

# АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

---

УДК 621.3.08

В. В. Кухарчук, д. т. н., проф.;

В. В. Усов, студ.

## ВІМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ТА МЕТОДИКА НОРМУВАННЯ ПОХИБОК КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ КРОКОВОГО ДВИГУНА

*Досліджено математичну модель крокового двигуна, теоретично встановлено і експериментально підтверджено, що вал здійснює коливальні рухи зі зміною напрямку обертання, неврахування якого призводить до значної похибки вимірювання. Показано, що підвищення швидкодії вимірювання можна досягнути за рахунок вимірювання протягом перехідного процесу, а зменшення похибки шляхом врахування напрямку обертання. Розроблено методика метрологічної атестації похибки відпрацювання кутових положень крокових двигунів, яка дозволяє їх класифікувати за класами точності.*

Кут повороту крокового двигуна (КД) є однією з основних його характеристик. Відомо, що виміряне значення цього кута, різне для кожного стійкого кутового положення [2]. Це залежить, в першу чергу, від конструкції та якості двигуна. Тому вимірювання кута повороту і визначення його похибки є однією з основних проблем випробування КД. Наявні системи і методики контролю кута не забезпечують необхідну швидкодію і точність, тому розробка системи вимірювання кутового положення КД є актуальною задачею.

Відома методика [2] передбачає вимірювання значення кроку, за допомогою вимірювального мікроскопа, на якому закріплюється КД зі стрілкою на роторі. Вимірювання проводяться через короткі проміжки часу (10 с) для кожного кутового положення. При цьому похибка не перевищує 1,5 %.

Основним недоліком такого підходу є низька швидкодія, при цьому процес вимірювання та розрахунку складає мінімум годину на кожний двигун, а за наявності великої кількості КД унеможливує перевірку кожного з них. Окрім цього наявність людського фактора викликає виникнення суб'єктивних похибок і помилок.

Також застосовується система контролю [4] похибки позиціонування КД, за допомогою специфічного сенсора з двома автоколіматорами — рухомим та нерухомим, які розташовані відповідно на валу КД та корпусі пристрою. Вимірювальна інформація з виходів приймачів автоколіматорів через інтерфейс надходить до ЕОМ.

Основною перевагою такої системи є забезпечення точного спряження вала двигуна з вимірювальною частиною установки. Але суттєвим недоліком є неврахування коливань вала КД навколо стійких положень, що призводить до зниження точності вимірювань. Також такий підхід значно ускладнює конструктивне виконання вимірювальної системи, а наявність ЕОМ як розрахункового та керувального елемента значно обмежує мобільність та компактність системи контролю.

Вказані недоліки, наявних систем контролю кута повороту КД, вимагають пошуку нових технічних рішень. Тому метою даної роботи є підвищення швидкодії і точності вимірювання кутових положень крокового двигуна.

Поставлена мета досягається застосуванням сучасних мікропроцесорних контролерів та малоінерційних фотоелектричних сенсорів кута повороту, які забезпечують похибку квантування 0,5 % (наприклад, при вимірюванні кута 15°). Для поліпшення характеристик сенсора у вимірювальне коло пропонується встановити прецизійний редуктор, за рахунок чого похибка квантування зменшиться у кількість разів, яка відповідає передаточному числу редуктора.

Проте при дослідженні процесів, які протікають у вимірювальній системі, було встановлено ряд

особливостей, які суттєво вплинули на її структуру та алгоритм роботи. Для цього розроблено математичну модель вимірювального каналу (ВК) кута повороту КД (1), яка складається з моделі двофазного крокового двигуна [1], рівняння перетворення сенсора кута повороту та прецизійного редуктора:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + p n \Phi_m i_A \sin(p\theta) + p n \Phi_m i_B \sin(p(\theta - \lambda)) = 0; \\ V_{gA} - r i_A - L \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_B}{dt} - \frac{d}{dt} [n \Phi_m \cos(p\theta)] = 0; \\ V_{gB} - r i_B - L \frac{di_B}{dt} - M \frac{di_A}{dt} - \frac{d}{dt} [n \Phi_m \cos(p(\theta - \lambda))] = 0; \\ M_{em} = -n N_r \Phi_M [i_A \sin(N_r \theta) + i_B \cos(N_r \theta)]; \\ N_\theta = \frac{z}{360^\circ} \theta'; \\ \theta' = i \theta, \end{cases} \quad (1)$$

