

### **Sterowanie silników skokowych.**

Rozważając właściwości napędów z silnikami skokowymi należy brać pod uwagę silnik z układem sterowania - jako całość. Układ sterowania odgrywa decydującą rolę w kształtowaniu korzystnych cech napędu i w pełnym wykorzystaniu silnika skokowego.

Silnik skokowy może rozwijać dużo większy moment obrotowy, przy równocześnie większej częstotliwości pracy dzięki odpowiedniemu sterowaniu.

Stosując różne systemy sterowania dąży się do:

- podwyższenia częstotliwości granicznych pracy start – stopowej i synchronicznej;
- powiększenia wartości momentu rozruchowego;
- uzyskania mniejszych niż minimalna wartość skoku jednostkowego (dzielenie skoku);
- uzyskania płynnego rozruchu i łagodnego hamowania;
- skrócenia czasu pozycjonowania i tłumienia drgań;
- zwiększenia dokładności pozycjonowania przez kompensację zasilaniem błędów wykonania silnika;
- obniżenia poboru energii elektrycznej przy równoczesnym polepszeniu właściwości motorycznych napędu.

### **Parametry silników skokowych.**

Poznanie podstawowych parametrów i właściwości silnika skokowego jest potrzebne by właściwie interpretować dane katalogowe silników i móc dobrać właściwy silnik do zadania sterowanie. Najważniejsze parametry to:

**Maksymalne momenty trzymające** w stanie, gdy silnik jest zasilany napięciem znamionowym i nie obraca się.

**Maksymalne momenty trzymające bez zasilania** - gdy sterowanie silnika jest wyłączone i bez obracania się. Zależą wyłącznie od typu i wielkości silnika.

**Maksymalna częstotliwość pracy start-stopowej** – prędkość krokowa, z którą silnik może zacząć lub przerwać pracę w sposób natychmiastowy. Definiowane dla obciążenia osi tylko momentem bezwładności rotora.

**Maksymalna prędkość pracy synchronicznej** – maksymalna prędkość krokowa silnika przy malejącym do zera momencie obciążenia.

**Moment bezwładności rotora** - moment bezwładności samego nieobciążonego rotora.

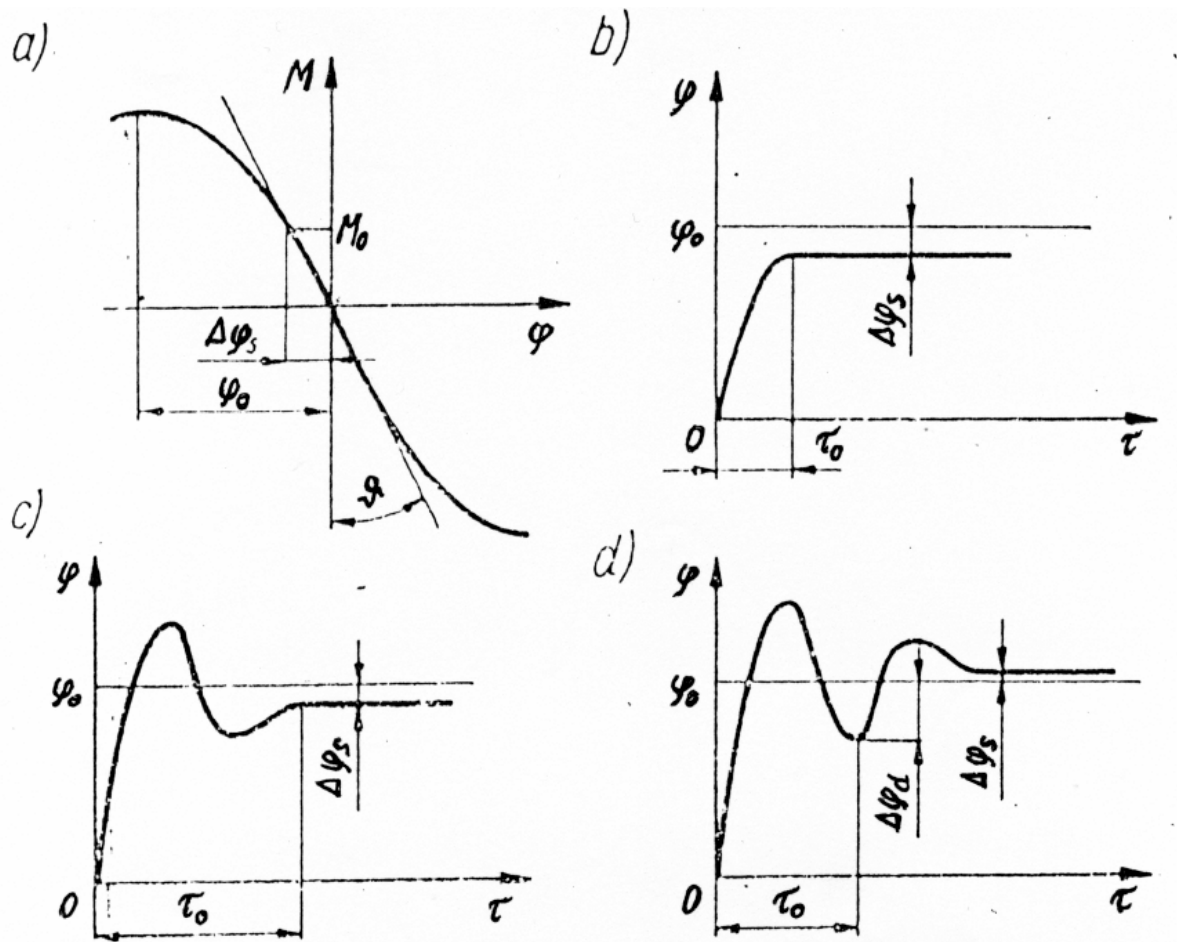
**Czas pozycjonowania** elementu napędzanego przez silnik jest zazwyczaj uzależniony od amplitudy i czasu trwania drgań wirnika w chwili zatrzymania. Szybkość zaniku tych szkodliwych, z punktu widzenia czasu pozycjonowania, drgań zależy głównie od:

- współczynnika tłumienia wewnętrznego silnika (lepsze tłumienie wewnętrzne mają silniki magnetoelektryczne i hybrydowe niż reluktancyjne),
- wartość skoku jednostkowego (przy mniejszych wartościach skoku warunki tłumienia są lepsze),
- charakteru obciążenia (obciążenia typu bezwładnościowego sprzyjają powstawaniu drgań, natomiast obciążenie typu tarcia suchego i wiskotycznego poprawia warunki tłumienia).

Na **dokładność pozycjonowania** mają wpływ następujące czynniki:

- dokładność wykonania pojedynczego skoku przez silnik skokowy, co wynika z precyzji wykonania samego silnika,
- statyczny błąd pozycjonowania wynikający z momentu obciążenia,
- dynamiczny błąd pozycjonowania spowodowany drganiami wałka silnika w chwili pozycjonowania.

Istotę powstawania **statycznego błędu pozycjonowania** pokazuje rys.10. Jeżeli wałek silnika obciążony jest momentem  $M_o$ , to wirnik nie osiągnie po wykonaniu skoku położenia zadanego ale zatrzyma się w położeniu obróconym o kąt  $\Delta\varphi_s$  w stosunku do położenia wirnika dla nieobciążonego silnika. Warunki równowagi między momentem synchronizującym silnika a momentem obciążenia mogą ustalać się poza teoretycznym punktem równowagi dla nieobciążonego silnika. W zależności od wielkości i jakości obciążenia błąd statyczny może mieć stale ten sam znak i wtedy jest on istotny przy pracy rewersyjnej (rys.10.b.), lub może przyjmować dowolny znak co pokazano na (rys. 10. c i d). Na statyczny błąd pozycjonowania może nakładać się jeszcze dynamiczny błąd pozycjonowania wynikający stąd, że w chwili gdy zakładamy, iż pozycjonowanie zostało już zakończone, w rzeczywistości wałek silnika drga jeszcze i jego chwilowe położenie nie pokrywa się z położeniem końcowym. Dynamiczny i statyczny błąd pozycjonowania zależy od charakteru i wielkości obciążenia oraz od rodzaju silnika tzn. od współczynnika tłumienia wewnętrznego i kąta pochylenia charakterystyki statycznej momentu synchronizującego  $\vartheta$  (rys.10.a).



