

Politechnika Poznańska
Instytut Technologii Mechanicznej

Laboratorium **Maszyny CNC**

Nr 5

Badanie dynamiki pozycjonowania
stołu obrotowego w zakresie małych przemieszczeń

Opracował: mgr inż. Krzysztof Netter
Dr inż. Wojciech Ptaszyński

Poznań, 23 lutego 2022

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie możliwości silników krokowych w napędach maszyn. Jednym z ważniejszych wskaźników charakteryzujących jakość napędu i sterowania jest zdolność do wykonywania minimalnych, stabilnych przemieszczeń w jak najkrótszym czasie z największą dokładnością. Zagadnienie to jest szczególnie ważne, gdy stoły obrotowe są napędzane silnikami skokowymi, gdyż silniki te charakteryzują się specyficznym, nieciągłym charakterem pracy.

2. Podstawowe wiadomości o silnikach krokowych

Silnik krokowy, nazywany także skokowym, przekształca ciąg sterujących impulsów elektrycznych w ciąg przesunięć kątowych. Jego wirnik obraca się o nieznaczne przyrosty kąta pod wpływem impulsów elektrycznych podawanych w odpowiedniej kolejności. Kierunek obrotów silnika jest ściśle związany z sekwencją podawanych impulsów, prędkość obrotów zależy od częstotliwości tych impulsów, a kąt obrotu od ich liczby. Oznacza to także, że o jakości działania silnika skokowego decyduje układ: sterowanie impulsowe – silnik krokowy. Silniki skokowe ze względu na budowę i istotę działania zalicza się do napędów o działaniu dyskretnym.

Do najważniejszych właściwości eksploatacyjnych silnika skokowego zalicza się:

- działkę elementarną (liczba skoków na jeden obrót), tj. kąt obrotu wałka silnika lub przemieszczenie liniowe, jakie gwarantuje silnik po dostarczeniu jednego impulsu sterującego,
- maksymalną częstotliwość roboczą decydującą o maksymalnej prędkości ruchu posuwowego,
- maksymalną częstotliwość sygnałów sterujących podczas rozruchu lub hamowania, zwaną częstotliwością startową,
- maksymalny moment napędowy rozwijany przez silnik.

Zalety silników krokowych:

- możliwość pracy w tzw. pętli otwartej (nie jest konieczne stosowanie układów pomiaru położenia ze względu na to, że liczba wykonanych kroków jest równa liczbie podanych impulsów),
- silnik pracuje z pełnym momentem w stanie spoczynku,
- dokładność ok. 3÷5% kroku (błąd ten nie kumuluje się z kroku na krok),
- możliwość bardzo szybkiego rozbiegu, hamowania i zmiany kierunku,
- możliwość uzyskania bardzo małych prędkości obrotowych i drobnych skokowych ruchów z obciążeniem mocowanym bezpośrednio na osi,
- szeroki zakres prędkości obrotowych.

Wady silników krokowych to:

- rezonanse mechaniczne pojawiające się przy niewłaściwym sterowaniu,
- trudności przy pracy z bardzo małymi i dużymi prędkościami.

3. Tryby pracy silnika skokowego

W zależności od częstotliwości impulsów sterujących podawanych na poszczególne fazy silnika wyróżnia się następujące rodzaje pracy: statyczną, quasi-statyczną, kinematyczną i dynamiczną.

Praca **statyczna** ma miejsce gdy prąd w uzwojeniu silnika ma wartość ustaloną i wytwarza pole nieruchome. Cechą charakterystyczną tego rodzaju pracy jest moment synchronizujący statyczny, tzn. moment przeciwstawiający się działaniu sił zewnętrznych wychylających silnik z położenia równowagi. Moment ten może być traktowany jako moment hamujący utrzymujący wirnik w położeniu równowagi. Zależność wartości momentu synchronizującego statycznego w funkcji kąta θ (tzw. kąta elektrycznego) pomiędzy osią biegunów wirnika i polem stojana można przyjąć z wystarczającą dokładnością za sinusoidalną i wyrazić wzorem:

$$M_{st} = z \cdot K_s \cdot i \cdot \sin \theta = M_{\max} \cdot \sin \theta$$

gdzie: z - liczba zwojów cewki stojana,

i_o - prąd w cewce stojana,

K_s - współczynnik zależny od wymiarów i budowy silnika.