де  $J$  — момент інерції;  $D$  — коефіцієнт в'язкого тертя;  $\theta$  — кут повороту ротора КД відносно статора;  $\theta'$  — кут повороту шестерні редуктора;  $p$  — кількість пар полюсів;  $n$  — кількість витків обмоток;  $M$  — взаємна індуктивність;  $n\Phi_m$  — взаємоіндукція;  $i_A, i_B$  — струм в обмотках фаз, відповідно А та В;  $V_{gA}, V_{gB}$  — напруга живлення, відповідно фаз А та В;  $L$  — власна індуктивність кожної фази;  $r$  — опір кола обмотки статора;  $\lambda$  — крок зубців статора КД;  $i$  — передаточне число редуктора;  $z$  — кількість міток фотоелектричного сенсора;  $N_\theta$  — кількість імпульсів на виході сенсора.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь (1) для двофазного КД типу M35SP-6 наближеними методами в середовищі MathCad, а саме кут повороту  $\theta$ , представлений на рис. 1.

З рисунку видно, що кут повороту КД змінюється стрибкоподібно. Це зумовлюється коливаннями ротора в моменти переходу від одного кутового положення до іншого. Оскільки в якості сенсора кута пропонується використовувати фотоелектричний сенсор, вихідним сигналом якого є прямокутні імпульси, пропорційні куту повороту, то відповідно така коливальна зміна кута виникнення додаткових імпульсів. Тобто підрахована кількість імпульсів буде містити відхилення кута від усталеного значення. Найбільше значення цих відхилень складає 30 % від дійсного значення кута. Тому це суттєво впливатиме на остаточний результат вимірювання.

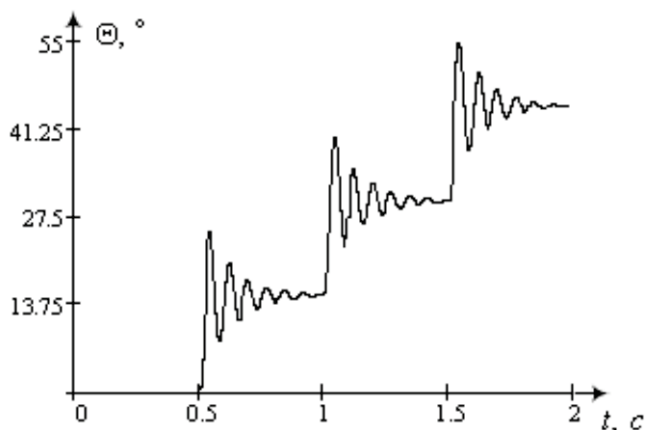


Рис. 1. Графік зміни кута повороту КД

Вказана проблема особливо відчутна при випробуванні двигунів з порівняно великим значенням кута повороту ( $15^\circ \dots 30^\circ$ ). В таких КД відхилення кута повороту від номінального значення складає 60...70 %. Тому неврахування цієї особливості призводить до появи похибки, значення якої перевищує 100 %. Таким чином коливальний процес необхідно враховувати при побудові ВК, шляхом визначення напрямку обертання вала КД при підрахунку кількості імпульсів з виходу сенсора. Цим забезпечується підвищення точності вимірювання кута повороту КД.

Швидкодія вимірювального каналу обмежуються часом перехідного процесу КД при переході від одного стійкого положення до іншого. Тому максимальна швидкодія може досягатися при проведенні вимірювання зміни кута від початку руху до повної зупинки. Тобто сигнал вимірювальної інформації повинен бути отриманий одразу після закінчення перехідного процесу.

