

## LABORATORIUM NAPĘDY ROBOTÓW I MANIPULATORÓW

Temat ćwiczenia: Silniki krokowe - układy zasilające - pomiar charakterystyki dokładnościowej silnika krokowego.

### ***I.CEL ĆWICZENIA***

Celem ćwiczenia jest analiza konstrukcji różnych silników krokowych oraz ich układów zasilania.

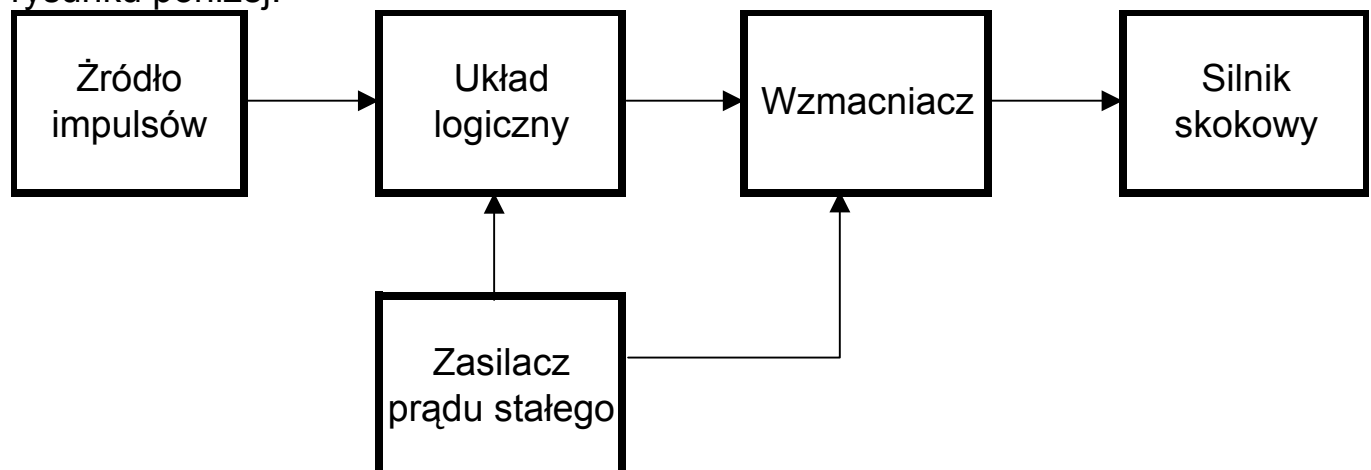
W ramach laboratorium zostanie wykonany pomiar charakterystyki  $\square_{wy}(n)$  na, podstawie której wyznaczone zostaną parametry dokładnościowe silnika.

### ***II.WSTĘP TEORETYCZNY***

#### ***1.Wiadomości ogólne***

Według PN-87/E-01006 silnik krokowy ( zwany też silnikiem skokowym ) jest to silnik przekształcający ciąg sterujących impulsów elektrycznych na ciąg przesunięć kątowych lub liniowych. Silnik przetwarza sygnał ( impuls ) sterujący na ustalone położenie wału bezpośrednio, bez konieczności stosowania jakichkolwiek sprzężeń zwrotnych.

Schemat blokowy typowego układu silnika skokowego przedstawiono na rysunku poniżej.



- Głównymi elementami układu sterowania silnika skokowego są:
- źródło impulsów, którym może być generator impulsów, maszyna cyfrowa, mikroprocesor, przetwornik sygnału ciągłego na impulsowy lub pamięć operacyjna;
  - układ logiczny zawiera układ formowania impulsów na prostokątne ( istnieją również nowoczesne rozwiązania z wykorzystaniem impulsów sinusoidalnych ) oraz układ rozdzielania impulsów na poszczególne pasma uzwojenia silnika ( licznik). Oczywiście gdy ma być zapewniony nawrót silnika, konieczne jest jeszcze odpowiednie rozbudowanie układu;
  - wzmacniacz jest stopniem wyjściowym mocy, który jest wykonany na tranzystorach o układzie analogicznym dla każdego pasma uzwojenia;
  - zasilacz prądu stałego.

Układ silnika skokowego jaki pokazano powyżej jest układem znacznie prostszym aniżeli układ nadążny, który wykonywałby to samo zadanie. Ma on znacznie mniej elementów niż układ nadążny, jest więc przeważnie tańszy.

Rozróżniamy silniki skokowe o wirniku czynnym ( najczęściej o magnesach trwałych ) lub biernym ( reluktancyjnym ), a także silniki hybrydowe. Silnik o wirniku czynnym ma na wirniku uzwojenie wzbudzenia zasilane prądem stałym ( bardzo rzadko, dzisiaj prawie, że już nie stosowane ) lub bieguny magnetyczne z twardej magnetycznie stali ( magnesy trwałe ). Wirnik bierny, wykonany z blachy elektrolitycznej, jest uzębiony lecz nie ma żadnego uzwojenia ( wirnik reluktancyjny ). Hybrydowy silnik skokowy ma wirnik reluktancyjny, a ponadto magnes trwały, wzmacniający przepływ wywołany impulsem sterującym dla pożądanego ustawienia zębów.

Wartość skoku silnika krokowego jest to przesunięcie kątowe lub liniowe wirnika ( lub biegnika ) silnika pod wpływem działania pojedynczego impulsu sterującego. Według normy branżowej BN-81/3016-10 znamionowym skokiem silnika nazywa się wartość kąta pojedynczego skoku silnika przy znamionowym cyklu komutacji.

*a) wartość skoku silnika skokowego o wirniku czynnym*

$$\alpha = \frac{360^{\circ}}{2 \cdot pm} = \frac{\pi}{pm} \quad (w-1)$$

gdzie:

p – liczba par biegunów silnika;

m – liczba pasm uzwojenia sterującego.

*b) wartość skoku silnika skokowego o wirniku biernym*

$$\alpha = \frac{360^{\circ}}{Z_r \cdot mn} = \frac{2\pi}{Z_r \cdot mn} \quad (w-2)$$

gdzie:

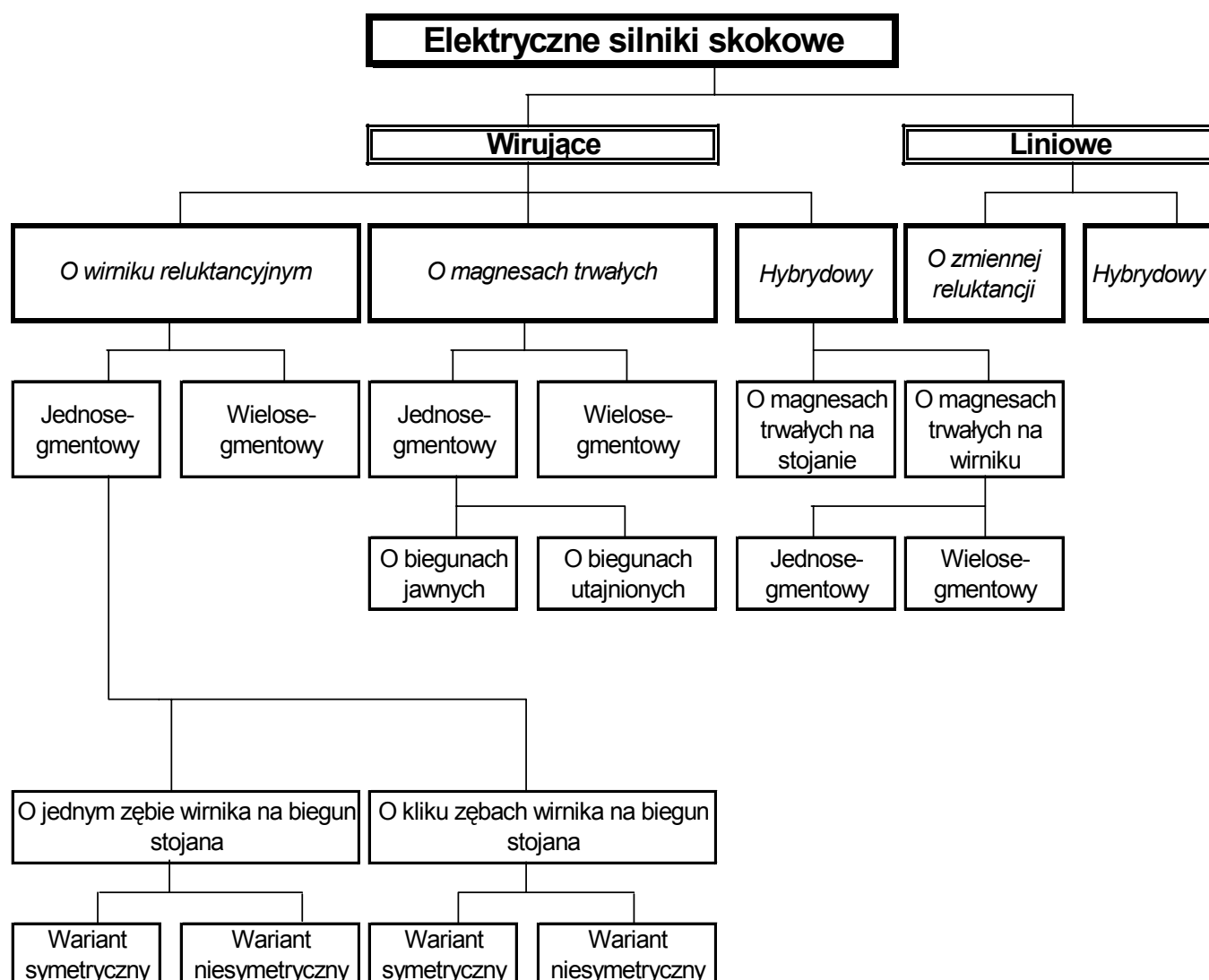
$Z_r$  – liczba zębów wirnika;