Rys.10. Błędy pozycjonowania: a) schemat powstawania statycznego błędu pozycjonowania, b) statyczny błąd pozycjonowania o określonym znaku, c) statyczny błąd pozycjonowania o nieokreślonym znaku, d) dynamiczny błąd pozycjonowania:  $M$  – moment,  $\varphi$  – kąt wychYLENIA wirnika,  $\vartheta$  – kąt nachYLENIA charakterystyki statycznej,  $\varphi_0$  – jednostkowy skok wirnika.

**Zjawiska rezonansowe**, które mogą w poważnym stopniu zakłócić pracę mechanizmu, również zależą głównie od typu i rodzaju silnika oraz charakteru obciążenia. Znając charakterystyki częstotliwościowe silnika, a więc również zakresy częstotliwości rezonansowych można w większości przypadków tak dobrać parametry pracy aby uniknąć niepożądanych zjawisk rezonansowych.

**Maksymalny pobór mocy silnika** i związana z tym **temperatura pracy** jest istotnym parametrem z tego względu, że silnik pracuje często w zamkniętych obudowach i trzeba przewidywać odpowiednie radiatory odprowadzające ciepło, bądź też chłodzenie czynne przy użyciu wentylatora. Są to parametry charakteryzujące dany silnik i zależą w dużej mierze od zastosowanego sterownika elektronicznego. By nie przekraczać wydzielanej mocy podaje się następujące parametry elektryczne silnika:

**Napięcie znamionowe uzwojeń,**

**Napięcie zasilania** – napięcie przy którym silnik powinien być eksploatowany, można forsować dla sterowania PWM.

**Napięcie znamionowe** uzwojeń

Prąd – nominalne natężenie prądu jakie należy stosować by nie przeciążać i przegrzewać silnika.

**Rezystancja** – rezystancja uzwojenia.

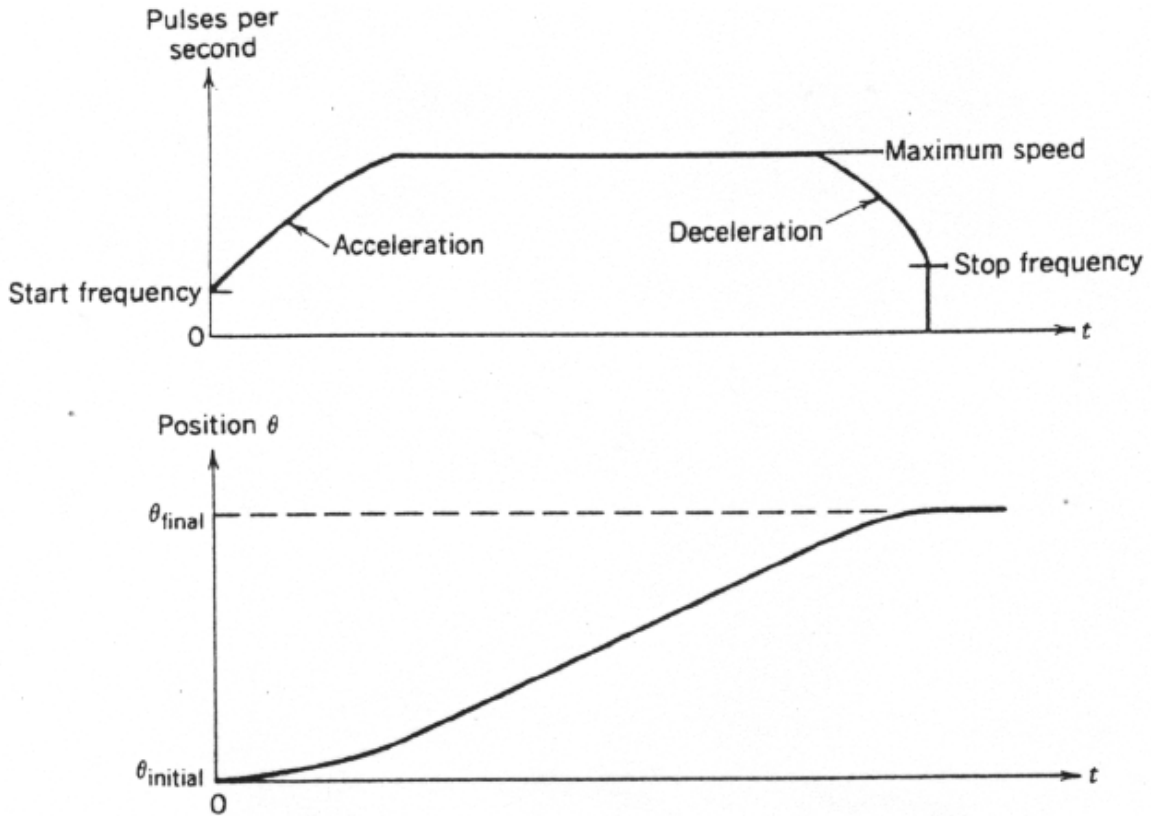
**Masa i wymiary gabarytowe** nabierają dużego znaczenia w konstrukcjach, w których mechanizm napędowy jest przemieszczany np. mechanizm obrotu głowicy piszącej w drukarce, który znajduje się na wózku poruszającym się wzdłuż zapisywanego wiersza.

### **Sterowanie silników skokowych.**

Zasilanie silników skokowych wg odpowiedniego algorytmu prowadzić może do znacznego, często kilkukrotnego polepszenia parametrów napędu przy równoczesnym obniżeniu ilości pobieranej energii. Jest to możliwe, gdyż istota takiego postępowania sprowadza się do dozowania odpowiedniej wartości energii elektrycznej w odpowiednich chwilach cyklu zasilania. Energię dozuje się tylko w niezbędnych ilościach, zaś proces projektowania algorytmu zasilania poprzedzany być musi dokładną analizą działania układu napędowego, uwzględniającą zarówno wszystkie cechy charakterystyczne silnika, jak i obciążenia.

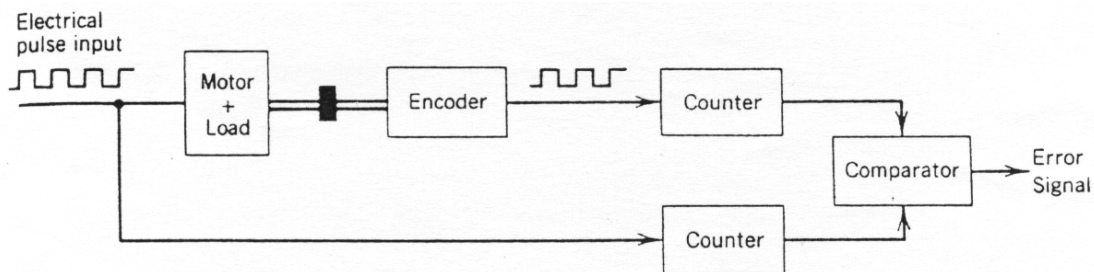
Zasadniczo wyróżnia się dwa systemy sterowania silnikami skokowymi: **otwarty** i **zamknięty**.

**System sterowania otwarty** charakteryzuje się brakiem czynnej kontroli położenia wirnika. W układzie otwartym dąży się do minimalizacji czasu przemieszczenia od pozycji do pozycji, tak aby nie było zagrożenia zgubienia skoku. Szybkość, czyli liczba kroków lub impulsów sterowania na sekundę, musi być dostosowana do właściwości silnika i obciążenia (a także zmienności obciążenia). Przebieg prędkości w czasie dla zadanego przemieszczenia pokazano na rys.8.



*Rys. 8. Praca silnika skokowego w otwartym układzie sterowania.*

Na etapie testowania układu napędu można się posłużyć dodatkowym przetwornikiem położenia sprawdzającym, czy nie występuje gubienie skoków (rys.9.)



*Rys. 9. Układ do wykrywania gubienia skoków przez silnik w układzie otwartym.*

Przy systemie sterowania zamkniętym z wałkiem silnika związany jest obrotowy przetwornik położenia, z którego informacja wprowadzana jest do układu sterującego. Informacja o położeniu wirnika wykorzystywana jest do aktywnej kontroli położenia albo do formowania sygnałów sterujących w sposób zapewniający optymalne warunki pracy silnika.

Układy sterowania otwarte są bardziej podatne na zakłócenia i nie zapewniają najkorzystniejszych warunkówysterowania silnika. Ze względu na niższy koszt są bardziej rozpowszechnione i w wielu przypadkach zapewniają poprawny sposób pracy napędu.

**Parametry napędu dyskretnego jako podstawa wyboru odpowiedniego silnika skokowego.**

Dobór odpowiedniego silnika do projektowanego napędu ma bardzo istotny wpływ na właściwości eksploatacyjne mechanizmu.

Zasadnicze parametry, które należy uwzględnić przy doborze silników skokowych do napędu dyskretnego, to:

- a) maksymalne częstotliwości pracy start – stopowej i synchronicznej przy danym momencie obciążenia,
- b) maksymalny moment trzymający w trakcie pracy oraz po włączeniu napięcia zasilania,
- c) czas pozycjonowania przy wykonywaniu pojedynczego skoku lub serii skoków,
- d) dokładność pozycjonowania,
- e) podatność na zjawiska rezonansowe – częstotliwości rezonansowe,
- f) maksymalny pobór mocy i maksymalna temperatura pracy,
- g) waga i wymiary gabarytowe.

Podstawowe wymagania stawiane silnikom skokowym:

- a) wysoka dokładność pozycjonowania wirnika (precyzja wykonania mechanicznego, symetria uzwojeń, sposób komutacji),
- b) duży moment obrotowy w szerokim zakresie częstotliwości (indukcyjności uzwojeń, straty przemagnesowania),
- c) duży moment synchronizujący w ustalonym stanie prądowym (przydatność do pracy statycznej, moment trzymający),
- d) dobre właściwości dynamiczne (zależne od: elektromagnetycznej stałej czasowej, wewnętrznego tłumienia magnetycznego, obciążenia i sposobu sterowania).

W celu rozwiązania problemu **doboru silnika do projektowanego mechanizmu** napędzanego trzeba za punkt wyjścia przyjąć takie wymagania jak:

- moment obciążenia  $M_o$  i moment bezwładności tego mechanizmu  $J_o$ ,
- czas wykonania operacji  $\tau$ ,
- wartość kąta obrotu  $\alpha$  o jaki musi obrócić się wirnik silnika.

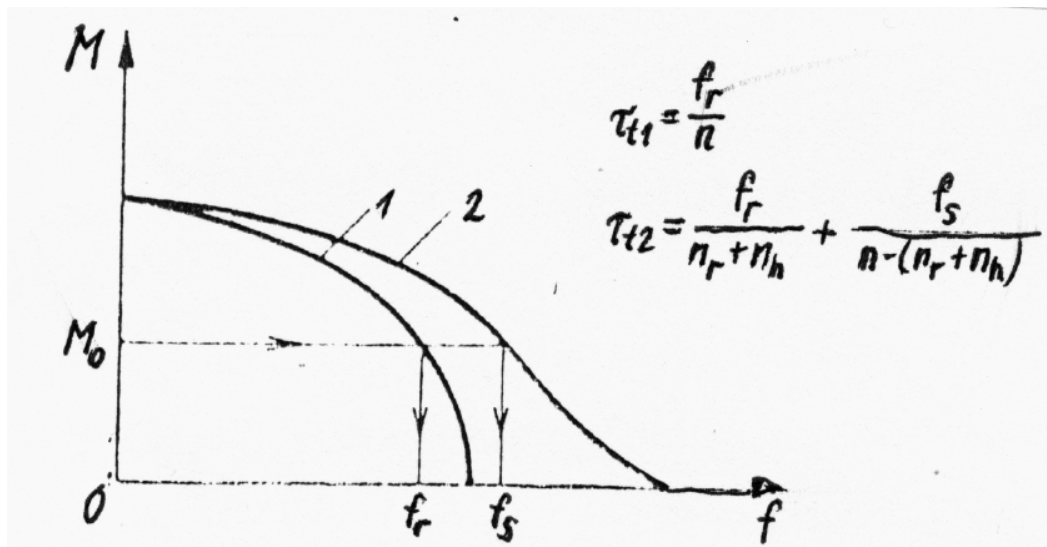
Wymienione trzy parametry pozwalają wstępnie wyselekcjonować grupę silników, która może spełnić założenia mechanizmu. Mając zadany kąt obrotu wirnika można dzieląc go przez wartość skoku jednostkowego  $\varphi_o$  obliczyć ile skoków wirnika  $n$  przypada na ruch

roboczy  $n = a / \varphi_o$ . Następnie z charakterystyki częstotliwościowej odczytuje się maksymalną częstotliwość silnika przy zadanym momencie obciążenia (rys.11.). Mając wartość maksymalnej częstotliwości i liczbę skoków, o jaką ma się obrócić wałek silnika można wyznaczyć przybliżony czas wykonania operacji. W przypadku, gdy liczba skoków \_ przybiera większe wartości np. powyżej 20 skoków, korzystnie jest sterować silnik tak, by ruszał on z maksymalną częstotliwością pracy, start-stopowej  $f_r$ , rozpędzał się do maksymalnej częstotliwości pracy synchronicznej  $f_s$  i przed zatrzymaniem hamował znowu do częstotliwości pracy start-stopowej. Przybliżony czas wykonania ruchu oblicza się wówczas z zależności

$$\tau_{t2} = \frac{f_r}{n_r + n_h} + \frac{f_s}{n - (n_r + n_h)}$$

gdzie:  $n_r$  - liczba skoków rozruchowych,  $n_h$  - liczba skoków hamujących; w zależności od wartości skoku i charakteru obciążenia  $n_r$  i  $n_h$  przyjmują w praktyce wartości od 3 do 8.

Następnym krokiem przy doborze silników jest rozważenie dokładności pozycjonowania. W przypadku wysokich wymagań dokładności w połączeniu z wymaganiem minimalnego czasu pozycjonowania bardzo istotną rolę odgrywają oscylacje wału silnika w chwili pozycjonowania. W celu uniknięcia w mechanizmie długotrwałych drgań pochodzących od silnika należy wybrać silnik o możliwie małej wartości skoku jednostkowego pamiętając jednocześnie, że dla podobnych wartości skoku i wielkości gabarytowych silniki magnetoelektryczne i hybrydowe mają znaczne wyższy współczynnik tłumienia drgań niż silniki reluktancyjne. Właściwy dobór wartości skoku silnika i zasady jego działania może mieć decydujący wpływ na wartości statycznego i dynamicznego błędu pozycjonowania.



Rys.11. Wyznaczenie maksymalnych częstotliwości pracy z charakterystyk częstotliwościowych silnika. Charakterystyki pracy: 1 – start-stopowej, 2 – synchronicznej.  $M$  – moment,  $f$  – częstotliwość,  $f_r$  – częstotliwość maksymalna pracy start – stopowej,  $f_s$  – częstotliwość pracy synchronicznej

Decydując się na określony typ silnika, trzeba brać jednocześnie pod uwagę wymagania dotyczące momentu trzymającego w stanie gdy silnik jest wyłączony i podatności na zjawiska rezonansowe - wartości częstotliwości rezonansowych.

Kolejnym krokiem doboru silnika jest spełnienie wymagań dotyczących wymiarów geometrycznych i wagi silnika. Przy wymaganiu minimalnej masy lepsze będą silniki reluktancyjne niż hybrydowe i magnetoelektryczne. Często założenie minimalnej masy jest trudne do spełnienia i trzeba rezygnować z wcześniej przyjętych parametrów dotyczących pozycjonowania lub dokładności pozycjonowania ze względu na zbyt duże masy silników spełniających pozostałe parametry.

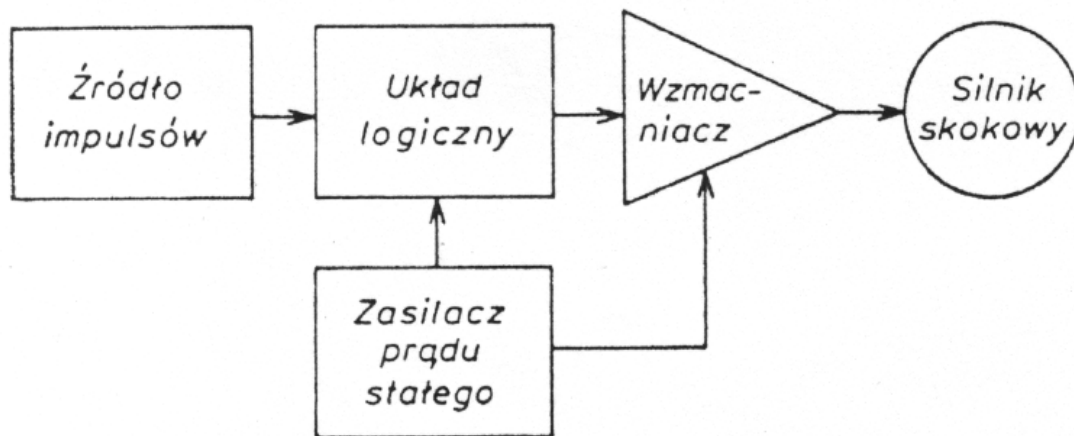


### Wpływ sterowania silnika na parametry napędu dyskretnego.

Stosując określony typ silnika skokowego należy dokonać analizy sterowników elektronicznych, które mogą być zastosowane. Sterownik może w istotny sposób wpłynąć na zmianę parametrów napędu np. znacznie zmniejszyć czas pozycjonowania i zwiększyć jego dokładność.

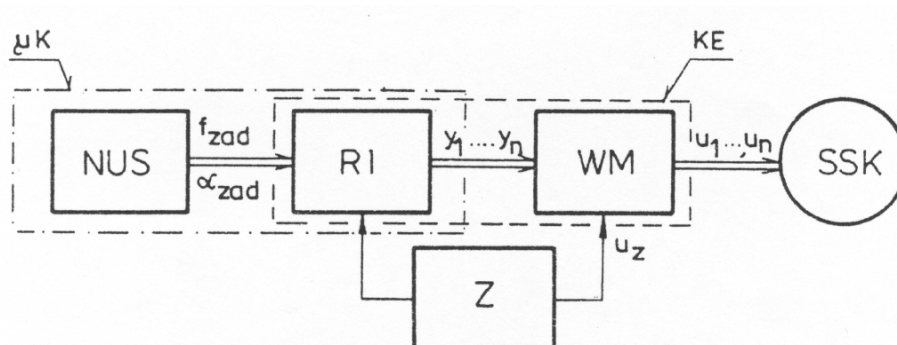
Ogólna struktura napędu z silnikiem skokowym pokazana na rys.12. składa się z:

- źródła impulsów sterujących,
- układu logicznego,
- wzmacniacza mocy,
- silnika skokowego,
- zasilania prądu stałego.



Rys.12. Schemat blokowy układu napędowego z silnikiem skokowym.

Na rysunku 13 pokazano podobny schemat z zaznaczeniem funkcji i sygnałów wyjściowych poszczególnych bloków. Zaznaczono też występującą często integrację w jednym układzie wielu funkcji.



Rys.13. Ogólna struktura napędu z silnikiem skokowym.

- Źródłem impulsów sterujących może być w najprostszym przypadku generator.

Współcześnie są to najczęściej systemy mikroprocesorowe generujące sekwencję impulsów oraz ich liczbę, aby przeprowadzić układ mechaniczny od punktu do punktu

$(\alpha_{zad})$  wg zadanych prędkości  $(f_{zad})$ . Zawierają w sobie często układ logiczny (rozdzielacz, komutator impulsów, system mikrokomputerowy).

- Układ logiczny zamienia zadany sygnał przemieszczenia  $(\alpha_{zad})$ , częstotliwość  $(f_{zad})$ , kierunku  $(dir)$  na sygnały sterujące poszczególne tory wzmacniacza mocy  $(y_1, ..., y_n)$ . Układ ten łączy się często ze wzmacniaczem mocy, tworząc komutator elektroniczny (KE).
- Wzmacniacz mocy budowany dla każdego pasma silnika przetwarza sygnały sterujące  $(y_1, ..., y_n)$  na właściwe napięcia na zaciskach uzwojenia  $(u_1, ..., u_n)$  lub prądy. Zawiera w sobie też stosowne zabezpieczenia.
- Konstrukcja sterownika musi uwzględniać warunki zasilania (np. zasilanie jedno, dwunapięciowe). Zasilanie bateryjne lub sieciowe narzucają odmienne rozwiązania całego urządzenia.

Analizując systemy sterowania i stosowane układy elektroniczne należy wydzielić (opierając się na rys.13.) trzy warstwy zagadnień:

- zapewnienie odpowiedniej charakterystyki ruchu silnika (tryb pracy, przyspieszenie, zwalnianie).
- zapewnienie właściwej sterującej sekwencji parametrów zasilania poszczególnych pasm silnika (praca skokowa, półskokowa, mikroskokowa). Uwzględnia to typy zasilania poszczególnych pasm silnika (sterowanie bipolarne i unipolarne). Należą tu też zagadnienia pewnych specjalnych typów sterowania (np. komutacja kombinowana).
- przetworzenie sygnału sterowania poszczególnego pasma na właściwy poziom prądu (napięcia) w uzwojeniu (stabilizacja ciągła, sterowanie impulsowe). Powiązane jest to z właściwościami elektrycznymi uzwojenia (forsowanie włączenia, przyspieszanie wyłączenia).

Zwykle stawia się zadanie jak najkrótszego czasu wykonywania zadanego ruchu przez elementy mechanicznego z zadaną dokładnością.

### **Podstawowe tryby pracy silnika.**

Wyróżniamy dwa podstawowe tryby pracy silnika skokowego:

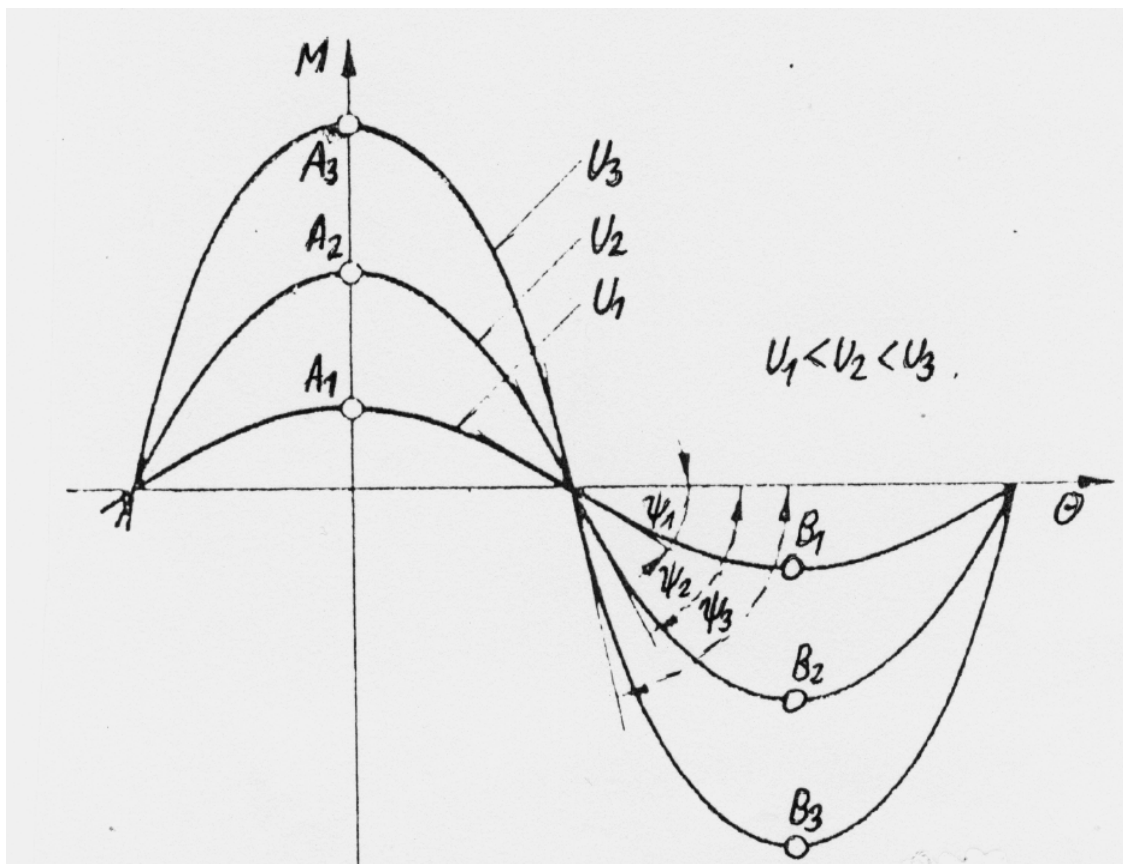
- praca silnika z małymi częstotliwościami (praca start-stopowa),
- praca silnika z dużymi częstotliwościami (praca bliska częstotliwości synchronicznej).

### **Praca silnika z małymi częstotliwościami.**

Małe częstotliwości rozumiane są jako częstotliwości odpowiadające pracy start-stopowej silnika. W urządzeniach precyzyjnych wykorzystuje się silnik do przesunięć roboczych elementu napędzanego, na które składa się kilka skoków wykonywanych z maksymalną częstotliwością pracy start-stopowej.

### **Dynamika wykonania pojedynczego skoku.**

Wirnik silnika skokowego po wykonaniu pojedynczego skoku wykonuje ruch drgający wokół położenia równowagi. Przebieg ten jest podobny dla wszystkich typów silników z tym, że w zależności od współczynnika tłumienia wewnętrznego oraz wartości skoku jednostkowego drgania wokół położenia równowagi trwają dłużej bądź krócej. Są one formą wytracania energii kinetycznej, jaką ma wirnik po dojściu do zadanego położenia równowagi. Im większy jest moment bezwładności obciążenia tym dłuższy jest czas wykonania skoku oraz czas uspokojenia drgań. Współczynnik tłumienia drgań ma w zasadzie dwie składowe: współczynnik tłumienia wewnętrznego silnika, zależny od oddziaływania mechanizmu obciążającego silnik. Dodatkowe obciążenie np. w postaci tarcia suchego bardzo skutecznie poprawia warunki tłumienia. Kształt charakterystyki statycznej momentu synchronizującego ma bardzo istotny wpływ na przebieg wykonania skoku i uspokojenia się drgań wirnika. Im większy jest kąt  $\psi$  (rys.14.) przecięcia zbocza stabilnego charakterystyki z osią odciętych, tym większa jest częstotliwość oscylacji wirnika i z reguły krótszy czas ich trwania.

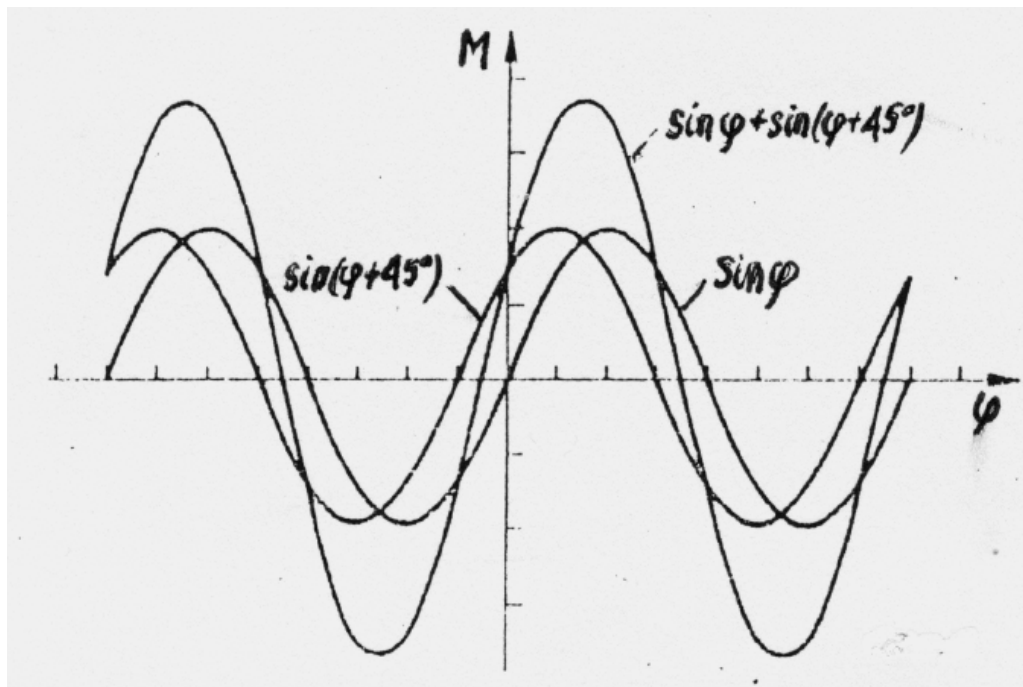


Rys.14. Charakterystyka statyczna momentu synchronizującego dla różnych napięć silnika.  
AB – zbocze stabilne charakterystyki

Charakterystyka statyczna danego silnika może być zmieniana w pewnych granicach przez zmianę napięcia zasilania. Podwyższenie napięcia powoduje zwiększenie maksymalnego momentu synchronizującego a także zwiększenie kąta  $\psi$  nachylenia zbocza stabilnego charakterystyki co przeważnie wpływa korzystnie na ostatnią fazę pozycjonowania. Wraz ze zmianą kształtu charakterystyki zmienia się współczynnik tłumienia wewnętrznego silnika tak, że dobór odpowiedniego, z punktu widzenia tłumienia oscylacji wirnika, napięcie zasilania jest istotnym elementem wpływającym na dynamikę wykonania pojedynczego skoku przez wirnik silnika.

Podobne znaczenie ma sposób sterowania silnika. Najpowszechniej stosowane są dwa rodzaje sterowania (omawiane także później):

- sterowanie symetryczne dwufazowe, dla którego w każdej chwili zasilane są dwie fazy silnika i po każdym impulsie sterującym wirnik wykonuje skok o wartości nominalnej,
- sterowanie niesymetryczne, połówkowe, dla którego zasilane są na zmianę raz jedna raz dwie fazy i wirnik wykonuje po każdym impulsie sterującym skok równy połowie wartości skoku nominalnego.



Rys.15. Przebieg charakterystyki statycznej dla dwóch sąsiednich faz zasilanych pojedynczo i charakterystyka dla jednoczesnego zasilania tych faz.

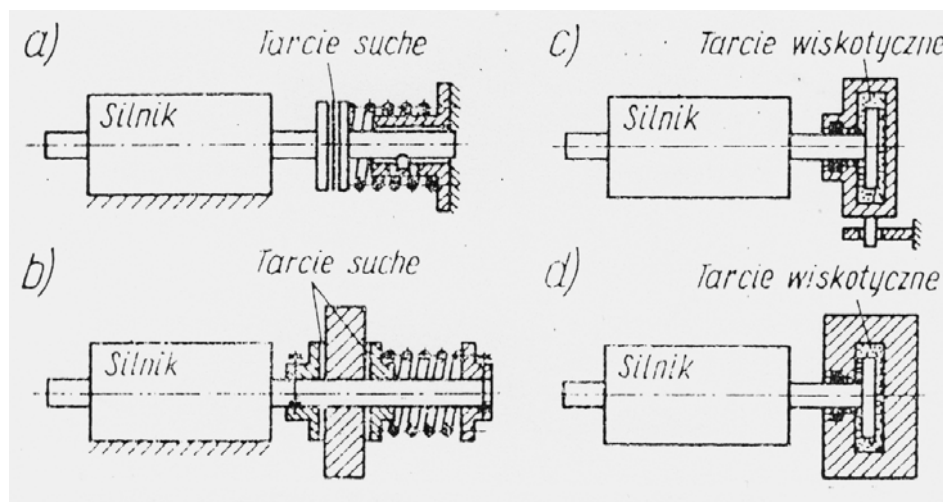
Na rys.15. pokazano przebieg charakterystyk statycznych momentu synchronizującego dla zasilania pojedynczo dwóch sąsiednich faz oraz przebieg charakterystyki w przypadku jednoczesnego zasilania tych faz dla silnika czterofazowego. Na podstawie wyżej przedstawionych uwag i porównania przebiegu charakterystyk oczywiste jest (ze względu na wartość momentu synchronizującego a więc i większą dokładność pozycjonowania i szybkość zaniku drgań), że korzystniejsze warunki z punktu widzenia pracy dynamicznej są dla pierwszego rodzaju komutacji napięcia. Spośród parametrów sterowania nie tylko sposób komutacji napięcia oddziałuje na dynamikę wykonania pojedynczego skoku. Zmiana stałej czasowej fazy obwodu elektrycznego, np. przez wstawienie w obwód szeregowego opornika może przynieść widoczne zmiany w czasie i amplitudzie drgań wirnika. Zmniejszenie stałej czasowej powoduje, że wirnik silnika jest gwałtowniej przyspieszany na początku ruchu, uzyskuje więc większą energię kinetyczną i proces jej wytracania w trakcie oscylacji wirnika wokół położenia równowagi musi trwać dłużej.

Drgania w ostatniej fazie pozycjonowania zależą od wielu czynników a ponadto charakter wykonania pojedynczego skoku jest określoną właściwością silnika. Silniki reluktancyjne charakteryzują się małym tłumieniem wewnętrznym a więc również długotrwałymi drganiami o dużej amplitudzie po wykonaniu skoku. Silniki magnetoelektryczne mają znacznie lepsze właściwości tłumienia drgań ale ustępują jeszcze pod tym względem silnikom hybrydowym. Dla danego typu silnika charakter wykonania

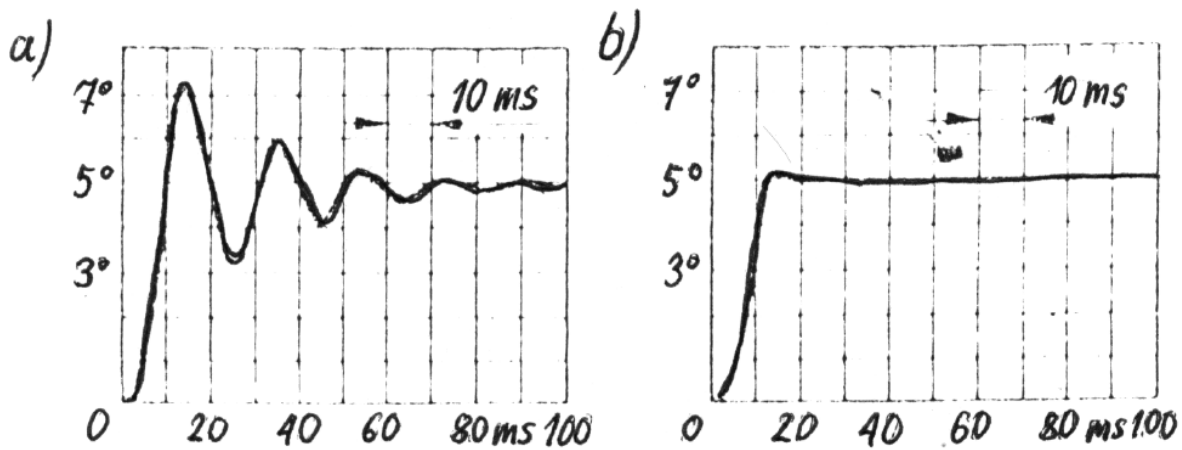
pojedynczego skoku jest inny dla małych wartości skoków ( $1,8^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $3,45^\circ$ ) a inny dla dużych skoków ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$  czy  $180^\circ$ ) – dla tej ostatniej grupy drgania są oczywiście znacznie silniejsze.

Aby skrócić czas wykonania pojedynczego skoku i zminimalizować czas pozycjonowania definiowany jako czas obrotu wirnika o kąt pojedynczego skoku i uspokojenia się drgań, stosuje się różne metody postępowania.

Przede wszystkim należy przeanalizować charakter obciążenia i na podstawie tej analizy dobrać typ oraz wielkość silnika do danego mechanizmu napędzanego. Zmiana charakteru obciążenia przez np. wprowadzenie dodatkowego momentu tarcia może przy znikomym nakładzie kosztów wydatnie poprawić warunki pracy mechanizmu przez znaczne ograniczenie drgań. następnie należy sprawdzić prawidłowość doboru parametrów zasilania i sterowania silnika a więc napięcia zasilania i opornika szeregowego w obwodzie elektrycznym faz silnika. Rzadko zdarza się by wartość obciążenia odpowiadała dokładnie nominalnemu obciążeniu przewidzianemu dla danego silnika. Dlatego, aby lepiej dopasować silnik do danego obciążenia należy optymalizować jego parametry zasilania i sterowania. W przypadku, gdy przeprowadzenie ww. poprawek parametrów napędu nie przyniesie oczekiwanych rezultatów należy zastosować dodatkowe sposoby tłumienia drgań za pomocą tłumików mechanicznych, wiskotycznych lub, w przypadku silników bardzo małych mocy, pneumatycznych, albo też aktywnego tłumienia elektronicznego.



Rys.16. Schematy tłumików drgań: a) ciernego, b) cierno-bezwładnościowego, c) hydraulicznego, d) hydrauliczno-bezwładnościowego.



Rys.17. Przebieg wykonania skoku dla silnika typu EDS-10: a) bez tłumika, b) z tłumikiem cierno-bezwładnościowym.

Na rys.16. przedstawiono schematycznie różne typy tłumików drgań. Tłumiki takie mogą przez rozproszenie nadmiaru energii wirnika bardzo skutecznie eliminować szkodliwe oscylacje wirnika. Na rys.17. przedstawiono oscylogramy pozycjonowania wałka silnika reluktancyjnego typu EDS-10 o skoku nominalnym  $5^\circ$  dla silnika bez tłumika (rys.17.a.) i z tłumikiem cierno-bezwładnościowym odpowiadającym schematowi z rys.16.b. Do wad tłumików należy zaliczyć znaczne obniżenie maksymalnych częstotliwości pracy silnika (o  $20\div 30\%$ ) oraz konieczność umieszczenia dodatkowych elementów na wałku silnika na co konstrukcja nie zawsze pozwala. Niektóre firmy oferują wykonania specjalne silników, których wirnik znajduje się w komorze hermetycznej wypełnionej olejem silikonowym. Efekty poprawy warunków tłumienia dla takiego silnika są bardzo podobne do przedstawionych na rys.17. W przypadku braku możliwości zastosowania tłumika i konieczności zminimalizowania drgań wirnika w ostatniej fazie pozycjonowania stosuje się tłumienie elektryczne. Polega ono na tym, że w chwili, gdy wirnik zbliża się do zadanego położenia jest hamowany polem magnetycznym wytworzonym przez dodatkowy, krótkotrwały impuls o kierunku przeciwnym w stosunku do impulsu sterującego. Odpowiedni dobór chwili, w której jest generowany impuls hamujący oraz czas jego trwania pozwala na zatrzymanie wirnika w zadanym położeniu praktycznie bez oscylacji. Tłumienie takie jest bardzo skuteczne jednakże znacznie komplikuje budowę elektronicznego układu sterującego i podnosi jego cenę. Poza tym do wad tego typu tłumienia należy zaliczyć dużą wrażliwość na dobór odstępu czasowego, w którym generowany jest wsteczny impuls oraz wrażliwość na zmiany obciążenia. Z tych względów powinno się opisaną metodę tłumienia stosować dopiero po sprawdzeniu czy inne opisane sposoby nie przynoszą dostatecznych efektów.

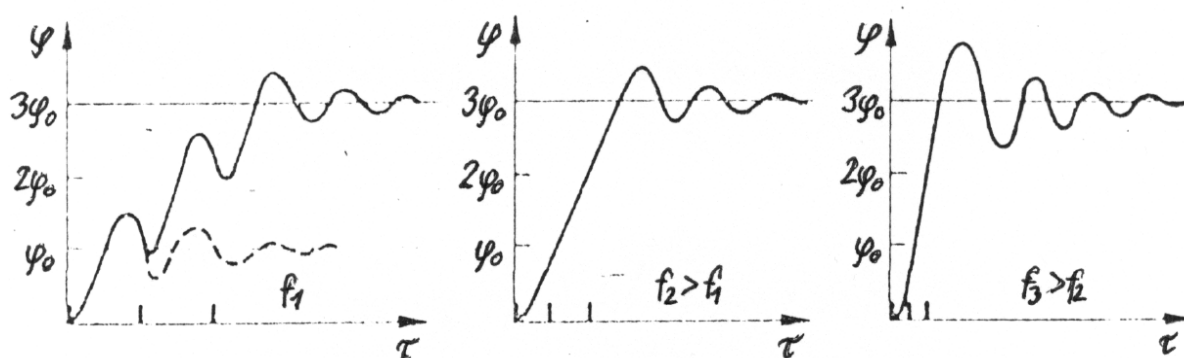
### **Praca silnika z małymi częstotliwościami.**

W porównaniu ze sposobami pracy, dla których na przesuw roboczy przypada jeden skok wirnika, wykonanie serii skoków ma wiele istotnych zalet. Zakładając, że w danym mechanizmie wałek napędowy musi się każdorazowo obrócić o  $15^\circ$  można dobrać silnik o skoku nominalnym  $15^\circ$  lub też np. silnik o skoku równym  $3^\circ$  i wtedy na przesuw roboczy przypadać będzie pięć skoków wirnika. W przypadku, gdy nie stosuje się elektronicznego tłumienia drgań czas pozycjonowania dla jednego skoku piętnastostopniowego jest, przy uwzględnieniu drgań, z reguły dłuższy od czasu pozycjonowania przy wykonaniu serii skoków trzystopniowych. Poza tym dokładność pozycjonowania jest dla drugiego przypadku na ogół większa.

Z tych względów korzystniejsze jest takie projektowanie napędu by silnik był sterowany serią impulsów i wykonywał serię skoków. Wyliczone poprzednio czynniki wpływające na dynamikę ruchu pojedynczego skoku mają analogiczny wpływ na pracę dynamiczną silnika w warunkach wykonywania serii skoków z częstotliwością pracy start-stopowej. W omawianym sposobie pracy występują dodatkowe czynniki, które można wykorzystać w celu poprawienia dynamiki wykonania serii skoków. Są nimi:

- częstotliwość impulsów sterujących,
- odstęp czasowy między ostatnimi dwoma impulsami w serii.

Częstotliwość impulsów w serii ma wpływ zarówno na przebieg ruchu w trakcie wykonywania skoku, jak i na ostatnią fazę pozycjonowania tzn. oscylacje wirnika wokół położenia równowagi. Na rys.18. przedstawiono teoretyczne przebiegi pozycjonowania dla różnych częstotliwości sterowania. Dla bardzo małych częstotliwości wirnik porusza się ruchem niejednostajnym – rys.18.a.



*Rys.18. Przebieg pozycjonowania wałka silnika dla różnych częstotliwości sterowania.*



Dla częstotliwości większych, jeżeli kolejne impulsy sterujące przełączają napięcie na fazach silnika w chwilach, gdy wirnik obraca się jeszcze w zadanym kierunku, ruch jego jest płynny a drgania w fazie pozycjonowania po wykonaniu ostatniego skoku nie są większe niż przy wykonaniu pojedynczego skoku – rys.18.b. Przy dalszym zwiększaniu częstotliwości wirnik silnika ma coraz większe opóźnienie ruchu obrotowego w stosunku do skokowo obracającego się pola magnetycznego stojana. W związku z tym jest on gwałtowniej przyspieszany, uzyskuje większą energię kinetyczną i mimo, że czas wykonania samego obrotu jest nieco skrócony to czas całkowity pozycjonowania wydłuża się ze względu na wzrastające drgania wirnika po dojściu do zadanego położenia – rys.18.c. Zmiana odstępów między ostatnimi impulsami może bardzo skutecznie zmniejszyć niekorzystne oscylacje po serii skoków. Istota poprawy charakterystyki dynamicznej polega na takim dobraniu odstępów między ostatnim a przedostatnim impulsem by ostatnie przełączenie napięcia na fazach silnika przypadło w chwili maksymalnego zbliżenia się wirnika do zadanego położenia na skutek wybiegu po impulsie przedostatnim. Energia, jaką wówczas uzyskuje wirnik przemieszczając się do zadanego położenia z pozycji maksymalnego wybiegu jest minimalna, a więc i proces jej wytrącania w postaci drgań trwa krótko. Zmiana odstępów między ostatnimi impulsami może przynosić bardzo dobre efekty jednak należy każdorazowo dokonać doboru wartości odstępów do obciążenia silnika.

Przedstawiony sposób postępowania jest prosty i łatwy w realizacji nie zmienia bowiem typowego dla danego silnika sposobu komutacji napięcia na fazach jak to ma miejsce np. w przypadku tłumienia drgań przeciwiimpulsem.

### ***Praca silnika z dużymi częstotliwościami.***

Pod pojęciem dużych częstotliwości pracy będą rozumiane w niniejszym punkcie maksymalne częstotliwości pracy synchronicznej silnika osiągane przy zastosowaniu różnych typów sterowania.

Praca synchroniczna z dużymi częstotliwościami stwarza problemy odmienne od tych, które występują przy poprzednio opisanych sposobach pracy silnika. W zakresie dużych częstotliwości impulsów sterujących silnik nie może ruszyć, bądź zatrzymać się bez utraty skoku. W związku z tym musi on być na początku ruchu rozpędzany począwszy od częstotliwości pracy start-stopowej a następnie, po osiągnięciu maksymalnej częstotliwości pracy synchronicznej i wykonaniu przesuwu roboczego napędzanego elementu, musi być hamowany i zatrzymany dopiero po obniżeniu częstotliwości do zakresu pracy start-stopowej. Idealnym przypadkiem rozpędzania i hamowania silnika ze względu

na płynność pracy i pewność nie zgubienia skoku jest wzrost i zmniejszenie częstotliwości według funkcji wykładniczej w postaci

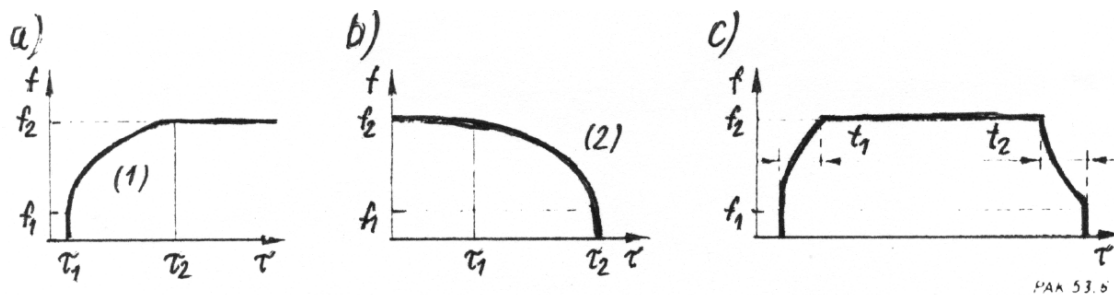
$$f|_{\tau_1}^{\infty} = f_1 + (f_2 - f_1)(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_2 - \tau_1}}) \quad (5)$$

dla rozpędzania silnika oraz

$$f|_{\tau_1}^{\tau_2} = f_2 - (f_2 - f_1)(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_2 - \tau_1}}) \quad (6)$$

dla przebiegu hamowania.

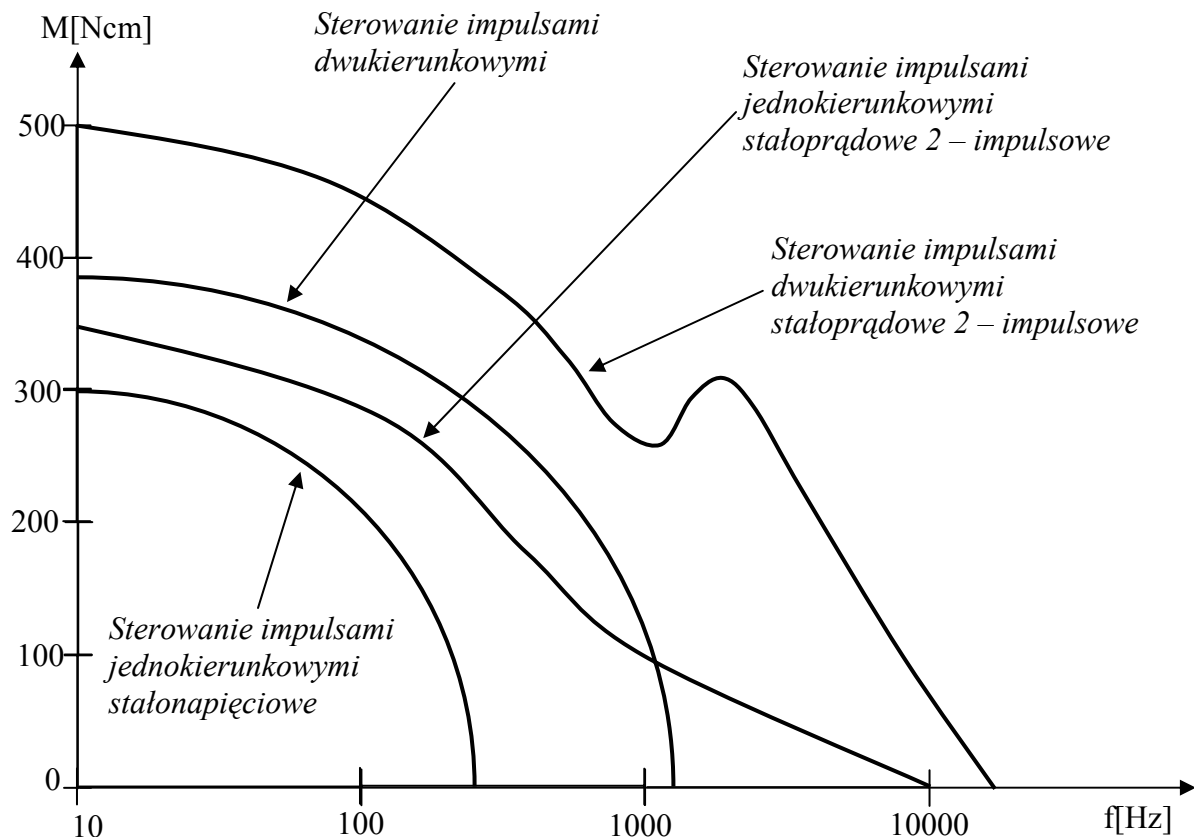
Oznaczenia podane są na rys.19.a i b, na rys.19.c przedstawiono przyjmowany w praktyce przebieg zmian częstotliwości, dla którego przyjmuje się, że czas hamowania  $\tau_2$  równa się czasowi rozpędzania  $\tau_1$ . Często w celu uproszczenia układu sterującego zastępuje się krzywą wykładniczą linią prostą, przyjmując jednostajną zmianę częstotliwości bądź też przy niewielkich obciążeniach silnika, skokowe kilkustopniowe przełączanie częstotliwości.



Rys.19. Teoretyczne przebiegi zmian częstotliwości impulsów sterujących: przy rozpędzaniu, b) przy hamowaniu, c) przebieg realizowany w praktyce, (1), (2) – oznaczenia funkcji podanych w tekście.

Następnym istotnym elementem, który należy brać pod uwagę programując pracę silnika z dużymi częstotliwościami, jest znaczne zmniejszenie momentu na wałku silnika w miarę wzrostu częstotliwości. Wynika to ze zmniejszenia, wraz ze wzrostem częstotliwości, wartości średniego prądu przepływającego przez uzwojenia fazy silnika. Ważnym parametrem pracy napędu są jego częstotliwości rezonansowe. Zarówno przy rozpędzaniu, jak i hamowaniu silnika, pracuje on okresowo w zakresie rezonansu elektromechanicznego. Może to być przyczyną zakłóceń w pracy w postaci silnych drgań mogących być przyczyną zgubienia skoku. Korzystnie w takim przypadku oddziałują tłumiki mechaniczne i hydrauliczne, jak również obciążenie silnika dużym momentem bezwładności.

Poniżej przedstawiono wykres porównawczy charakterystyk silnika skokowego dla różnych układów sterujących.



Rys.20. Wykres porównawczy charakterystyk silnika skokowego dla różnych układów sterujących.

### **Komutacja kombinowana.**

W większości zastosowań czas pozycjonowania silników skokowych determinuje szybkość pracy mechanizmu. Istotnym problemem jest skracanie czasu ruchu do zadanej pozycji. Można to uzyskać stosując silnik o większym momencie lub przez specjalne sterowanie pracą silnika. Poprawę właściwości dynamicznych można uzyskać przez zapewnienie odpowiedniej stromości przedniego i tylnego zbocza impulsu prądowego. Przez kształtowanie odpowiedniej serii impulsów sterujących można uzyskać wymaganą szybkość pozycjonowania.

Przykładem może być metoda hamowania przez ponowne włączenie poprzednio zasilanej fazy.

Metoda komutacji kombinowanej z zasilaniem zmiennej liczby uzwojeń w czasie ruchu wirnika silnika skokowego jest przydatna w mechanizmach, w których przesunięcia są małe, a ruch roboczy wykorzystuje się do jednego lub kilku skoków silnika. Zasadą tej

metody jest dostarczenie większej ilości energii w czasie rozruchu i ruchu, przez chwilowe wzbudzenie większej liczby uzwojeń niż przy typowej komutacji.

Pierwszą możliwością stosowaną w praktyce jest metoda polegająca na wzbudzeniu trzech faz w czasie ruchu i pozostawieniu tylko jednej wzbudzonej fazy, gdy układ pozostaje w spoczynku. Charakterystyczne dla tej metody jest to, że położenia równowagi stabilnej wirnika przy wzbudzanych w czasie ruchu trzech fazach i jednej po przełączeniu – pokrywają się.

Drugą możliwością komutacji kombinowanej jest sytuacja, gdy położenie równowagi stabilnej wirnika przy wzbudzonej większej liczbie faz leży przed położeniem równowagi stabilnej po przełączeniu zasilania. Czas zasilania większej liczby uzwojeń jest ograniczony poprawnością działania układu i nie może być dłuższy od czasu dojścia wirnika do wybranego położenia. Forsowanie narastania prądu w uzwojeniach powoduje zwykle znaczny wzrost czasu drgań po wykonaniu ruchu. Można temu przeciwdziałać stosując komutację kombinowaną. Położenie równowagi stabilnej dla wzbudzonych dwóch kolejnych faz leży pomiędzy położeniem równowagi stabilnej dla każdej z tych faz zasilanych pojedynczo, można więc, zasilając początkowo dwie fazy, uzyskać dojście wirnika do położenia równowagi stabilnej dla wzbudzonych dwóch faz. Układ będzie się nadal poruszał dzięki zgromadzonej energii kinetycznej. Gdy prędkość wirnika zmaleje do zera, znajdzie się on w pobliżu wybranego położenia równowagi stabilnej. Przełączając wtedy zasilanie na jedną fazę można uzyskać aperiodyczne dojście wirnika do zadanego położenia. Taki sposób komutacji jest zbliżony do metody hamowania poprzednio zasilaną fazą. Jego zaletą jest mniejsza liczba przełączeń zasilania.

Trzecią możliwością komutacji kombinowanej ze wzbudzeniem większej liczby faz jest przypadek, gdy położenie równowagi stabilnej przy wzbudzonej większej liczbie faz leży za wybranym położeniem. Stosowanie tego typu komutacji jest celowe przy dużych obciążeniach silnika, gdy zdecydowany wpływ na czas pozycjonowania ma czas ruchu do położenia równowagi. W praktycznych rozwiązaniach konstrukcyjnych dużemu obciążeniu towarzyszy zwykle znaczne tarcie suche i powstające drgania są szybko tłumione. Wzrost chwilowej wartości momentu można uzyskać stosując forsowanie narastania prądu w uzwojeniach lub zasilanie trzech kolejnych faz silnika z przełączeniem na jedną przy pokrywających się położeniach równowagi stabilnej. Można także wykorzystać dla szybszego pozycjonowania kształtowanie charakterystyki chwilowego momentu silnika przez zastosowanie wzbudzenia dwóch następnych faz silnika z przyłączeniem na pierwszą z nich.