

В. В. Усов

## МЕТОД ПРИСКОРЕНОГО КОНТРОЛЮ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРОКОВИХ ДВИГУНІВ

У роботі розроблено новий метод контролю залежності пускового моменту крокових двигунів від частоти напруги живлення, що дозволяє підвищити швидкодію, шляхом повної автоматизації вимірювального процесу.

**Ключові слова:** пусковий момент, кроковий двигун, контроль, вимірювання, швидкодія, MathCad, .NET Framework.

### Вступ

Однією з основних характеристик крокових двигунів (КД) є залежність пускового моменту від частоти керуючих імпульсів. Ця залежність визначає діапазон значень моменту навантаження, при якому двигун здатен запускатися без втрати кроків для різних частот напруги живлення. Тому ця характеристика є головним показником навантажувальної здатності КД у процесі пуску та зупинки [1, 2].

Під час дослідження КД важливим є завдання вимірювання його характеристик. Для цього в цей час використовують ряд методів, які ґрунтуються на ручному контролі моменту двигуна в діапазоні пускових частот напруги живлення [1]. Проте, з розвитком вимірювальної техніки та появи нових типів КД існуючі методи і засоби вимірювання на їхній основі не відповідають сучасним вимогам та об'єктам контролю. Тому актуальним є вдосконалення та розробка нових підходів до вимірювання пускових характеристик. У першу чергу, для цього потрібно провести аналіз відомих методів та визначити основні недоліки, які не дозволяють їхнє подальше ефективне використання.

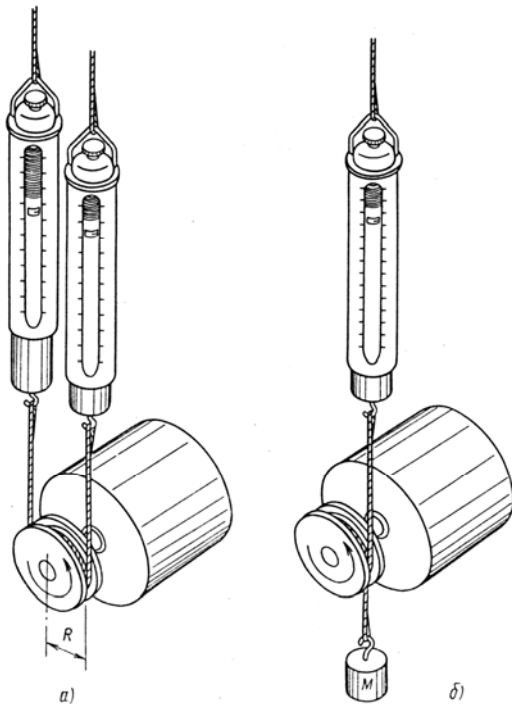


Рис. 1. Вимірювання пускового моменту КД за допомогою шкал динамометрів (а – з двома шкалами, б – з однією шкалою)

### Аналіз відомих методів та засобів вимірювання пускових характеристик КД

Найбільш відомим є метод вимірювання пускових характеристик КД, який полягає у використанні пружинного динамометра як сенсора обертового моменту (рис. 1). За таких умов важливим є врівноваження ротора КД додатковим моментом навантаження, що створюється за допомогою ще одного динамометра (рис. 1а) або вантажу, який підвішений до шківів на сталій нитці [1].

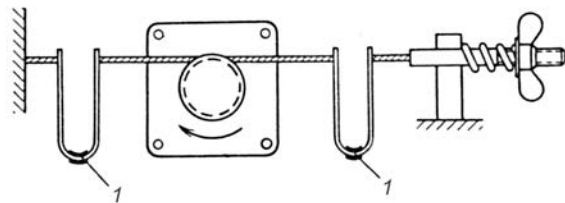


Рис. 2. Вимірювання пускового моменту КД за допомогою тензосенсорів 1

Незважаючи на те, що вантаж створює постійний момент навантаження, в результаті коливань ротора КД струна з вантажем розтягується і коливається. Тому момент навантаження, і відповідно, покази динамометра будуть нестабільними, що знижує точність вимірювання. Крім того, присутність людини у вимірювальному процесі викликає додаткову суб'єктивну похибку й унеможливує автоматизацію вимірювання.