n – współczynnik równy jedności przy indywidualnym włączeniu pasm

( komutacja symetryczna ), natomiast równy 2 przy indywidualno-jednoczesnym włączeniu uzwojeń ( komutacja niesymetryczna ). Tak samo oblicza wartość skoku silnika hybrydowego.

## 2. Klasyfikacja silników krokowych.

Poniżej przedstawiono ogólny podział silników krokowych, natomiast w niniejszym opracowaniu bliżej omówimy jedynie silniki z pierwszego poziomu podziału.



### 2.1. Silnik skokowy o wirniku reluktancyjnym ( biernym ).

Silnik skokowy o wirniku reluktancyjnym ( czasem określanym jako wirnik bierny ) jest jednym z najprostszych rozwiązań silnika skokowego.

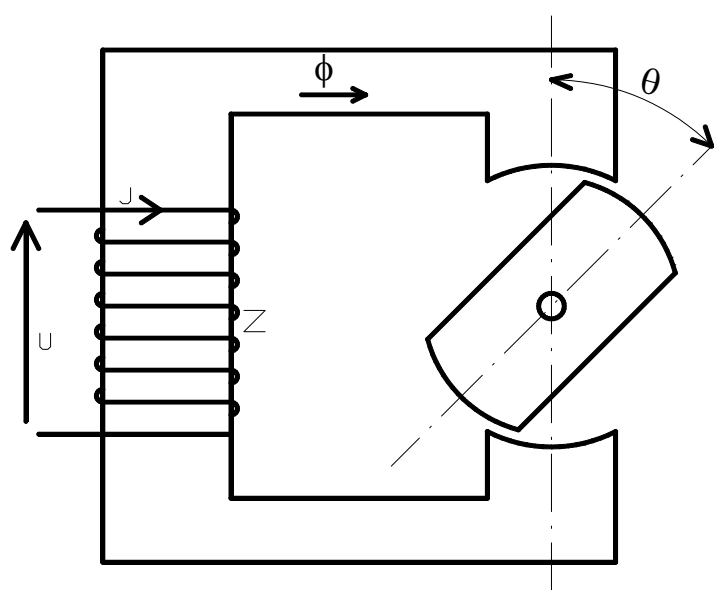
Zasada działania:

Działanie silnika skokowego o wirniku reluktancyjnym opiera się na wykorzystaniu momentu reluktancyjnego, którego powstawanie wyjaśnia poglądowo rysunek znajdujący się na następnej stronie.

Strumień w obwodzie magnetycznym

$$\phi = \frac{Iz}{R_m}$$

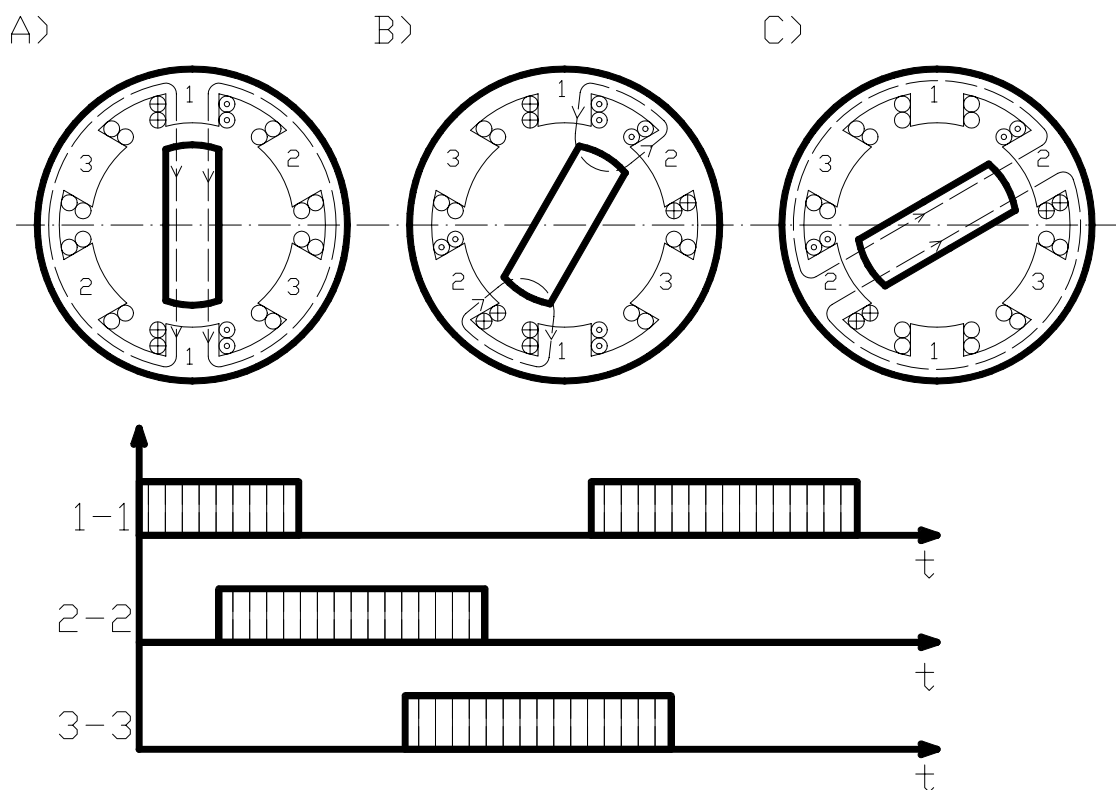
jest funkcją przepływu (  $Iz$  ) oraz reluktancji ( oporu magnetycznego )  $R_m$ .



**Rys.1**

Reluktancja jest najmniejsza przy kącie  $\theta = 0^\circ$ . Linie pola magnetycznego wykazują dążenie do zamknięcia się w obwodzie o najmniejszej reluktancji. W ten sposób powstaje moment obrotowy, zwany reluktancyjnym, który dąży do ustawienia wirnika w położeniu równym  $\theta = 0^\circ$ .

Na tej zasadzie działa silnik skokowy o wirniku reluktancyjnym (rys.2 – poniżej), który ma uzębiony wirnik z miękkiej magnetycznie stali oraz stojan z trzema pasmami uzwojenia, zasilanymi impulsami z układu elektronicznego zgodnie z cyklogramem impulsów widocznym na rysunku 2d.