Враховуючи виділені вище особливості запропоновано мікропроцесорний вимірювальний канал (ВК), що здійснює автоматичний контроль і нормування похибок кута повороту КД та представлення результату вимірювання у візуальному вигляді (рис. 2).

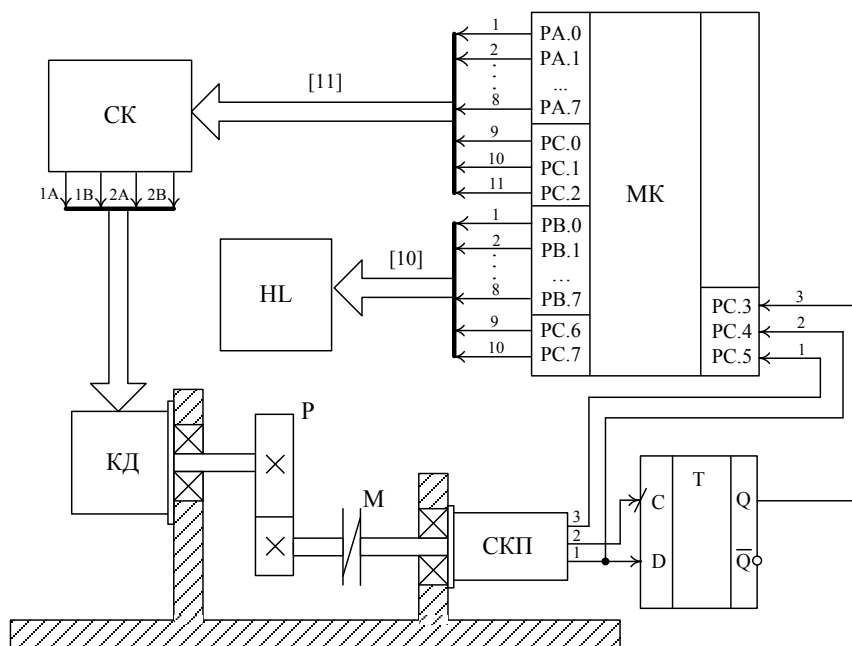


Рис. 2. Структурна схема вимірювального каналу кутового положення КД

Наведений ВК включає в себе: систему керування (СК); підвищувальний редуктор (Р); демпферну муфту (М); сенсор кута повороту (СКП); мікропроцесорний контролер (МК); D-тригер; рідино-кристалічний дисплей (HL).

Як вже було згадано, за СКП вибираємо високочутливий фотоелектричний сенсор, на виходах якого під час обертання вала формуються прямокутні імпульси, кількість яких залежить від кута повороту. Підвищення роздільної здатності СКП досягається шляхом додаткового введення прецизійного редуктора Р.

Для визначення напрямку обертання вала в процесі підрахунку імпульсів використовується D-тригер, С і D входи якого з'єднані з виходами СКП, на яких формуються сигнали зміщені один відносно одного на  $\pm 90^\circ$  (знак «+» або «—» вказує на напрямок обертання вала). Тобто коли вал сенсора буде обертатися за годинниковою стрілкою, то на Q-виході D-тригера сформується сигнал логічної «1», коли проти годинникової стрілки то сигнал логічного «0».

Обертання КД супроводжується значними коливаннями вала, що призводить до виникнення значних механічних вібрацій. Це спричиняє появу надлишкового числа імпульсів на виході СКП. Для усунення вібрацій КД та СКП закріплюються на масивній станині, а їхні вали з'єднуються за допомогою демпферної муфти М.

Окрім підрахунку та оцінювання похибок МК здійснює керування СК, що є спеціалізованою інтегральною мікросхемою керування КД і задає покроковий режим обертання. Після проведення вимірювань та розрахунків похибок для кожного кутового положення нормоване значення відображається на дисплеї HL.