Замість пружинних динамометрів для вимірювання пускового моменту також використовують тензорезистивні сенсори 1 (рис. 2). За таких умов момент КД визначається як різниця показів тензосенсорів, що вмикаються в мостові схеми [1].

У цьому випадку, момент навантаження створюється за рахунок сили тертя троса, який не є постійним і залежить від швидкості обертання вала, яка змінюється при переході від одного стійкого положення до наступного.

Тензорезистивний метод дозволяє провести вимірюванню пускового моменту КД з високою точністю, а також здійснити перетворення його у зручній формі. Для зняття пускової характеристики момент навантаження поступово збільшується до тих пір, поки двигун не зможе запуститися при даній частоті, тобто моменту КД буде не достатньо для подолання опору. При таких умов рівновага моментів фіксується візуально оператором, що не дозволяє автоматизувати процес вимірювання.

Крім того, розглянуті методи та засоби, розв'язуючи проблему вимірювання пускового моменту, не розглядають питання контролю як встановлення відповідності вимірюваної величини заданим нормам [3]. Тому, враховуючи вказані недоліки існуючих методів, проблеми вимірювання моменту та контролю пускових характеристик КД, необхідно здійснити пошук нових підходів та технічних рішень, перш за все, на методологічному рівні.

Отже, метою цієї роботи є підвищення швидкодії вимірювання пускового моменту КД.

Проаналізувавши розглянуті методи та засоби, виділимо наступні завдання, які необхідно вирішити, розв'язуючи проблему контролю пускових характеристик КД:

1. Встановити критерій виходу із синхронізму КД у момент пуску під час перезавантаження;
2. Провести математичне моделювання пускової характеристики КД;
3. Розробити метод прискореного контролю пускового моменту КД.

#### Розроблення методу прискореного контролю пускового моменту

Як зазначалося вище, основною ознакою КД під час пуску є його здатність знаходитися в синхронізмі при заданому навантаженні та частоті напруги живлення. Максимально можливий момент навантаження для всього частотного діапазону і буде пусковою характеристикою КД. Максимальний момент двигуна досягається на межі виходу його з синхронізму, тому важливо його визначити. У розглянутих пристроях це здійснюється за рахунок візуального спостереження, що є незадовільним, враховуючи принцип автоматизації вимірювання. Тому потрібно розробити новий критерій, що дозволить проводити цю операцію в автоматичному режимі. Для цього здійснимо математичне моделювання роботи КД в пусковому режимі, скориставшись моделлю, що представлена у [1, 4]:

$$\begin{cases} J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi_m i_A \sin(p\theta) + pn\Phi_m i_B \sin(p(\theta - \lambda)) - M_H = 0, \\ V_{gA} - r \cdot i_A - L \cdot \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_B}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p\theta)] = 0, \\ V_{gB} - r \cdot i_B - L \cdot \frac{di_B}{dt} - M \frac{di_A}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p \cdot (\theta - \lambda))] = 0, \\ M_n = -nN_r \Phi_M \cdot [i_A \cdot \sin(N_r \cdot \theta) + i_B \cdot \cos(N_r \cdot \theta)], \end{cases} \quad (1)$$

де  $V_{gA}$ ,  $V_{gB}$  – напруга живлення, відповідно фази  $A$  та  $B$ ;  $i_A$ ,  $i_B$  – струм в обмотках фаз;  $n\Phi_m$  – потокозчеплення;  $L$  – власна індуктивність кожної фази;  $M$  – взаємна індуктивність;  $r$  – опір кола обмотки статора;  $N_r$  – кількість зубців ротора;  $p$  – число пар полюсів;  $n$  –