**Rys.2**

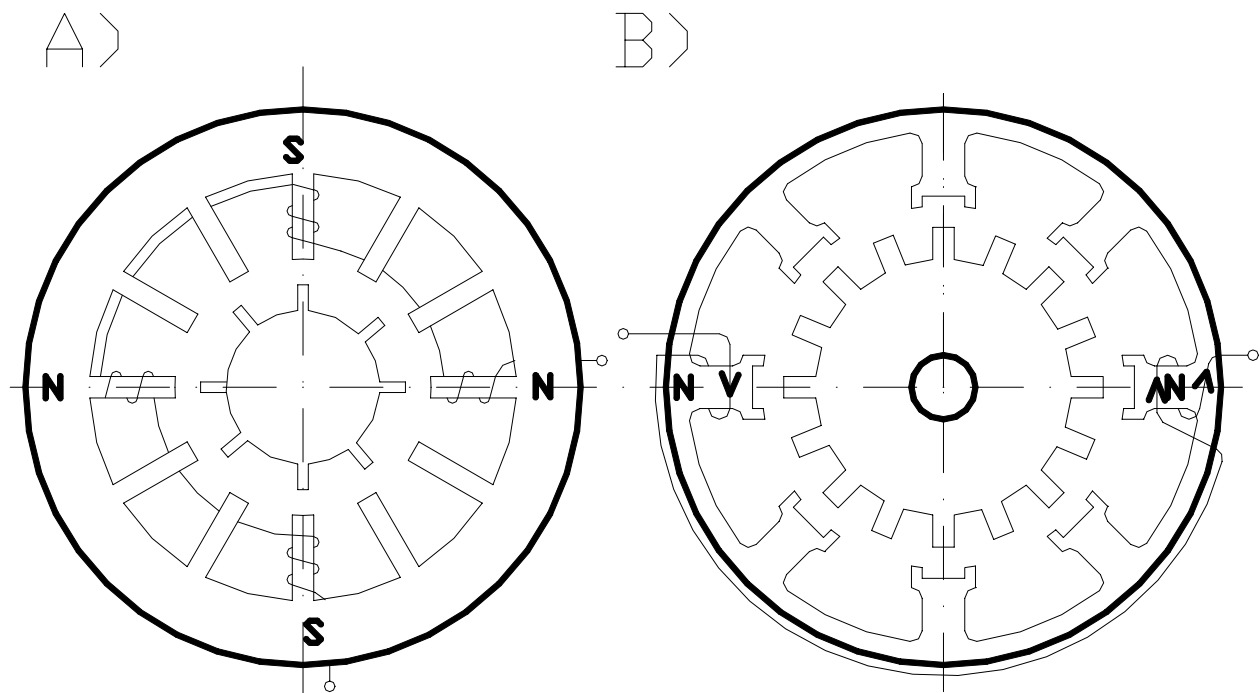
Na rysunku 2a,b,c pokazano trzy takty pracy tego silnika. Kiedy prąd pojawi się w paśmie 1-1, wirnik zajmie położenie pokazane na rys.2a. Gdy w następnej chwili prąd wystąpi jednocześnie w pasmach 1-1 i 2-2, wówczas wirnik zajmie położenie b), odpowiadające największej permeancji dla strumienia wytworzonego przez przepływy obu uzwojeń. Następnie w paśmie 1-1 nie ma już prądu i wirnik znajduje się w położeniu pokazanym na rys.2c. Komutacja silnika przebieg w następującej kolejności :

. 1 → 1-2 → 2 → 2-3 → 3 → 3-1 ...

Jest to komutacja niesymetryczna, sześciotaktowa. Wartość skoku silnika wynosi:

$$\alpha_b = \frac{360^\circ}{Z_{r,mn}} = \frac{360^\circ}{2 \bullet 3 \bullet 2} = 30^\circ$$

Znane są dwa rodzaje reluktancyjnych silników skokowych: o jednym zębie wirnika na „biegun” stojana ( rys. 3.a.) i o kilku zębach wirnika na „biegun” stojana ( rys. 3.b.). Na rysunku 3 pokazano szkice ogólnie stosowanych wielopasmowych silników skokowych ( na rys.3.a. – trójpasmowego a na rys.3.b. – czteropasmowego) ; aby nie zaciemniać rysunku pokazano tylko po jednym paśmie uzwojenia.



**Rys. 3**

W przypadku przedstawionym na rys.3.a. podziałki zębowe stojana i wirnika są różne, a w konstrukcji pokazanej na rys.3.b. są sobie równe. Kiedy impuls jest doprowadzany do pasma 1-1, wirnik ustawia się w położeniu najmniejszej reluktancji ( $\alpha_r = 0$  – rys.3.b.). Zęby wirnika naprzeciwko sąsiednich biegunów stojana są przesunięte względem siebie o  $\frac{1}{4}$  podziałki zębowej. Kiedy impuls zostanie doprowadzony do pasma 2, wirnik wykona jeden skok, itd.

Wartość skoku silnika skokowego o wirniku reluktancyjnym przy komutacji symetrycznej określa się na podstawie wzoru (w- 2 ):

$$\alpha_r = \frac{360^\circ}{Z_r m}$$

gdzie:

$Z_r$  – liczba zębów wirnika;

$m$  – liczba pasm uzwojenia stojana.

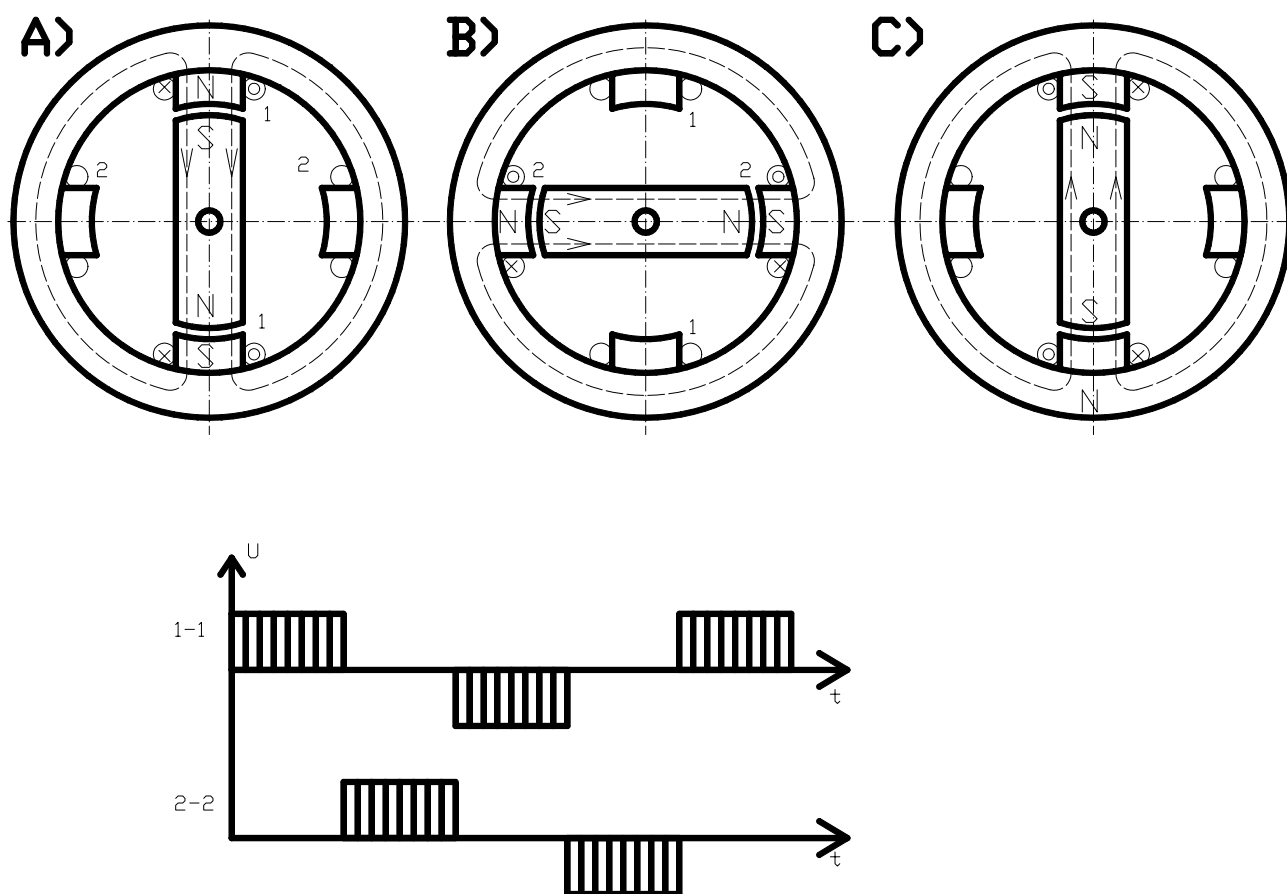
W konstrukcji pokazanej na rysunku 3.b. uzwojenie dwu przeciwległych biegunów stojana tworzy pasmo; układ taki nazywany jest symetrycznym. Możliwe też jest rozwiązanie niesymetryczne – wtedy całe uzwojenie jednego

pasma jest umieszczone na jednym biegunie. W rozwiązaniu niesymetrycznym nadmiernie zużywają się łożyska, a praca jest hałaśliwa.