θ - kąt elektryczny, któremu odpowiada kąt geometryczny:

$$\Theta_g = \frac{\theta}{Z_r \cdot b_p} \quad \text{dla silników hybrydowych lub o wirniku biernym albo}$$

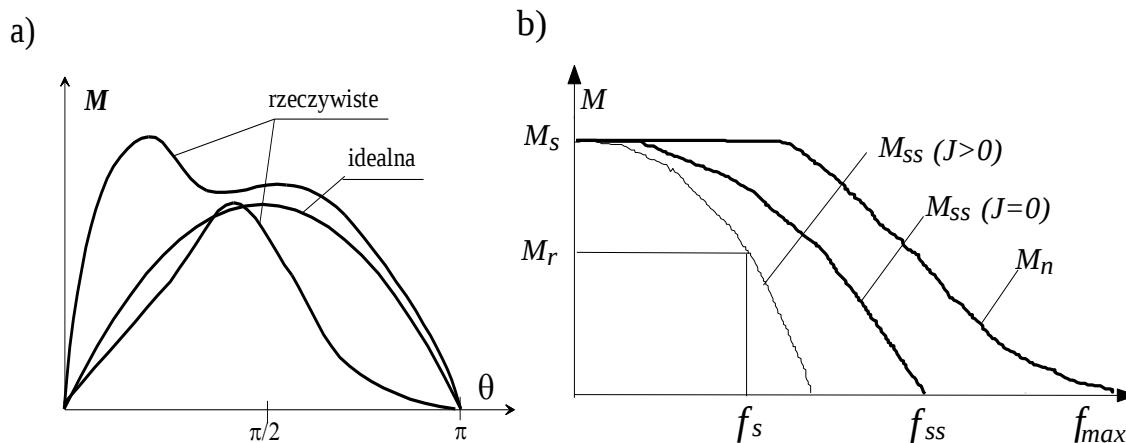
$$\Theta_g = \frac{\theta}{p_b \cdot b_p} \quad \text{dla silników o wirniku czynnym,}$$

p_b - liczba par biegunów wirnika,

b_p - liczba pasm uzwojenia sterującego (liczba faz).

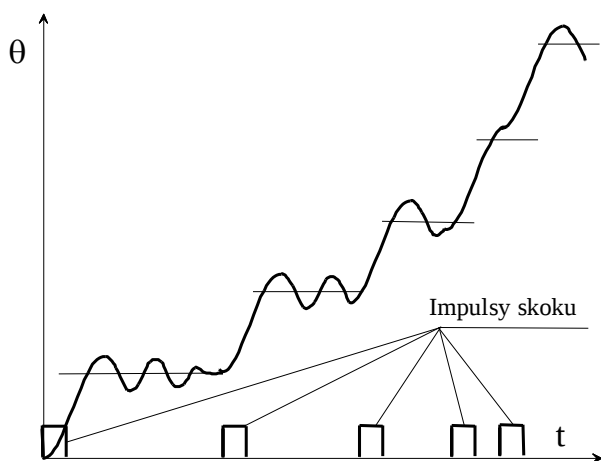
Powyższa zależność ma charakter teoretyczny i na jej kształt mają wpływ takie elementy konstrukcyjne jak: skos żłobków, rodzaj uzwojenia, rodzaj wzbudzenia od strony wirnika itp.

