УДК 621.375.(03)

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОГО ТА ДИНАМІЧНОГО РЕЖИМІВ РОБОТИ КРОКОВИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

© Николайчук М.Я., 2005
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Приведені результати досліджень параметрів та режимів роботи крокових двигунів середньої потужності, що широко застовуються в різних типах виконавчих механізмів, системах керування та офісній техніці. Запропоновані функціональні та схемотехнічні рішення для побудови засобів керування кроковими двигунами

До переваг застосування крокових двигунів слід віднести [1]:

1) дискретність кута повороту ротора та висока точність позиціювання;

2) забезпечення двигуном повного моменту в режимі зупинки (при живленні обмоток);

3) можливість швидкого старту, зупинки та реверсу;

4) висока надійність, пов'язана з відсутністю електричних щіток (термін роботи крокового двигуна фактично визначається терміном роботи підшипників);

5) однозначна залежність положення ротора від імпульсів керування (без зворотнього зв'язку);

6) широкий діапазон швидкостей обертання ротора без проміжного редуктора (швидкість пропорційна частоті імпульсів керування);

7) низькі напруги живлення та відсутність щіток, що дає можливість застосування крокових двигунів на об’єктах нафто-газової промисловості у вибухонебезпечних зонах [2].

До обмежень застосування крокових двигунів відносять:

1) можливість втрати контролю положення без сенсора положення та зворотнього зв’язку,

2) обмеження швидкості обертання часчтотою прийомистості,

3) невисока питома потужність.

Відомі три основні типи крокових двигунів [3]:

1) двигуни із змінним магнітним опором,

2) двигуни з постійними магнітами,

3) гібридні двигуни.

Тип двигуна визначається також за конфігурацією обмоток. Двигуни із змінним магнітним опором мають три (рідше чотири) обмотки з одним загальним виводом.

Двигуни з постійними магнітами найчастіше мають дві незалежні обмотки.

Гібридні двигуни є більш дорогими, ніж двигуни з постійними магнітами, але вони забезпечують меншу величину кроку, більший момент і більшу швидкість обертання.

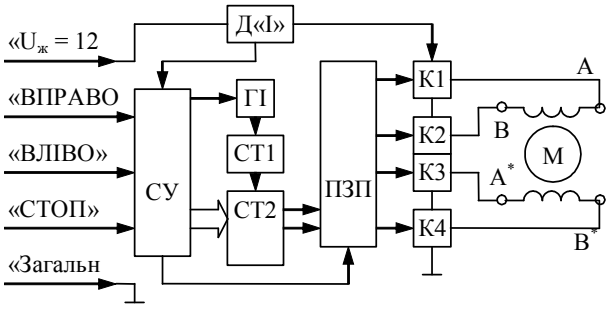
Залежність між числом полюсів ротора, числом еквівалентних полюсів статора і числом фаз визначає кут кроку S двигуна:

$$S = \frac{360}{N_{ph} \cdot P_h} = \frac{360}{N}, \qquad (1)$$

де N_{ph} - число еквівалентних полюсів на фазу (число полюсів ротора), P_h - число фаз крокового двигуна, N - повна кількість полюсів для всіх фаз.

Момент, створюваний кроковим двигуном, залежить від декількох чинників, а саме: швидкості обертання, величини струму в обмотках, способу управління та схеми драйвера.

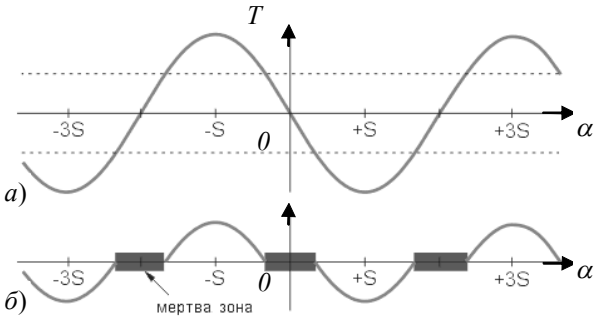
На рис. 1 приведена схема блоку управління кроковим двигуном.



СУ - схема управління ; ГІ - генератор імпульсів; Д«І» - датчик струму; СТ1 - двійковий лічильник-поділювач тактових імпульсів; СТ2 - двійковий реверсивний лічильник адреси ПЗП; ПЗП - постійний запам’ятовуючий пристрій; К1…К4 - силові ключі-формувачі імпульсів керування; М - кроковий двигун

Рис. 1. Функціональна схема управління кроковим двигуном

На рис. 2 показана залежність моменту T КД від кута повороту ротора α .