Rozpatrzone silniki skokowe są silnikami reluktancyjnymi jednosegmentowymi. Zdecydowanie lepsze właściwości ma silnik skokowy wielosegmentowy. Zastosowanie silników wielosegmentowych pozwala na uzyskanie, przy kolejnym zasilaniu impulsami uzwojeń dwu- lub większej ( w zależności od rodzaju silnika ) ilości segmentów, dużej liczby skoków o małym kącie. Silniki te pracują przy małych wartościach kąta wynoszących od  $0,45-15^{\circ}$  ale za to przy bardzo dużych częstotliwościach, dochodzących do 20 000 skoków/s a nawet więcej.

## 2.2. Silnik skokowy o magnesach trwałych ( czynny ).

Silnik skokowy o wirniku czynnym jest to silnik skokowy o wirniku wytwarzającym strumień magnetyczny i o stojanie z uzwojeniem sterującym. Na rysunku poniżej przedstawiono schemat działania silnika skokowego o wirniku czynnym.



**Rys.4**

Wirnik silnika stanowią magnesy trwałe ( możliwe też jest bardzo rzadko stosowane wzbudzenie elektromagnetyczne ). Na stojanie znajdują się bieguny wydátne, na których umieszczone są pasma uzwojenia 1-1 i 2-2. Do pasm 1-1 i 2-2 uzwojenia sterującego podawane są impulsy zgodnie z przebiegami pokazanymi na rys.4.d. pod wpływem wytworzonego momentu synchronizującego po każdym impulsie wirnik obraca się o kąt skoku. Wytworzenie momentu synchronizującego odbywa się na podobnej zasadzie jak w zwyczajnym silniku synchronicznym. Tak więc kolejność przełączania ( komutacji ) pasm 1-1 i 2-2 uzwojenia sterującego przedstawia wykres przebiegu napięć pasmowych w funkcji czasu. Każdemu impulsowi odpowiada określone położenie wirnika silnika: położenie a) na rys.4. odpowiada pierwszemu impulsowi, położenie b) – drugiemu, c) – trzeciemu impulsowi napięciowemu.

Często też bywa stosowany tabelaryczny sposób zapisu przebiegu impulsów w pasmach uzwojenia silnika skokowego, co zostało przedstawione w tabeli na następnej stronie.

Numer pasma uzwojenia	Numer impulsu				
	1	2	3	4	5
1	+	0	-	0	+
2	0	+	0	-	0

Możliwy też jest skrócony zapis schematu komutacji silnika krokowego. W rozpatrywanym przez nas przypadku będzie to zapis:

$$(+1) \rightarrow (+2) \rightarrow (-1) \rightarrow (-2) \rightarrow (+1)$$

Ponieważ na stojanie rozpatrywanego silnika skokowego znajdują się dwa pasma uzwojenia sterującego, a wirnik ma dwa bieguny, więc wartość skoku tego silnika obliczamy korzystając ze wzoru ( w-1 ):

$$\alpha_c = \frac{\pi}{pm} = \frac{\pi}{1 \bullet 2} = 90^0$$

Pod działaniem momentu synchronizującego po każdym impulsie wirnik obraca się o kąt  $90^0$ . Rozpatrywany silnik ma komutację czterotaktową: czterem taktom odpowiada pełny cykl komutacji ( do przywrócenia pierwotnego położenia ). Po wprowadzeniu pojęcia „liczba taktów”, wzór na wartość skoku można przedstawić w postaci:

$$\alpha_c = \frac{360^0}{2pm} = \frac{8 \cdot 360^0}{kp}$$

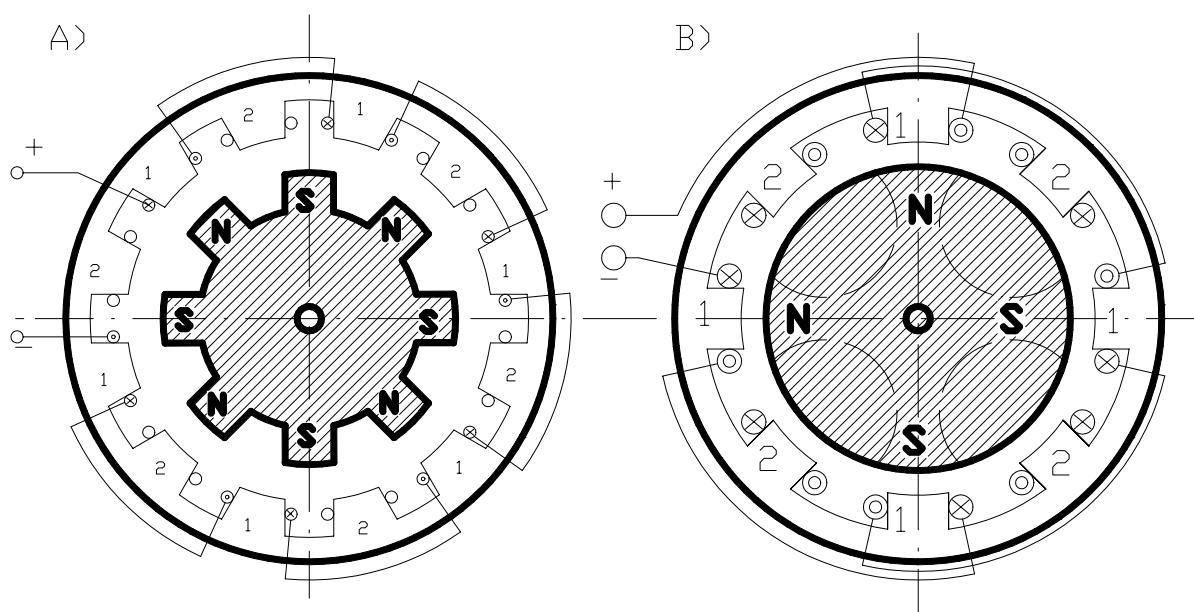


gdzie  $k=2m$  jest liczbą taktów w jednym cyklu.

Tak samo jak w silnikach biernych możemy mieć do czynienia z silnikami skokowymi jedno- lub wielosegmentowymi; magnesy trwałe są umieszczone na wirniku, przy czym mogą występować *bieguny jawne* (rys.5.a. na następnej stronie) lub *utajone* (rys.5.b.). Silnik skokowy o magnesach trwałych ma na stojanie kilkupasmore uzwojenie sterujące, zasilane impulsami z układu elektronicznego. Pokazane na rysunku 5 silniki skokowe mają po dwa pasma uzwojenia sterującego, przy czym na każdym rysunku pokazano połączenia tylko jednego z nich.

Wykonany z twardej magnetycznie stali i namagnesowany wirnik wytwarza strumień magnetyczny, współdziałający ze strumieniem stojana, w wyniku czego wirnik ustawia się w osi pola stojana, którego rozkład zależy od przebiegu impulsów sterujących pasm uzwojenia. Ze względu na sposób magnesowania rozróżnia się dwa rodzaje silników skokowych o magnesach trwałych:

- z magnesem trwałym namagnesowanym promieniowo (częściej stosowane);
- z magnesem trwałym namagnesowanym poosiowo.

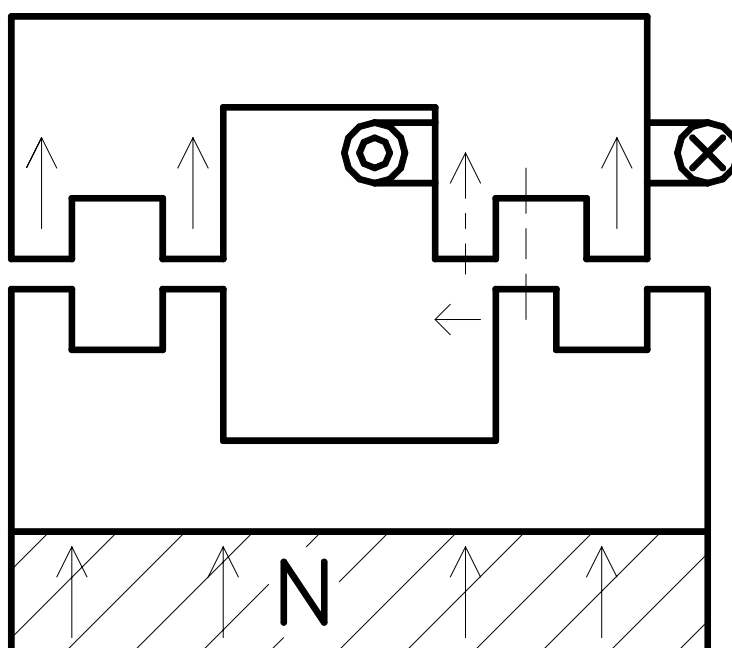


**Rys.5**

### 2.3 Hybrydowe silniki skokowe.

#### Zasada działania:

Sposób działania hybrydowego silnika skokowego zostanie zilustrowany na poniższym rysunku.