Rzeczywiste charakterystyki są mniej lub bardziej zbliżone do sinusoidy (rys. 1a). Widoczny jest tam wpływ momentu reluktancyjnego uwidaczniający się przesunięciem punktu maksimum momentu statycznego.



Rys. 1. Charakterystyki silnika skokowego: a) momentu statycznego w funkcji kąta θ ,
b) charakterystyka momentu w funkcji częstotliwości pracy silnika

Drugim rodzajem pracy silnika skokowego jest praca **quasi-statyczna** nazywana także **start-stopową** (rys. 2). Ma ona miejsce gdy wirnik wykonuje pojedynczy skok lub ciąg skoków z na tyle małą częstotliwością, że wirnik silnika zatrzymuje się przed wykonaniem następnego skoku. Działanie momentu synchronizującego i bezwładności są przyczynami oscylacji wirnika w czasie wykonywania skoku. Są one tłumione przez tarcie, prądy wirowe i histerezę.



Rys. 2. Praca quasi-statyczna silnika krokowego

Kolejny rodzaj pracy nazywany jest pracą **kinematyczną** (ustaloną). Ma on miejsce gdy częstotliwość impulsów sterujących jest ustalona i większa od częstotliwości pracy quasi-statycznej (wirnik nie zatrzymuje się po wykonaniu skoku). Silnik zachowuje się podobnie do silnika synchronicznego, a jego pracę charakteryzuje krzywa zależności momentu od częstotliwości przedstawiona na rys. 1b.

Innym rodzajem pracy jest praca **dynamiczna**, która występuje w trakcie procesów przejściowych, takiej jak; rozruch, hamowanie, nawrót, przejście z jednej częstotliwości pracy do innej.

W katalogach silników skokowych są podawane między innymi takie parametry jak: częstotliwość maksymalna rozruchu, częstotliwość maksymalna, częstotliwość graniczna nawrotu, moment rozruchowy, moment statyczny oraz charakterystyki mechaniczne.

Częstotliwość maksymalna rozruchu to największa częstotliwość impulsów zasilających silnik krokowy, przy której każdemu impulsowi odpowiada przesunięcie kątowe o znamionową wartość skoku (przy silniku nieobciążonym tj. gdy moment bezwładności masy obciążenia $I = 0$). Zawiera się ona zwykle w granicach od 100 do 8000 Hz.

Częstotliwość maksymalna silnika skokowego to największa częstotliwość impulsów zasilających, przy której każdemu impulsowi odpowiada jeszcze przesunięcie o znamionową wartość, przy czym zwiększanie częstotliwości od zera ma płynny charakter. Częstotliwości te mieszczą się w granicach od 1 kHz do 100 MHz.

Moment rozruchowy silnika to największa wartość momentu obciążenia, przy której jest możliwy rozruch silnika i praca start-stopowa.

Maksymalny statyczny moment synchroniczny to największa wartość momentu rozwijana przez silnik podczas jego pracy ustalonej.

W każdym z rodzajów pracy silnika krokowego mogą występować zjawiska rezonansowe prowadzące do niestabilności i utraty skoku. Wynika to z oscylacyjnego charakteru pracy silnika. Istotny wpływ na powstawanie drgań wywiera wielkość momentu bezwładności wirnika i elementów z nim połączonych oraz tłumienie układu. Oscylacje mogą być eliminowane na drodze mechanicznej przez zastosowanie specjalnych tłumików lub na drodze elektrycznej przez specjalny sposób sterowania.

Analiza literatury i danych katalogowych oraz porównanie różnych silników skokowych pozwala stwierdzić, że do napędzania pozycjonowanych stołów obrotowych szczególnie dobre właściwości mają silniki dwu i trzypasmowe.

Ich podstawowe zalety to:

- duży moment synchronizujący i rozruchowy (do 20 Nm),
- duża rozdzielczość wynosząca 500 lub 1000 skoków na obrót,
- ograniczenie zjawisk rezonansowych i dobre tłumienie oscylacji,
- duże częstotliwości: rozruchowa (3-8 kHz) i graniczna (100 MHz).