а) – ідеальний КД; б) – реальний КД

Рис. 2. Виникнення мертвих зон в результаті дії тертя у КД

В ідеального крокового двигуна ця залежність є синусоїдальною. Точки, які є кратними S, є положеннями рівноваги ротора для ненавантаженого двигуна і відповідають декільком послідовним крокам. Якщо до валу двигуна прикласти зовнішній момент, менший від моменту утримання, то кутове положення ротора зміниться на деякий кут Ф, що визначається так:

$$\Phi = \frac{N}{2\pi} \cdot \sin\left(\frac{Ta}{Th}\right), \qquad (2)$$

де T_a – зовнішній прикладений момент, T_h – момент утримання.

Кутовий зсув Φ є помилкою позиціонування навантаженого двигуна. Якщо до валу двигуна прикласти момент, що перевищує момент утримання, то під дією цього моменту вал провернеться. В такому режимі положення ротора є неконтрольованим. Звідси слідує, що два висновки: тертя знижує момент на валу двигуна, в результаті чого мають місце мертві зони d біля кожного положення рівноваги ротора:

$$d = \frac{S}{\pi/4} \arcsin\left(\frac{Tf}{Th}\right), \qquad (3)$$

де T_f – момент тертя.

Кожного разу, коли крововий двигун здійснює крок, ротор повертається на кут S. При цьому мінімальний момент має місце тоді, коли ротор знаходиться між сусідніми положеннями рівноваги.

Цей момент називають робочим моментом. Він визначає, який найбільший момент може долати двигун при обертанні з малою швидкістю. При синусоїдальній залежності моменту від кута повороту ротора цей момент складає [3]:

$$T_r = T_h / 20{,}5 . \qquad (4)$$

Якщо двигун здійснює крок при живленні двох обмоток, то робочий момент буде рівним моменту утримання для однієї обмотки живлення.

При конструюванні високошвидкісних КД потрібно враховувати, що обмотки двигуна є індуктивностями. Ця індуктивність визначає час наростання і спаду струму. Тому, якщо до обмотки прикладена напруга прямокутної форми, форма струму не буде прямокутною. При низьких швидкостях (рис. 3*а*) час наростання і спаду струму не здатні сильно вплинути на момент, проте на високих швидкостях момент зменшується. Пов'язано це з тим, що на високих швидкостях струм в обмотках двигуна не встигає досягти номінального значення (рис. 3*б*).

Для того, щоб не зменшувався різко момент, необхідно забезпечити високу швидкість наростання струму в обмотках двигуна, що досягається використанням спеціальних схем для їх живлення.

Для загального випадку необхідно знати залежність тривалості кроку від поточної швидкості. Кількість кроків, яку здійснює двигун при розгоні за час t, є такою:

$$N = A \cdot t^2 / 2 + Vt , \qquad (5)$$

де V – швидкість, виражена в кроках в одиницю часу; A – прискорення, виражене в кроках, ділених на час в квадраті.

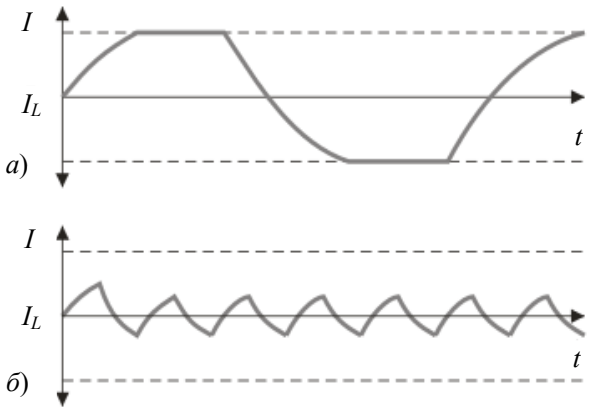


Рис. 3. Зміна струму в обмотках КД на різних швидкостях роботи

Для $N = 1$ тривалість кроку буде такою:

$$T = \frac{-V + \sqrt{V^2 + 2 \cdot A}}{A} . \qquad (6)$$

Після здійснення кроку КД його швидкість V_{new} стає такою:

$$V_{new} = \sqrt{V^2 + 2A} . \qquad (7)$$

Обчислення по приведених формулах вимагають значних витрат процесорного часу. Розрахунки можна істотно спростити, якщо задати постійність прискорення під час розгону і гальмування. В цьому випадку можна записати таку залежність тривалості кроку від часу розгону:

$$V = V_0 + At , \qquad (8)$$

де V_0 – початкова швидкість (мінімальна швидкість, з якою починається розгін).