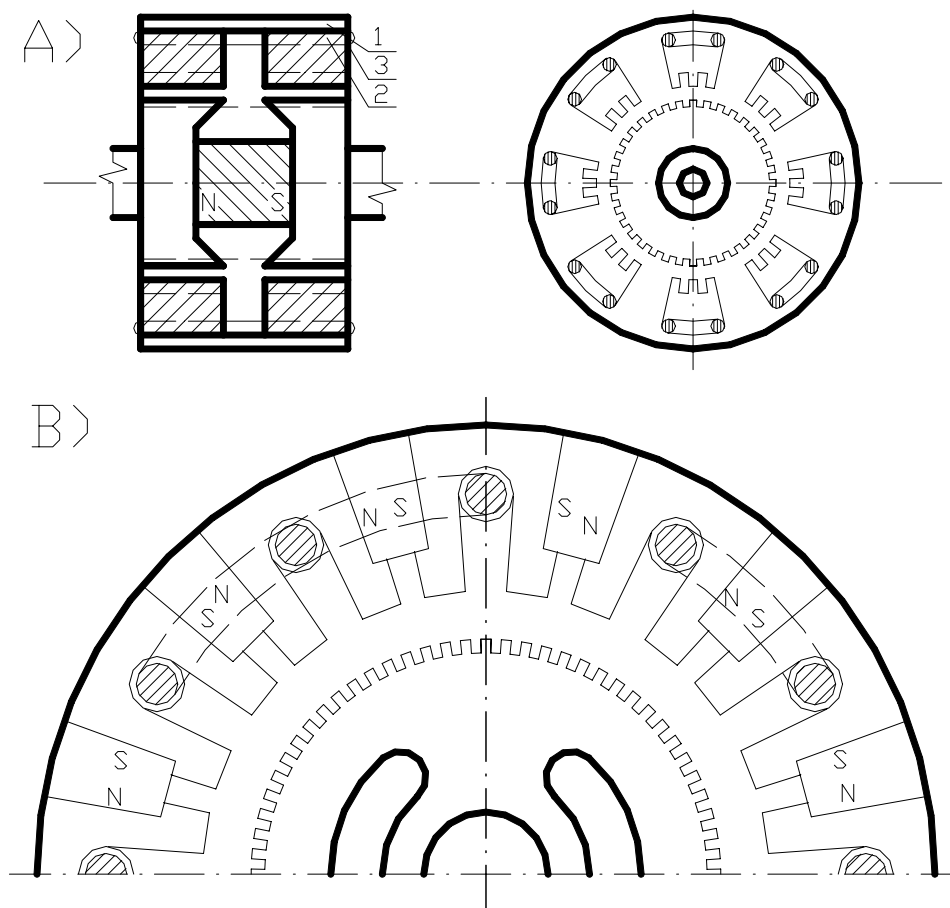


**Rys. 6**

Magnes trwały umieszczony na wirniku lub stojanie wytwarza jednokierunkowy strumień magnetyczny, który zamyka się w obwodzie magnetycznym: stojan – szczelina powietrzna – wirnik. Po zasileniu uzwojenia stojana impulsem sterującym, wzbudzony strumień magnetyczny pod jednym biegunem stojana dodaje się do strumienia magnesów trwałych, pod drugim zaś – odejmuje się. Wirnik zostaje wprowadzony w ruch tak, by osie zębów stojana i wirnika bieguna o strumieniu wzmacniającym pole magnetyczne pokryły się. Silnik wykonał jeden skok. Biegunki stojana są wzbudzane w pożądanej kolejności, by na tej samej zasadzie zrealizować kolejne przemieszczenia skokowe.

Z klasyfikacji silników jaka została przedstawiona poprzednio wynika, że silniki hybrydowe dzielą się na dwa zasadnicze typy:

- o magnesach trwałych na wirniku ( rys.7.a );
  - o magnesach trwałych na stojanie ( rys.7.b ).
- Obydwa schematy zostały przedstawione poniżej.



**Rys. 7**

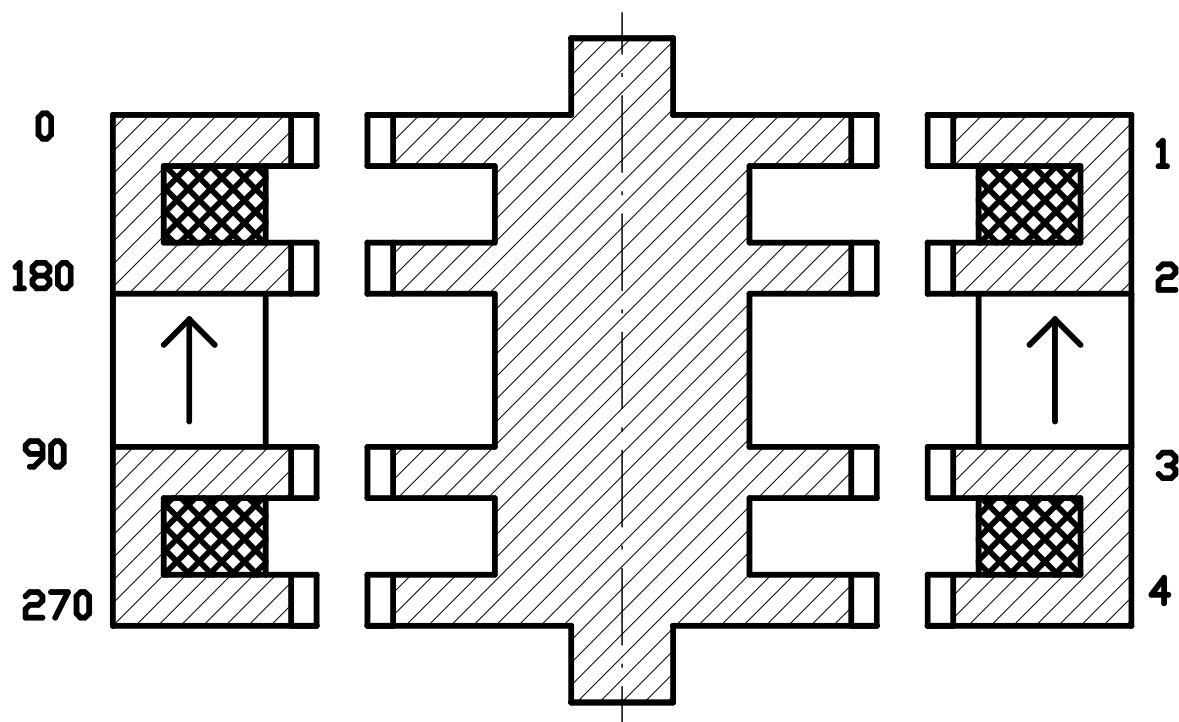
Struktura strefy czynnej silnika hybrydowego o magnesach trwałych na wirniku, pokazanego na rysunku 7.a jest następująca: blachowany stojan ma 8 biegunów, na których umieszczono 4 pasma uzwojenia. W nabiegunnikach znajdują się małe żłobki, o podziałce równej podziałce żłobkowej wirnika.

W najprostszym przypadku wirnik składa się z dwu żłobkowanych pakietów, pomiędzy którymi znajduje się namagnesowany poosiowo magnes trwały. Oba pakiety wirnika są przesunięte względem siebie o  $\frac{1}{2}$  podziałki żłobkowej. Zasada działania maszyny jednakobiegunowej polega na tym, że gdy wszystkie zęby jednego pakietu mają biegunowość N, wówczas zęby drugiego pakietu mają biegunowość S.

W celu zwiększenia mocy i momentu obrotowego silnika można stosować kilka ( 2 lub 3 ) pakietów wirnika, mocowanych na wspólnym wale.

Silnik hybrydowy o magnesach trwałych namagnesowany osiowo jest przy małych kątach skoku ( $\alpha_h \leq 2^\circ$ ) uważany jest za bardziej korzystny od silnika namagnesowanego promieniowo lub silnika bez magnesów trwałych.

W przypadku silnika hybrydowego o magnesach trwałych umieszczonych na stojanie (rys. 7.b) jest możliwe uzyskanie mniejszej objętości właściwej na jednostkę momentu w porównaniu z silnikiem hybrydowym o magnesach trwałych na wirniku. Szczególnie sprzyja temu oryginalna konstrukcja hybrydowego silnika skokowego z magnesem trwałym na stojanie wykonanym w postaci pierścienia. Przekrój podłużny tego silnika przedstawiono na rysunku 8.