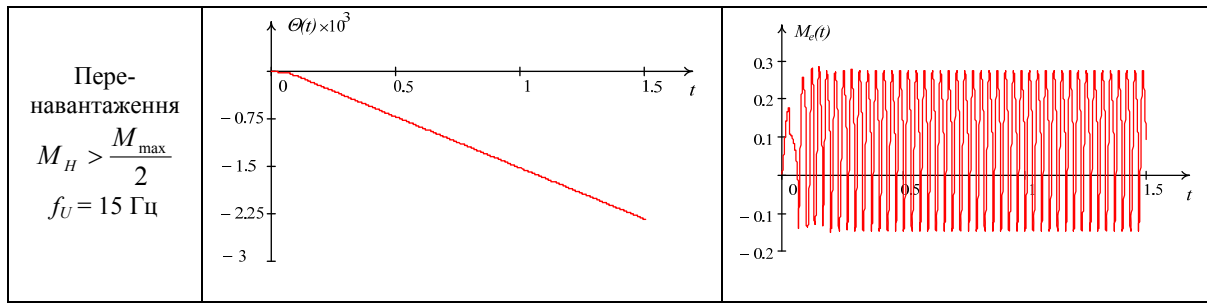
кількість витків обмоток;  $J$  – момент інерції;  $D$  – коефіцієнт в'язкого тертя;  $\theta$  – кут повороту ротора відносно статора;  $\lambda$  – крок зубців статора КД;  $M_n$  – електромагнітний момент КД;  $M_H$  – момент навантаження.

Використовуючи дослідження, наведені в [3], представимо результати розв'язку (1) в пакеті прикладних програм MathCad для двофазного КД типу M35SP-6 в трьох режимах роботи при різних частотах напруги живлення  $f_U$  (табл. 1).

Таблиця 1

Моделювання перехідних процесів КД

Режим	Перехідний процес кута повороту $\theta(t)$	Перехідний процес пускового моменту $M_i(t)$
<p>Неробочий хід  <math>M_H = 0</math>  <math>f_U = 1</math> Гц</p>		
<p>Номінальне навантаження  <math>M_H = \sqrt{2} \cdot M_{max}</math>  <math>f_U = 1</math> Гц</p>		
<p>Пере-навантаження  <math>M_H &gt; \sqrt{2} \cdot M_{max}</math>  <math>f_U = 1</math> Гц</p>		
<p>Номінальне навантаження  <math>M_H = \frac{M_{max}}{2}</math>  <math>f_U = 15</math> Гц</p>		



Як видно з табл. 1, під час дії моменту навантаження, що перевищує  $\sqrt{2} \cdot M_{\max}$  ( $M_{\max}$  – максимальний синхронізуючий момент), КД обертається в зворотному напрямку. Це свідчить про те, що при даній частоті напруги живлення ( $f_U = 1$  Гц) моменту КД недостатньо для його запуску, а прикладене навантаження перевищує пусковий момент. За таких умов граничне значення моменту навантаження

$$M_{n.\max} = \sqrt{2} \cdot M_{\max} \quad (2)$$

є максимальним пусковим моментом при даній частоті напруги живлення.

Режим роботи під час перенавантаження характеризується виходом КД з синхронізму, при цьому значення пускового моменту для різних частот відрізняються. Проте схожим є перехідний процес кута повороту, що відзначається стрімким обертанням вала КД у напрямку дії моменту навантаження. Звичайно, це формулювання не дає чіткого уявлення про умову виходу КД з синхронізму під час перенавантаження. Адже як видно з табл. 1, для режимів холостого ходу та навантаження, в зоні низьких частот, ротор двигуна також стрибкоподібно змінює напрямок обертання, що свідчить про неоднозначність вказаного твердження. Тому потрібно уточнити таким чином, щоб умова виходу КД із синхронізму була не лише однозначною, але й, у подальшому, давала можливість реалізувати її як засіб контролю пускового моменту.

Під час перенавантаження КД важливим фактом є не лише стрімке обертання вала в напрямку дії моменту навантаження, але й тривалість обертання. Під час переходу від одного кутового положення до наступного тривалість коливань не перевищує півперіоду напруги живлення. У момент виходу з синхронізму (табл. 1) кут повороту КД не змінює свій напрямок, а його тривалість очевидно перевищує півперіод напруги живлення.