В основу алгоритму роботи ВК контролю кутових положень КД покладена методика нормування похибок, яка базується на загальновідомому підході. В покроковому режимі для кожного  $j$ -го стійкого кутового положення вимірюється значення кута повороту  $\theta_{bj}$ , знаючи дійсне номінальне значення  $\theta_d$  з паспортних даних, розраховується абсолютна похибка

$$\Delta_j = \theta_{bj} - \theta_d \quad (2)$$

Тоді відносна похибка, для  $j$ -го кутового положення

$$\delta_j = \frac{\Delta_j}{\theta_d} \cdot 100 \% = \frac{\theta_{bj} - \theta_d}{\theta_d} \cdot 100 \% \quad (3)$$

Серед знайдених значень  $\delta_j$  знаходиться максимальне  $\delta_{\max}$ . З ряду нормованих значень похибок вибирається найближче і встановлюється клас точності відпрацювання кроків КД.

Використання цієї методики дозволить класифікувати КД за класами точності, який є кількісною характеристикою якості двигуна і його вартості за даним параметром.

Описана методика та вказані особливості ВК контролю кута повороту КД реалізуються за таким алгоритмом (рис. 3).

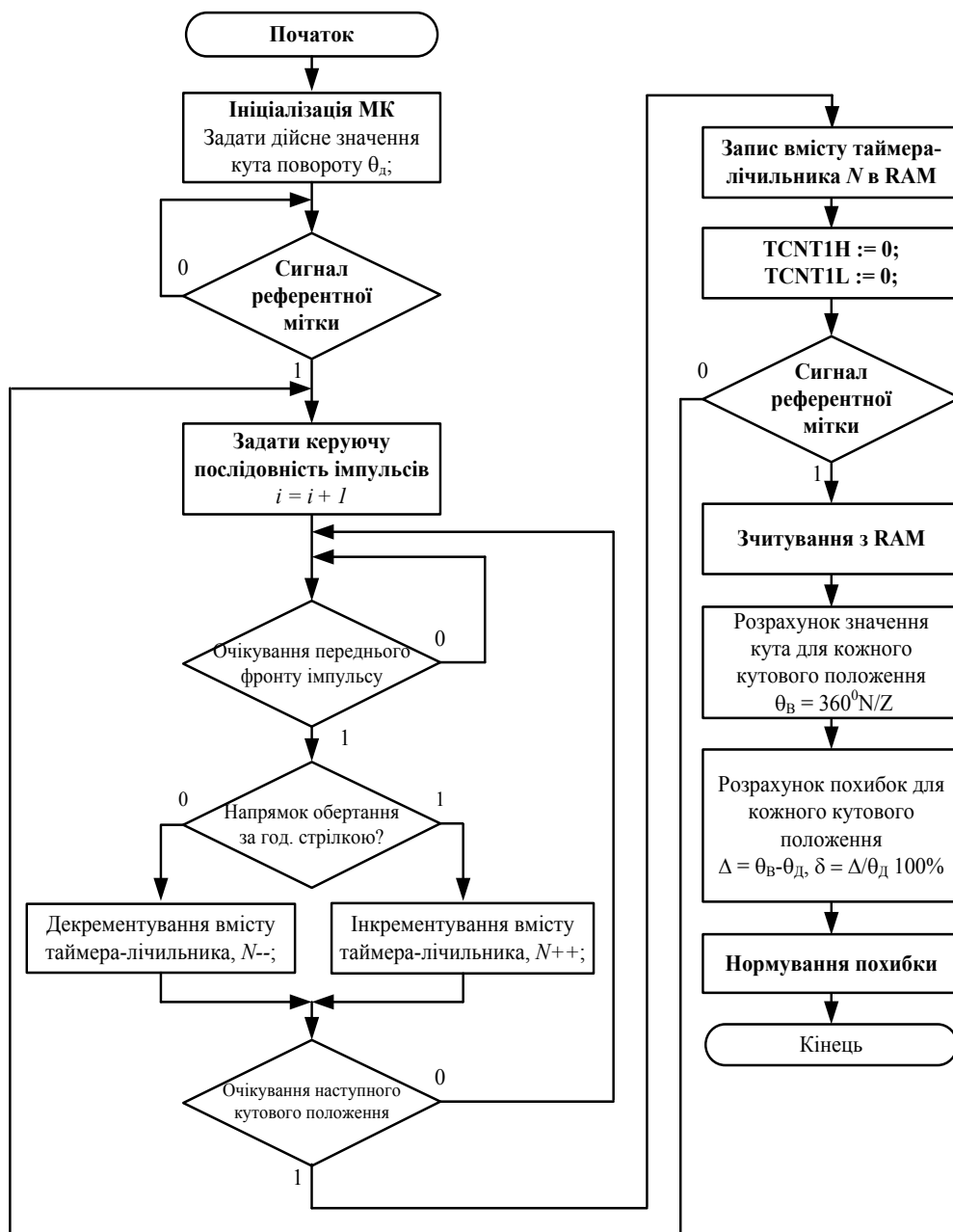


Рис. 3. Алгоритм роботи вимірювального каналу кута повороту крокового двигуна

Наведений алгоритм передбачає вимірювання кута повороту для кожного кутового положення до приходу сигналу референтної мітки СКП. В процесі вимірювання фіксується будь-яка зміна положення вала КД протягом перехідного процесу. Таким чином час вимірювальних операцій обмежується часом перехідного процесу, який, за результатами розв'язку математичної моделі (1), складає 0,5 с. Це дозволяє підвищити швидкодію вимірювань, в порівнянні з відомими засобами, більше ніж у 20 разів. За рахунок визначення напрямку обертання вала КД підвищується точність вимірювання при підрахунку імпульсів СКП таймером-лічильником контролера.

Після приходу сигналу референтної мітки процес вимірювання завершується, записані у пам'ять МК значення імпульсів, перераховуються у відповідні значення кута, і за розробленою методикою проводиться нормування похибок.