**Rys.8**

Silnik składa się z dwuczęściowego stojana z uzwojeniem w postaci dwu toroidalnych cewek. Pomiędzy obiema częściami znajduje się pierścieniowy magnes trwały wykonany z ferrytu. Wirnik ma cztery pakiety o zębach znajdujących się naprzeciwko zębów stojana. Liczby zębów wirnika i stojana są sobie równe, przy czym zęby czterech pakietów wirnika pokrywają się ze sobą, natomiast zęby stojana w dwóch pakietach są przesunięte względem siebie o  $\frac{1}{4}$  podziałki zębowej.

Wartość skoku tego silnika określa się według wzoru:

$$\alpha_h = \frac{360^\circ}{4Z_r}$$

gdzie  $Z_r$  jest liczbą zębów jednego pakietu wirnika.

Moment obrotowy silnika hybrydowego składa się z trzech składowych: momentu synchronicznego wzbudzeniowego, będącego wynikiem współdziałania przepływu magnesów trwałych i wzbudzonego uzwojenia; momentu synchronicznego reluktancyjnego, który występuje kiedy silnik jest wzbudzony, również przy rozmagnesowanym magnecie trwałym; momentu ustalającego położenie wirnika, który występuje w nie zasilanym silniku wskutek niesymetrii magnetycznej obwodu i strumienia magnesów. W znanych rozwiązaniach konstrukcyjnych moment wzbudzeniowy jest znacznie większy od pozostałych składowych.

Moment hybrydowy jednopasmowego silnika skokowego można określić ze wzoru:

$$M_h = k \theta_w \theta_m \frac{dA}{d\alpha}$$

gdzie:

- $k$  – bezwymiarowa stała konstrukcyjna;
- $\Phi_w$  – przepływ wzbudzenia uzwojenia;
- $\Phi_m$  – przepływ magnesu trwałego;
- $A$  – permeancja rdzenia dla jednej podziałki zębowej;
- $\alpha$  – kąt położenia wirnika.

Silnik hybrydowy z pierścieniowym magnesem trwałym i uzwojeniem toroidalnym na stojanie ma wiele zalet w porównaniu z silnikiem o magnecie namagnesowanym poosiowo na wirniku:

- korzystniejszy stosunek momentu obrotowego do objętości;
- zastosowanie tańszych magnesów trwałych;
- możliwość uzyskania dużej ilości skoków na obrót.

Cechy charakterystyczne hybrydowego silnika skokowego to mała wartość kąta skoku oraz duża częstotliwość i duży moment obrotowy. Są to wartości skoku mieszczące się w granicach  $0,36 - 9^\circ$ . Przy pracy miniskokowej można zmniejszyć wartość skoku do  $0,014^\circ$  lub nawet do  $0,0072^\circ$ , co zapewnia uzyskanie 50 000 mini skoków na 1 obrót wału.

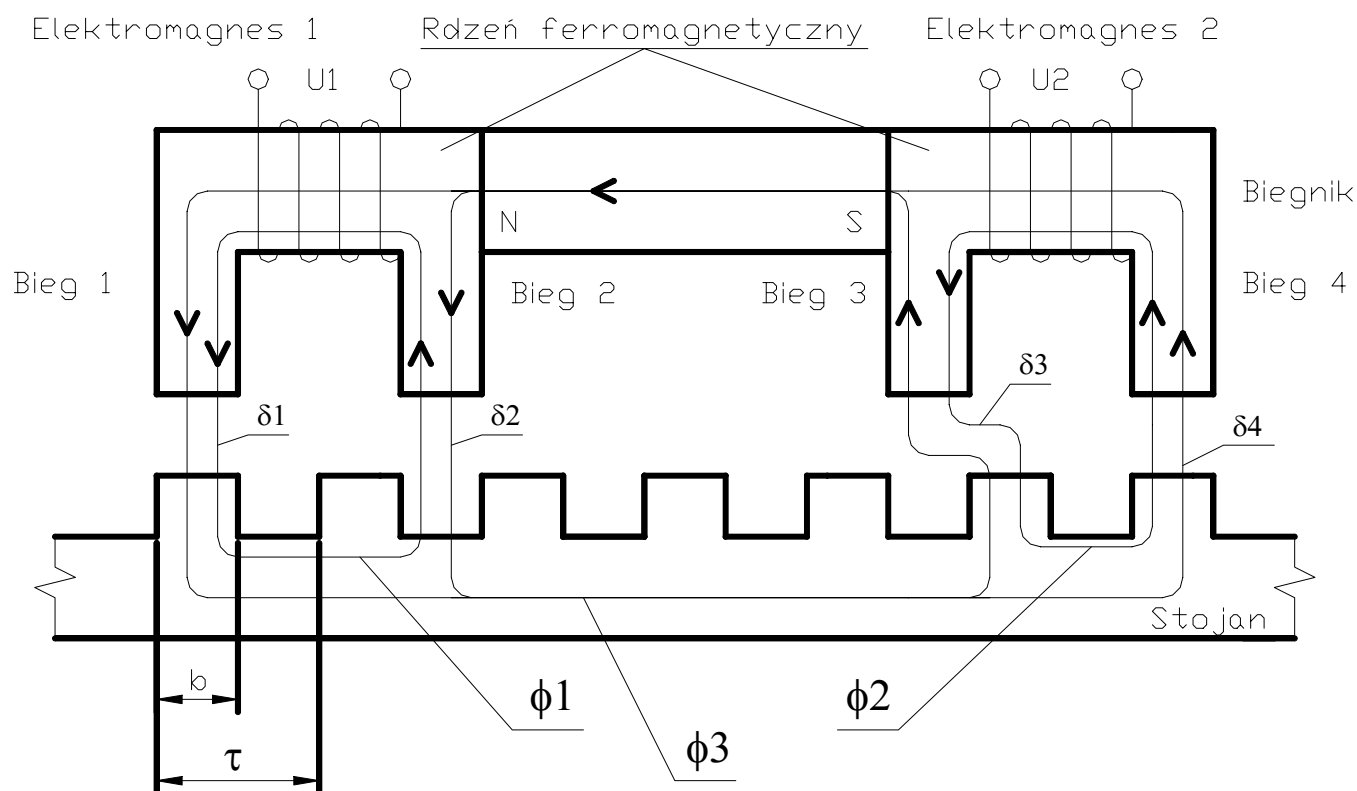
Wadą hybrydowego silnika skokowego jest duża bezwładność wirnika. W silniku tym występują duże siły osiowe, działające na łożyska.

## 2.4. Liniowe silniki skokowe.

Najczęściej są stosowane liniowe silniki skokowe reluktancyjne i hybrydowe, rzadziej zaś elektrodynamiczne. Zostanie tutaj bliżej omówiony hybrydowy liniowy silnik skokowy, którego schemat przedstawiono na rysunku 9.

Hybrydowy silnik skokowy ( z podmagnesowaniem ) składa się z części ruchomej ( biegnika ) i części nieruchomej ( stojana ). Część nieruchomą

stanowi ferromagnetyczna uzębiona płyta. W rozpatrywanej konstrukcji zastosowano zęby stojana o szerokości równej szerokości żłobków i mieszczącej się w granicach od ok. 1/3 mm do 1,5 mm. Głębokość żłobka, ze względu na właściwości obwodu magnetycznego, przyjmuje się od ok. 0,8 mm do 1,5 mm szerokości żłobka.



**Rys.9**

Część ruchoma składa się z dwu rdzeni ferromagnetycznych, pomiędzy którymi znajduje się magnes trwały ( Maniperm lub SmCo ). Na każdym rdzeniu znajduje się uzwojenie. Rdzenie mają zęby, które znajdują się w takiej odległości od siebie, by odpowiadały podziałce zębowej stojana. Żłobki obu nabiegowników i jednego rdzenia ferromagnetycznego mają względem siebie przesunięcie o szerokości żłobka  $b_z = \tau/2$ ; gdzie  $\tau$  jest podziałką zębową.

Silnik wytwarza siłę wskutek przemiany energii pola magnetycznego w szczelinie powietrznej wzdłuż wykonanego skoku. Energia pola magnetycznego jest funkcją drogi. Siła wynosi:

$$F = -\frac{dW_m}{dx_m} = -\phi^2 \frac{dR_m}{dx_m}$$

Gdzie  $dR_m/dx_m$  jest zmianą reluktancji ( oporu magnetycznego ) wzdłuż drogi.