Отже, основним критерієм виходу із синхронізму КД під час перенавантаження є обертання вала в напрямку дії навантаження за час  $t_n$ , що перевищує півперіод напруги живлення  $T_U / 2$ , тобто

$$t_n > \frac{T_U}{2}. \quad (3)$$

Реалізація цього критерію можлива за рахунок програмної обробки перехідного процесу кута повороту після попереднього його вимірювального перетворення за допомогою сенсора кута.

Пускові характеристики відносяться до класу кривих обертань і представляють собою зону старту на рис. 3. Загальна теорія, що описує ці характеристики [1, 5], має ряд недоліків, зокрема, неврахування зон нечутливості та нестабільності, що визначаються експериментальним шляхом, наявність припущень та спрощень у розрахунках аналітичної залежності  $M(f)$ . Тому актуальною є задача математичного моделювання пускових характеристик.

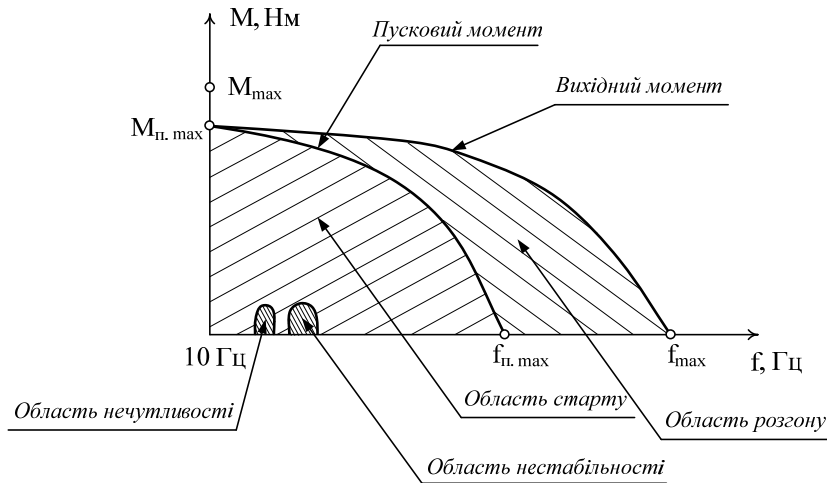


Рис. 3. Пускова та вихідна характеристики КД

Головна ідея моделювання залежності пускового моменту КД від частоти напруги живлення полягає у самому визначенні цієї характеристики. Тобто, потрібно визначити такий максимальний момент навантаження для кожного значення частоти напруги живлення в пусковому діапазоні, при якому КД залишається в синхронізмі та здатен обертатися в заданому напрямку і зупинитися. Ця операція можлива після розв'язку математичної моделі (1) при застосуванні розробленого критерію виходу КД із синхронізму.

Отже, пропонуємо такий алгоритм визначення пускового моменту (рис. 4). Після встановлення мінімальної частоти напруги живлення  $f = 1$  (Гц) та максимального пускового моменту  $M_{n,max}$  (2) з системи (1) отримують розв'язок для кута повороту  $\theta(t)$  КД. Після чого визначаються такі ділянки залежності  $\theta(t)$ , перша похідна на яких є від'ємною, тобто напрямком обертання вала протилежний заданому.

Шляхом порівняння тривалості знайдених ділянок  $t_n$  із півперіодом напруги живлення  $T_U/2$  встановлюється чи достатньо пускового моменту КД для подолання навантаження. У випадку, якщо його недостатньо і відповідно виконується нерівність (3), момент навантаження  $M_n$  зменшується на попередньо встановлений крок, а процес розрахунку перехідного процесу кута повороту повторюється. Процес триває до того моменту, поки (3) не буде порушена і КД зможе запуснитися без втрати кроків, а його пусковий момент при заданій частоті буде перевищувати момент навантаження. Тоді попереднє значення моменту і буде максимальним пусковим моментом на даній частоті.