4. Stanowisko badawcze

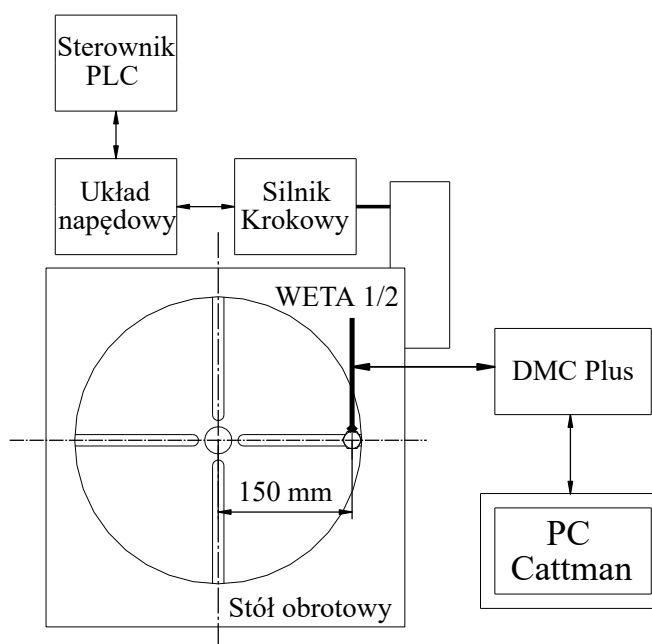
Schemat stanowiska badawczego jest przedstawiony na rys. 3. W skład stanowiska wchodzi:

- stół obrotowy FNd 320 z przekładnią spiroidalną o przełożeniu $i=1/90$ oraz przekładnią pasową zębatą o przełożeniu $i=1/2$
- silnik krokowy o 1000 kroków na obrót,
- sterownik PLC sterujący silnikiem krokowym,
- układ napędowy silnika krokowego,
- czujnik przemieszczeń liniowych typu WETA 1/2,
- system pomiarowy DMC Plus,
- komputer z oprogramowaniem Cattman.

Czujnik przemieszczeń liniowych typu WETA 1/2 o zakresie pomiarowym ± 1 mm, dokładność $1 \mu\text{m}$ i rozdzielczości $0,1 \mu\text{m}$ zamocowano prostopadle do promienia tarczy stołu na wysokości 150 mm. Przesunięcie liniowe jest mierzone w kierunku prostopadłym do promienia tarczy stołu i w płaszczyźnie równoległej do powierzchni tarczy stołu.

W ćwiczeniu należy wyznaczyć przebiegi dynamiki pozycjonowania stołu obrotowego FNd 320 z silnikiem krokowym jako odpowiedzi na wymuszenie typu ruchu do przodu o zadaną wartość obrotu stołu przy zmiennych częstotliwościach zasilania, liczbie kroków oraz wartości przyspieszenia.

Mierzone czujnikiem jest natomiast przesunięcie liniowe w czasie na średnicy zewnętrznej stołu. Otrzymane przebiegi ilustrują jak ważny jest proces stabilizacji pozycjonowania.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego

5. Przebieg ćwiczenia

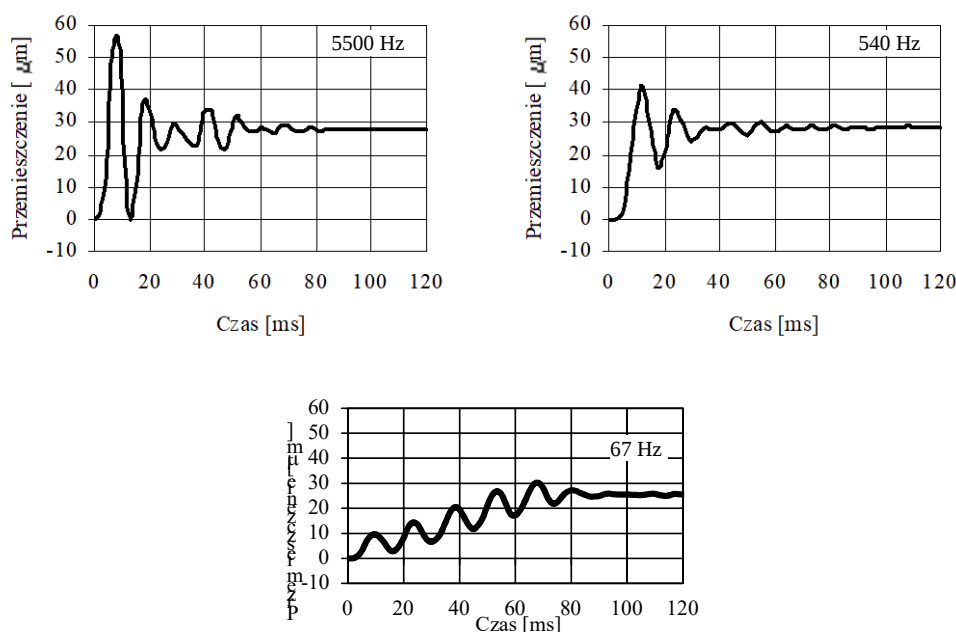
Dla podanych przez prowadzącego wartości przesunięć kątowych stołu (3 wartości) prędkości (2 wartości) oraz przyspieszeń ruchu (2 wartości) należy:

- na podstawie liczby kroków silnika krokowego oraz przełożenia przekładni mechanicznej obliczyć liczby kroków wykonanych przy zadanych wartościach przesunięć,
- zarejestrować odpowiedzi (przesunięcie w czasie) tarczy stołu dla wszystkich kombinacji danych wejściowych (12 pomiarów).
- zapisać lub naszkicować wykresy odpowiedzi ze szczególnym zwróceniem uwagi na nierównomierność ruchu oraz przesterowania,

UWAGA: ze względu na występowanie luzów w przekładni przed każdym kolejnym ruchem pomiarowym należy wykonać ruch nawrotny i powrotny o wartości co najmniej 1° .

6. Opracowanie wyników

Należy wyznaczyć przebiegi dokładności pozycjonowania stołu obrotowego z silnikiem krokowym jako odpowiedź na wymuszenie typu ruch o k skoków przy zmiennych częstotliwościach wymuszenia f oraz zmiennych czasach rozpędzania t_a .



Rys. 4. Przebieg dokładności pozycjonowania stołu obrotowego z silnikiem krokowym jako odpowiedzi na wymuszenie typu ruch o 5 kroków przy zmiennych częstotliwościach zasilania

7. Sprawozdanie

Sprawozdanie winno zawierać:

- temat oraz datę wykonania ćwiczenia, oznaczenie grupy,
- nazwiska osób biorących udział w ćwiczeniu,
- schemat stanowiska badawczego z opisem użytych elementów
- warunki pomiarów (dane zadane),
- opis wykonywanych czynności,
- opracowanie graficzne,
- wnioski.

8. Przygotowanie do ćwiczeń

Przed przystąpieniem do ćwiczenia wymagane są podstawowe wiadomości o silnikach krokowych.

UWAGA! Przed przystąpieniem do ćwiczenia grupa winna posiadać dysk przenośny (PenDrive) do zapisania otrzymanych wyników

9. Literatura

1. **Kosmol J.**, *Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie*, WNT, Warszawa 1998.
2. **Mierzejewski J.**, *Serwomechanizmy obrabiarek sterowanych numerycznie*, WNT, Warszawa 1977.
3. **Staniek R.**, *Poprawa dokładności i dynamiki pozycjonowania stołów obrotowych sterowanych numerycznie*, Mechanik nr2/2002.