Zakładając bipolarne sterowanie obu cewek biegnika rozpatrzmy pracę skokową silnika liniowego, posługując się rysunkiem 9. Magnes trwały wytwarza strumień magnetyczny  $\phi_0$  . Jeżeli elektromagnes 1 będzie zasilany takim

prądem, że wytworzony przezeń strumień składowy wyniesie  $\Phi_1 = \Phi_0/2$ , to wypadkowy strumień magnetyczny w szczelinie powietrznej pod biegunem 1 wyniesie  $\Phi_0$ , a pod biegunem 2 będzie równy zero. Biegnik pozostanie w tym położeniu nieruchomy, gdyż energia magnetyczna jest w tym położeniu minimalna.

Pragnąc wykonać jeden skok o  $\Delta x_m = b_z/2$  w lewo, należy elektromagnes 1 wyłączyć, natomiast zasilić prądem elektromagnes 2. Wówczas strumień wypadkowy w biegunie 3 będzie równy zero, a w biegunie 4 wyniesie  $\Phi_0$  i aby mógł się zamknąć na drodze o najmniejszej reluktancji musi się biegnik przesunąć o  $b_z/2 = \tilde{\Phi}$ , tak by biegun 4 ustawił się naprzeciwko zęba części nieruchomej. Jeżeli prąd w uzwojeniu elektromagnesu 2 będzie miał zwrot przeciwny, to biegnik przemieści się o jeden skok  $\Delta x_m = b_z/2 = \Phi/4$  w prawo.

### III. Teoria silnika skokowego.

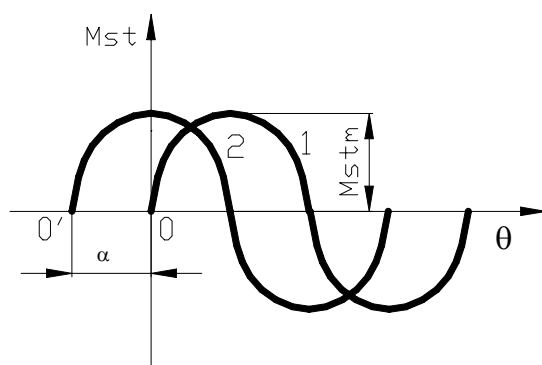
#### 3.1. Stany pracy silnika skokowego.

Istotne znaczenie mają następujące stany pracy silnika skokowego:

- statyczny;
- quasistatyczny;
- ustalony;
- dynamiczny (przejściowy).

W stanie statycznym, w uzwojeniach silnika skokowego występuje prąd stały, wytwarzając nieruchome pole magnetyczne. Na wirnik działa moment synchronizujący, który dąży do przywrócenia początkowego położenia równowagi, naruszonego po zadziałaniu momentu z zewnątrz.

Zależność statycznego momentu synchronizującego  $M_{st}$  w funkcji kąta  $\theta$  pomiędzy osią biegunów wirnika i pola stojana można przyjąć z wystarczającą dokładnością jako sinusoidalną, co przedstawiono na rysunku 10.



**Rys.10**

Stan quasistatyczny występuje przy odpracowaniu pojedynczych skoków (np. w urządzeniach przesuwu taśmy, start – stopowych itp. ). W stanie quasistatycznym wirnik przed wykonaniem każdego skoku powinien osiągnąć położenie nieruchome. Silnik przechodzi z jednego położenia ustalonego w drugie (  $0 - 0'$  na rys.10 ).

Granica częstotliwości stanu quasistatycznego jest ograniczona przez czas zanikania oscylacji wirnika, które powstają przy przejściu z jednego położenia ustalonego w drugie.

W stanie ustalonym ( przy pracy kinematycznej ) silnik pracuje ze stałą częstotliwością impulsów sterujących, która jest większa od częstotliwości przy pracy quasistatycznej.

Stan dynamiczny jest zasadniczym stanem pracy silnika skokowego. Stan ten zawiera: rozruch, hamowanie, nawrót, przejście od jednej częstotliwości do drugiej.

Charakterystyczną cechą silnika skokowego jest częstotliwościowa regulacja prędkości obrotowej w szerokich granicach. Przez zmianę częstotliwości możliwe jest też zatrzymanie w ustalonym położeniu, rozruch i nawrót.

Właściwości dynamiczne silnika skokowego określa kilka charakterystycznych pojęć:

- częstotliwość maksymalna rozruchu – jest to maksymalna częstotliwość impulsów zasilających silnik krokowy, przy której każdemu impulsowi odpowiada przesunięcie kątowe lub liniowe wirnika silnika o znamionową wartość skoku. Częstotliwość maksymalna rozruchu  $f_{r \max}$  zwiększa się ze wzrostem momentu synchronizującego, ze zmniejszeniem kąta skoku, a także ze zmniejszeniem momentu bezwładności i obciążenia;
- częstotliwość graniczna  $f_g$  silnika skokowego jest to największa częstotliwość impulsów zasilających silnik krokowy, przy której jeszcze każdemu kolejnemu impulsowi, przy płynnym zwiększaniu częstotliwości od zera, odpowiada przesunięcie kątowe ( lub liniowe ) wirnika o znamionową wartość skoku. Zachodzi nierówność  $f_g < f_{r \max}$ ;
- częstotliwość graniczna nawrotu  $f_n$  silnika skokowego jest to maksymalna częstotliwość impulsów zasilających silnik skokowy, przy której podczas zmiany kierunku obrotów ( nawrotu ) każdemu impulsowi odpowiada przesunięcie kątowe ( lub liniowe ) wirnika o znamionową wartość skoku. Zwykle zachodzi zależność  $f_n = ( 0,2 - 0,5 ) f_{r \max}$ ;
- moment rozruchowy silnika skokowego jest to maksymalna wartość momentu obciążenia, przy której jest możliwy rozruch silnika krokowego bez utraty skoku;
- maksymalny statyczny moment synchroniczny silnika skokowego jest to maksymalna wartość statycznego momentu synchronicznego rozwijana przez silnik skokowy podczas jego ustalonej pracy, określana z przebiegu charakterystyki kątowej momentu.



### 3.2. Analiza dynamiczna silnika skokowego.

Wyprowadzając równanie transmitancji silnika skokowego, trzeba wziąć pod uwagę fakt, że jest on podobny do konwencjonalnego silnika wykonawczego prądu przemiennego, od którego różni się tym, że jego uzwojenia są zasilane przez ciąg impulsów, pochodzących z układu sterowania. Silnik krokowy zlicza otrzymane impulsy i przetwarza na sygnał analogowy. Tak więc, zamiast wirującego ze stałą prędkością pola magnetycznego, właściwego dla silnika wykonawczego, silnik krokowy ma pole wirujące, które przemieszcza się dyskretnie z położenia w położenie. Wirnik silnika skokowego, który najczęściej ma magnes trwały, przemieszcza się o odpowiedni kąt pod wpływem ciągu impulsów o wymaganej sekwencji.

Transmitancję silnika skokowego wyprowadza się przy takich samych założeniach, jak silnika wykonawczego: zakłada się zerowe warunki początkowe i liniowość w ograniczonym zakresie pracy oraz stałość indukcyjności własnych pasm uzwojenia stojana.

Transformacja Laplace'a napięcia doprowadzanego do jednego z pasm uzwojenia ma postać:

$$U(s) = RI(s) + K_e \dot{\theta}(s) \quad (W - 3)$$

gdzie:

$I(s)$  – transformata Laplace'a prądu w paśmie uzwojenia silnika skokowego;

$R$  – rezystancja uzwojenia;

$K_e$  – stała napięciowa silnika, V/rad – określa napięcie indukowane (siłę przeciwelektromotoryczną) wytwarzane dzięki magnesom trwałym;

$\dot{\theta}(s)$  – transformata Laplace'a kąтового położenia wirnika, w rad.

Na podstawie równania (W - 3) transformata Laplace'a prądu w pasmach uzwojenia silnika wynosi:

$$I(s) = \frac{U(s) - K_e \dot{\theta}(s)}{R} \quad (W - 4)$$

Transformata Laplace'a momentu obrotowego silnika skokowego wynosi:

$$M(s) = K_m I(s) = Js^2 \dot{\theta}(s) + Ds \dot{\theta}(s) \quad (W - 5)$$

gdzie:

$K_m$  – stała momentowa, N\*m/A;

$J$  – moment bezwładności sprowadzony do wału silnika, g\*cm<sup>2</sup>;

$D$  – współczynnik tarcia lepkiego, g\*cm<sup>2</sup>/s.