В результаті отримаємо, що

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + At ,$$

або

$$T = \frac{T_0}{1 + T_0 At} . \qquad (9)$$

Обчислення по цій формулі здійснити значно простіше, проте для того, щоб змінити значення прискорення, необхідно зупинити двигун.

Крокovим двигунам властивий резонанс, який проявляється у вигляді раптового падіння моменту на деяких швидкостях. Це може привести до пропуску кроків і втрати синхронності. Резонанс проявляється тоді, коли частота кроків співпадає з власною резонансною частотою ротора КД.

Коли двигун здійснює крок, ротор не відразу встановлюється в нову позицію, а здійснює затухаючі коливання. При зменшенні амплітуди частота зростає. Ця частота залежить від кута кроку і від відношення моменту утримання до моменту інерції ротора. Більший момент утримання і менший момент інерції приводять до збільшення резонансної частоти. Резонансна частота F_0 обчислюється по формулі:

$$F_0 = \sqrt{\frac{N \cdot T_h}{J_R + J_L}} / 4\pi , \qquad (10)$$

де J_R – момент інерції ротора, J_L – момент інерції навантаження.

У статичному режимі струм протікає через одну з обмоток двигуна. Значення струму I_c в даному випадку виражається формулою:

$$I_C = U_C / R_{обм.} , \qquad (11)$$

де U_C і $R_{обм.}$ – відповідно напруга живлення і опір обмотки КД.

Як статичний можна розглядати режим обертання з малою швидкістю, коли індуктивний опір обмотки мало впливає на величину усередненого струму в обмотці, тобто тривалість імпульса τ значно перевищує тривалість перехідного процесу в обмотці крокового двигуна.

При збільшенні частоти керуючих імпульсів зменшується їхня тривалість і індуктивність обмоток впливає на величину струму.

Струм $I_Д(t)$ при подачі напруги живлення двигуна $U_Д$ наростає таким чином:

$$I_Д(t) = I_C \left(1 - \exp^{-\frac{R_{обм.} t}{L_{обм.}}} \right), \qquad (12)$$

а з урахуванням (11) таким чином:

$$I_Д(t) = \frac{U_C}{R_{обм.}} \left(1 - \exp^{-\frac{R_{обм.} t}{L_{обм.}}} \right). \qquad (13)$$

Часова діаграма зміни струму $I_Д$ приведена на рис. 4.

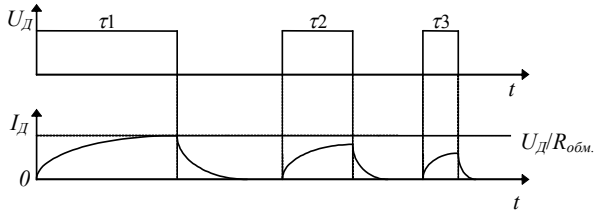


Рис. 4. Часова діаграма зміни динамічного струму $I_Д$

При зменшенні тривалості керуючих імпульсів τ струм в обмотці не встигає наростити до рівня згідно (10), внаслідок чого зменшується споживаний двигуном струм і потужність.

Вплив індуктивності на зменшення струму можна оцінити за допомогою індуктивного опору. Прямокутний сигнал (рис. 4) може бути розкладений в ряд Фур'є на непарні гармоніки. Частота першої гармоніки буде такою:

$$\omega = 2\pi \frac{1}{T} = 2\pi f . \qquad (14)$$

Таким чином модуль індуктивного опору обмотки складає:

$$|Z| = \sqrt{R_0^2 + (\omega L_{обм.})^2} , \qquad (15)$$

а усереднений струм буде таким:

$$I_Д = \frac{U_Д}{\sqrt{R_0^2 + (2\pi f L_{обм.})^2}} . \qquad (16)$$

Для підвищення рівня динамічного струму $I_Д$ до рівня статичного I_C необхідно збільшити напругу $U_Д$ при збільшенні частоти керуючих імпульсів, що подаються на крокovий двигун таким чином, щоб виконувалась умова $I_Д = I_C$.