У відповідності до запропонованої структурної схеми (рис. 2) та алгоритму роботи (рис. 3) було розроблено експериментальний зразок на базі МК фірми ATMEL AVR типу ATMEGA8515, сенсора кута ЛІР-120А та силового драйвера LB1845. Проведені дослідження дали змогу реально оцінити швидкодію та точність вимірювань. Для крокового двигуна типу M35SP-6, що має 24 стійких кутових положень, тривалість повного циклу вимірювання складає 12 с. При цьому похибка квантування не перевищує 0,05 %.

### Висновки

В результаті теоретичних досліджень математичної моделі крокового двигуна встановлено і експериментально підтверджено, що протягом перехідного процесу вал здійснює коливальний рух зі зміною напрямку обертання, неврахування якого призводить до значної похибки вимірювання кутового положення.

Показано, що підвищення швидкодії вимірювання кутового положення можливо досягнути за рахунок того, що вимірювання значення інформативного параметра здійснювати протягом перехідного процесу об'єкта вимірювання, а зменшення похибки шляхом врахування напрямку обертання вала крокового двигуна при переході від попереднього кутового положення до наступного.

Розроблено методику автоматизованої метрологічної атестації похибки відпрацювання кутових положень крокових двигунів, яка дозволяє їх класифікувати за класами точності.

Запропоновано функцію перетворення вимірювального каналу кутового положення ротора.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 200 с.
2. Двигатели электрические шаговые. Технические условия. ПТО.312.002ТУ
3. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под общ. ред. М. Г. Чиликина. — М.: Энергия, 1971. — 624 с.
4. А. С. № 15258 А Стенд вимірювання похибок позиціонування валів крокових двигунів.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2006, 25—28.09.2006 р.)

Надійшла до редакції 23.11.06  
Рекомендована до друку 12.12.06

**Кухарчук Василь Васильович** — завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань,  
**Усов Віктор Васильович** — студент Інституту електроенергетики, екології та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет