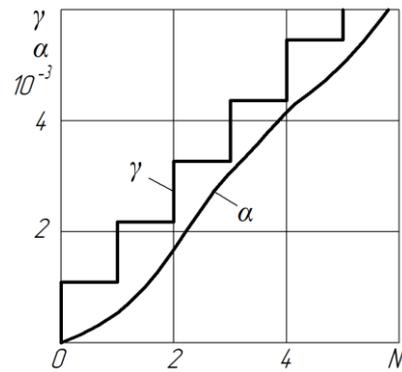


Рисунок 4 – Графіки куткових характеристик при неграничному пуску

Як видно з рис. 4, рух ротора починається на першому ж кроці, і до моменту подачі 2-го імпульсу двигун встигає відпрацювати половину першого кроку. Потім відставання ротора двигуна на третьому і наступних кроках стає практично однаковим. Швидкість двигуна коливається біля середнього значення, маючи максимум і мінімум на кожному кроці. Це режим роботи двигуна близький до режиму одиничних кроків. Резонансних явищ не спостерігається. Вже на п'ятому імпульсі настає практично квазіустановлений режим.

Метою розрахунку режиму переходу з частоти швидких переміщень на частоту доведення є виявлення мінімальної ділянки переміщення (або мінімального числа, що записане у лічильнику переміщень), яке необхідно для того, щоб двигун погасив свою швидкість і перейшов на сталий режим обертання з частотою 400 Гц.

Були взяті наступні вихідні рівняння для розрахунку:

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = -5200 \sin 90(\alpha_{\text{мех}} - \gamma_{\text{мех}}) - 4,5 \cdot 90 \omega_{\text{мех}} - 260 \text{sign}[\omega_{\text{мех}}], \end{cases} \quad (8)$$

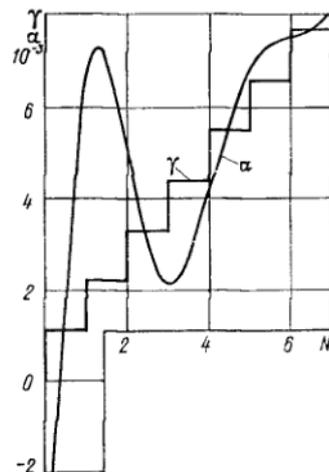


Рисунок 5 – Графіки куткових характеристик в режимі перемикання $\gamma_{\text{мех}} = f(N)$ та $\alpha_{\text{мех}} = f(N)$

Результати обчислень дані графічно на рис.5,6.

При розрахунку в якості початкових умов при інтегруванні диференціальних рівнянь (6) використовувалося одне із значень швидкості і кута з неграничного синхронного режиму при $f = 6600$ Гц: $\omega_{\text{мех.нач}} = 7,4$ рад/с, $\alpha_{\text{мех.нач}} = -0,0075$ рад.

При зниженні керуючої частоти ротор двигуна вибігає в позитивному напрямку на 7 дрібних кроків (рис.5) і потрапляє в гальмує поле статора. Початкова стадія перехідного режиму носить коливальний характер. Однак, як видно з фазового портрету (рис. 6), вже на третьому кроці з частотою 440Гц ротор двигуна потрапляє в область зони нечутливості системи $\pm\Delta$. При остаточному виборі числа імпульсів в лічильнику переміщень, які відпрацьовуються в режимі доведення, потрібно враховувати первісний вибіг ротора, який дорівнює семи кроків, і кількості імпульсів, що подаються на двигун до потрапляння в зону нечутливості (два кроки). Кількість імпульсів за першою з них більше, ніж за другим, тому слід прийняти мінімальний код в лічильнику, рівний семи. Квантування в часі з частотою f_1 (частота швидких переміщень) або f_2 (частота доведення), що задається імпульсними елементами ІЕ1 і ІЕ2 (рис. 1), і запам'ятовування на весь період проходження імпульсів (екстраполятори Е1 і Е2) враховувалося в розрахунку зміною величини $\gamma_{\text{мех}}$ на початку чергового кроку двигуна.

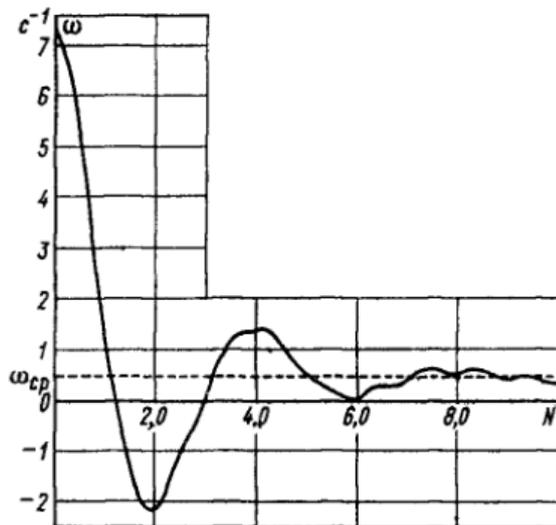


Рисунок 6 – Фазовий портрет руху ротора в режимі перемикання

Висновки

Розрахунки показують, що вільний рух системи є стійким, при цьому аналіз вимушених рухів не потрібний, так як вхідний вплив системи обмежується стрибком, що рівносильно завданням ненульових початкових умов при вільному русі. Практична реалізація двохшвидкісного приводу підтверджує результати розрахунку (з похибкою до 20%) частот приємності та гальмування, а також межі переходу з максимальної швидкості на мінімальну. Спрощена модель розглянутого приводу може бути рекомендована на стадії ескізного проектування при визначенні найбільш доцільної структури крокового приводу.

Список літератури

1. Дискретний електропривод с шаговыми двигателями / Под ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971.
2. Гумен В.Ф., Калининская Т.В. Следящий шаговый электропривод / В.Ф. Гумен, Т.В. Калининская. – Л.: Энергия. Ленинградское отд-ние, 1980.-168с.
3. Москаленко В.В. Электродвигатели специального назначения /В.В. Москаленко. – М.: Энергоиздат, 1981.-104с.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / Під ред. М.Г.Поповича та О.Ю.Лозинського. – Київ: Либідь, 2005. – 672 с.
5. Гумен В.Ф., Калининская Т.В., Морев Л.Н., Трофимов Е.И. Шаговый электропривод для автоматизации производства интегральных микросхем / В.Ф. Гумен, Т.В.Калининская, Л.Н.Морев, Е.И.Трофимов. – ВНИИЭлектромаш, Л.: Энергия, 1978.-348с.
6. Терехов В.М. Системы управления электроприводов./ В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд-во Академия, 2008. – 304 с.
7. Гульков Г.И., Петренко Ю.Н., Раткевич Е.П., Симоненкова О.Л. Системы автоматизированного управления электроприводами Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. Минск, Новое знание, 2007, 394 стр с илл.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.