З урахуванням (10) і (16), визначимо напругу живлення двигуна в залежності від частоти керуючих імпульсів:

$$\frac{U_C}{R_{обм.}} = \frac{U_Д}{\sqrt{R_{обм.}^2 + (2\pi f \cdot L_{обм.})^2}} . \qquad (17)$$

Провівши відповідні перетворення, отримаємо, що

$$U_Д = U_C \frac{\sqrt{R_{обм}^2 + (2\pi f \cdot L_{обм})^2}}{R_{обм}} = U_C \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f \cdot L_{обм}}{R_{обм}} \right)^2} . \qquad (18)$$

На рис. 5 наведена залежність напруги живлення $U_Д$ від частоти імпульсів керування f для двигуна ДШР56-1.8-1200. Для даного типу двигуна $U_C = 4{,}5 В$; $f_{\max} = 1300\ Гц$; $L_{ОБ} = 7{,}0\ мГн$; $R_{ОБ} = 1{,}8\ Ом$.

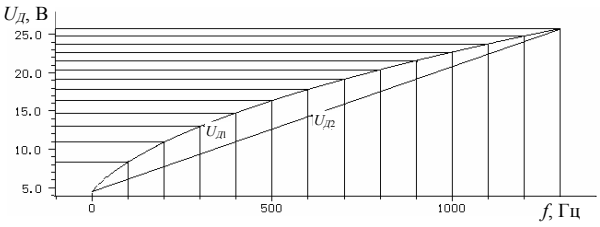


Рис. 5. Залежність $U_Д$ від частоти керуючих імпульсів f

Зміна напруги живлення дозволяє підтримувати струм в динамічному режимі на рівні $I_Д = I_C$, але ця залежність $U_{Д1}(f)$ є нелінійною.

Лінійна залежність $U_{Д2}(f)$ (рис. 5) реалізується значно простіше і описується рівнянням:

$$U_Д = U_C(1 + bf), \qquad (19)$$

де b – коефіцієнт, що визначає кут нахилу прямої $U_{Д2}(f)$.

Лінійна залежність приводить до збільшення струму споживання на (10-25)% відносно I_C в діапазоні частот від 40 Гц до 300 Гц.

1. http://www.Powerint.com. - Design Accelerator Kit (DAK-21) – DPA-Switch. 2. Интегральные микросхемы: Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. Издание 2-е. – М.: ДОДЭКА, 2000. – 608 с. 3. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М.П.Белов, В.А.Новиков, Л.Н.Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.

УДК 622.276.53:621.671(047)

БЕЗКОНТАКТНЕ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПОЛІРОВАНОГО ШТОКУ ШТАНГОВИХ ГЛИБИННО-НАСОСНИХ УСТАНОВОК

© Ровінський В.А., 2005
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Розглянутий спосіб вимірювання переміщення полірованого штоку штангової глибинно-насосної установки з використанням інфрачервоних оптичних давачів. Наведена структурна схема, розглянуті конструктивні особливості реалізації основних вузлів пристрою

Діагностування роботи штангових глибинно-насосних установок (ШГНУ) у переважній більшості випадків передбачає обробку динамограм, по формі яких здійснюється визначення стану заглибного обладнання. Як відомо, динамограма – це графічне відображення залежності навантаження на полірований шток від його переміщення, тому прилади, які забезпечують динамометрування, повинні мати можливість одночасно вимірювати силу, яка прикладена до полірованого штока, та його переміщення. Водночас вимірювач переміщення – це механічний вузол високої точності, який забезпечує високі метрологічні характеристики, однак є складним і високовартісним у виготовленні. Тому останнім часом існують спроби впровадження безконтактних методів вимірювання переміщення, які не містять складних механічних вузлів.

Найпоширенішими є два способи: вимірювання прискорення та вимірювання часу одного робочого циклу ШГНУ. Вимірювання прискорення здійснюється за допомогою акселерометра, сигнал якого перетворюється в сигнал переміщення шляхом подвійного інтегрування. Спосіб, як правило, має похибку, не меншу 5%, що зумовлена похибкою акселерометра. Причому вона суттєво зростає при зменшенні загальної циклічної робочої швидкості ШГНУ. Крім того, при роботі ШГНУ мають місце удари, які впливають на точність вимірювання переміщення акселерометричним способом і потребують складної обробки сигналу. Інший часто вживаний спосіб – це вимірювання часу, при якому верстат-качалка рухається строго по заданому закону із заданою швидкістю, що не завжди відповідає дійсності, а особливо тоді, коли нафтова свердловина, обладнана ШГНУ, довго експлуатується після капітального ремонту. Прилад такого типу фіксує початок циклу ШГНУ, а після