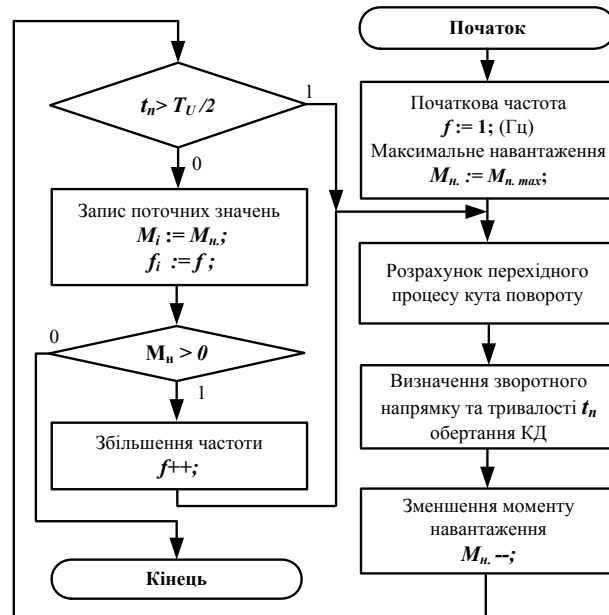


Рис. 4. Алгоритм моделювання пускового моменту

Після запам'ятовування поточних значень частоти та моменту відбувається збільшення частоти на попередньо заданий крок і проводиться розрахунок кута повороту при даній частоті та навантаженні. Процес розрахунку повторюється поки, поточне значення моменту навантаження не буде близьким до нуля. Після чого, за збереженим значенням будуватиметься

пускова характеристика.

У зв'язку з складними циклічними розрахунками системи нелінійних диференціальних рівнянь, використання ППП MathCad для реалізації розробленого алгоритму в повному обсязі є неможливим. Тому створювачі цього ППП пропонують MathCad Automation Interface (MAI), що забезпечує використання можливостей MathCad для динамічних розрахунків та обробки даних з відповідним налаштуванням за допомогою зовнішніх програмних засобів [6].

Використовуючи сучасну технологію .NET Framework 2.0 [7, 8], розроблено комп'ютерну програму на основі наведеного алгоритму (рис. 4), який здійснює моделювання пускової характеристики для КД із заданими параметрами або типом (рис. 6).

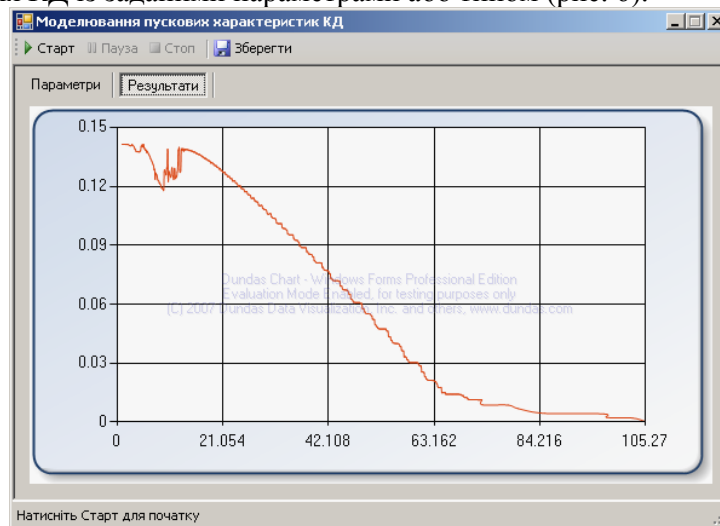


Рис. 6. Результати моделювання пускової характеристики КД М35SP-6

Як видно з рис. 6 отримана залежність пускового моменту від частоти напруги живлення КД відтворює представлену на рис. 3 теоретичну пускову характеристику, враховуючи при цьому «провали» низькочастотного резонансу, що дозволяє скорегувати вимірювальний процес під час контролю пускового моменту. Також, використовуючи пускову характеристику, важливо визначити частоту приємності КД, яка є максимальною частотою напруги живлення, при якій двигун здатен запуститися без втрати кроків [1, 2].

Описаний підхід моделювання пускових характеристик дозволяє не лише здійснити математичний опис цих залежностей, але й відтворити сам процес вимірювання пускового моменту. Цей факт важливий, перш за все, в методологічному аспекті, оскільки дозволяє представити розроблений підхід математичного моделювання у вигляді методу вимірювання, зміст якого полягає в наступному.

Контроль пускових характеристик КД ґрунтується на дискретному вимірюванні його моменту в пусковому діапазоні частоти напруги живлення при покроковому зменшенні навантаження, починаючи від максимального ( $M_{n.max}$ ) до того моменту, поки двигун зможе запуститися. Цей момент часу визначається за критерієм виходу КД із синхронізму (3) шляхом порівняння часу обертання вала КД у напрямку, який протилежний заданому, з півперіодом напруги живлення. Обробка отриманих значень пускового моменту для всіх частот напруги живлення, у вигляді пускової характеристики, спрямована на визначення частоти приємності та встановлення виду якості КД. Отже, маємо метод прискореного контролю пускових характеристик КД, що дозволяє підвищити швидкість вимірювання шляхом повної автоматизації процесів налаштування та керування системи вимірювального контролю і обробки даних.

## Висновки

У цій роботі розроблено новий метод прискороного контролю пускових характеристик крокових двигунів, що полягає в автоматизованому дискретному вимірюванні моменту в пусковому діапазоні частоти напруги живлення, з подальшою обробкою та нормуванням. У першу чергу, цей метод дозволяє підвищити швидкодію вимірювання. Також, за рахунок автоматизації підвищується вірогідність контролю пускового моменту КД шляхом вилучення людського фактора.

У результаті аналізу існуючих методів та засобів вимірювання пускового моменту встановлено, що однією з основних проблем є визначення моменту виходу КД із синхронізму. Для розв'язання цієї проблеми запропоновано критерій, який ґрунтується на порівнянні часу обертання вала КД у напрямку, який протилежний заданому, з півперіодом напруги живлення.

Для розробки методу прискороного контролю запропоновано спосіб математичного моделювання пускових характеристик КД, що дозволяє відтворити процес вимірювання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления / Т. Кенио; пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 200 с.
2. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / [Ивоботенко Б. А., Рубцов В. П., Садовский Л. А. и др.]; под общ. ред. М. Г. Чиликина. - М.: Энергия, 1971. - 624 с.
3. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: [навчальний посібник] / [Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк] - Вінниця: ВДГУ, 2001. - 219 с.
4. Кухарчук В. В. Математичні моделі крокового двигуна як об'єкта контролю / В. В. Кухарчук, В. В. Усов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Частина 1. - 2006. - №3. - С. 106 - 109.
5. Hughes A. Start/stopping rates of stepping motors: Improvement and prediction / A. Hughes, P. J. Lawrenson, P. P. Acarnley // Proc. International conference on stepping motors and systems. - 1976. - № 2. - PP. 150-157.
6. Дьяконов В. П. MathCAD 7 в математике, в физике и в Internet. / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова. - М.: Нолидж. - 1998. - 352 с.
7. Нортроп Т. Основы разработки приложений на платформе Microsoft .NET Framework: [Учебный курс Microsoft] / Т. Нортроп, Ш. Уилдермьюс, Б. Райан; пер. с англ. - М.: Русская Редакция, 2007. - 864с.
8. Стэкер М. А. Разработка клиентских Windows-приложений на платформе Microsoft .NET Framework: [Учебный курс Microsoft] / М. А. Стэкер, Т. Нортроп, С. Дж. Стэйн; пер. с англ. - М.: Русская Редакция, 2008. - 624с.

**Усов Віктор Васильович** – аспірант кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, тел.: (0432) 598444, victor386@rambler.ru  
Вінницького національного технічного університету.