Na podstawie równań (W - 4) oraz (W - 5) można określić transmitancję jako stosunek transformaty Laplace'a sygnału wyjściowego do wejściowego:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{K_e}}{\frac{JR}{K_m K_e} s^2 + \frac{DR}{K_m K_e} s + 1}$$

Równanie powyższe można przekształcić do dogodniejszej postaci przez podstawienia:

$$\tau = \sqrt{\frac{JR}{K_m K_e}} \quad \xi = \frac{D}{2J} \tau = \frac{DR}{2\sqrt{K_m K_e JR}} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{R}{K_m K_e J}}$$

Teraz równanie transmitancji przyjmie postać:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{K_e \tau^2}}{s^2 + \frac{2\xi}{\tau} s + \frac{1}{\tau^2}} \quad (W - 6)$$

Mianownik wyrażenia (W – 6) może być przedstawiony w innej postaci i wtedy:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{K_e \tau^2}}{(s + \alpha + j\beta)(s + \alpha - j\beta)} = \frac{\frac{1}{K_e \tau^2}}{(s + \alpha)^2 + \beta^2}$$

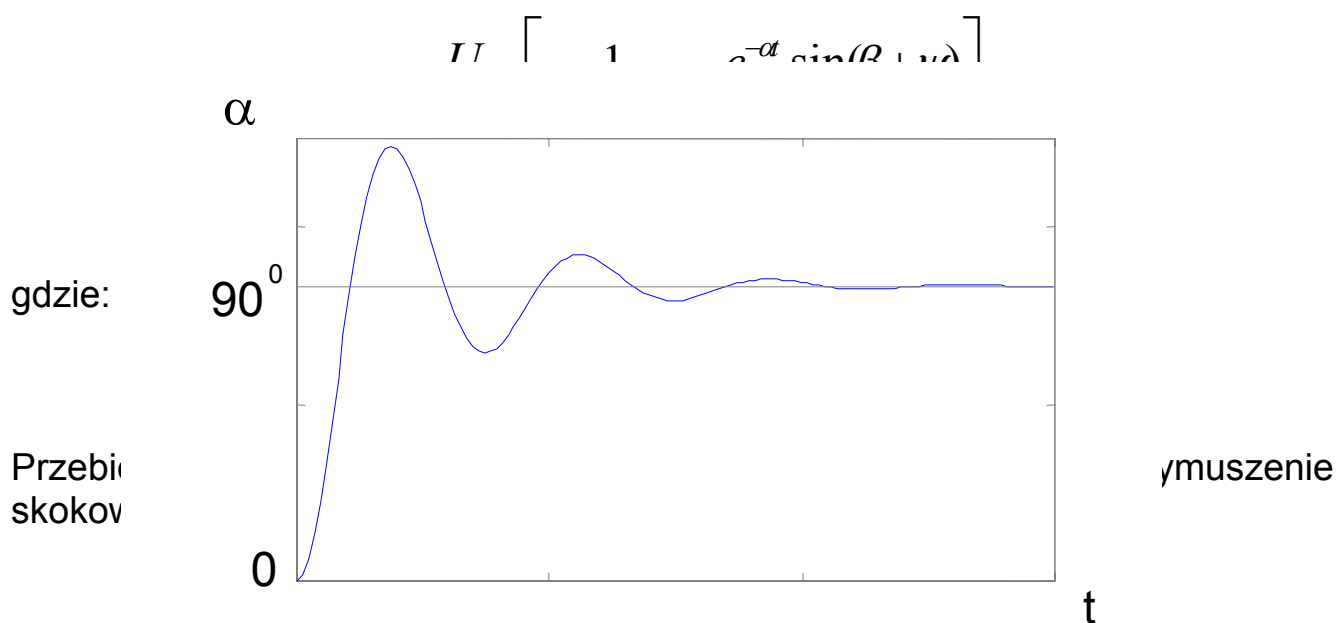
gdzie:

$$\beta = \frac{1}{\tau} \sqrt{1 - \xi^2} \quad \alpha = \frac{\xi}{\tau}$$

Odpowiedź silnika na wymuszenie napięciem skokowym  $U(s)=U_0/s$  doprowadzonym do jednego z pasm uzwojenia silnika:

$$\theta(s) = \frac{\frac{U_0}{K_e \tau^2}}{s[(s + \alpha)^2 + \beta^2]}$$

Za pomocą transformacji odwrotnej Laplace'a otrzymuje się funkcję czasową odpowiedzi silnika:



**Rys.11.** Odpowiedź silnika skokowego na wymuszenie skokowe.

### 3.2.1. Modele matematyczne silników skokowych.

#### 3.2.1.1. Modelowanie matematyczne maszyn elektrycznych.

W analizie dynamicznej silników skokowych duże znaczenie ma ich modelowanie matematyczne. Aby przeanalizować jakiekolwiek urządzenie, trzeba w pierwszym rzędzie sformułować równania matematyczne, które opisują to urządzenie przy zastosowaniu praw fizycznych. Następnie trzeba rozwiązać te równania, aby tą drogą uzyskać pożądane informacje.

Wiele urządzeń ma podobny do siebie opis matematyczny. Jeżeli równania kilku urządzeń są podobne do siebie (lub identyczne), to urządzenia te nazywa się analogicznymi, równania zaś, które je opisują, wystarczy rozwiązać tylko raz w celu przeprowadzenia tych wszystkich urządzeń. Jest to rozwiązanie zagadnienia przez analogię. Jeżeli jeden układ fizyczny jest analogiczny do drugiego układu fizycznego i został wybrany, żeby go reprezentować w analizie, to taki układ nazywa się modelem. Równania te użyte do analizy układu na maszynie analogowej lub cyfrowej są często nazywane modelami matematycznymi układu.

Przy wyborze modelu układu jest istotne, by reprezentował on rozpatrywane urządzenie z taką dokładnością, jaka jest wymagana dla danej analizy, tzn., że równania modelu powinny być identyczne z równaniami badanego urządzenia w określonych warunkach. Idealna byłaby identyczność modelu i urządzenia, lecz w praktyce muszą być dopuszczone pewne odchylenia.

#### 3.2.1.2. Model matematyczny reluktancyjnego silnika skokowego.

Liniowy model matematyczny reluktancyjnego silnika skokowego był zastosowany przez M.F.Rahmana do teoretycznego badania właściwości dynamicznych tego rodzaju silników. Przy użyciu tego modelu autor badał zależność pomiędzy błędem położenia kąтового wirnika wielosegmentowego reluktancyjnego silnika skokowego a jego średnim momentem obrotowym przy różnych prędkościach.

W liniowym modelu silnika skokowego pominięto nasycenie i wpływ prądów wirowych. Na podstawie tego modelu napięcia pasm silnika określają wzory:

$$U_1 = i_1 R_0 + [L_0 + L_1 \cos(Z\theta)] \frac{di_1}{dt} - ZL_1 \sin(Z\theta) i_1 \frac{d\theta}{dt}$$
$$U_2 = i_2 R_0 + \left[ L_0 + L_1 \cos\left(Z\theta - \frac{2\pi}{m}\right) \right] \frac{di_2}{dt} - ZL_1 \sin\left(Z\theta - \frac{2\pi}{m}\right) i_2 \frac{d\theta}{dt}$$

## M

$$U_m = i_m R_0 + \left[ L_0 + L_1 \cos \left( Z\theta - \frac{(m-1)2\pi}{m} \right) \right] \frac{di_m}{dt} - ZL_1 \sin \left( Z\theta - \frac{(m-1)2\pi}{m} \right) i_m \frac{d\theta}{dt}$$

gdzie:

- 1, 2, ..., m – pasma silnika skokowego;
- m – liczba pasm silnika skokowego;
- $U_m$  – napięcie pasma uzwojenia, V;
- $i_m$  – prąd pasma, A;
- $R_0$  – rezystancja pasma,  $\square\square$
- $L_0$  – średnia indukcyjność pasma, H;
- $L_1$  – składowa zmienna indukcyjności pasma, H;
- Z – liczba zębów stojana lub wirnika;
- $\square$  - kąt położenia wirnika, rad.

Moment  $M_g$  generowany w silniku jest określony równaniem:

$$M_g = \frac{ZL_1}{2} \left[ i_1^2 \sin Z\theta + i_2^2 \sin \left( Z\theta - \frac{2\pi}{m} \right) + \dots + i_m^2 \sin \left( Z\theta - \frac{(m-1)2\pi}{m} \right) \right]$$

Średni moment obrotowy zaś:

$$M_{av} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_g d\theta$$

Założono, że rezystancja i indukcyjność poszczególnych pasm są identyczne, co zazwyczaj występuje w praktyce. Ponadto w modelu założono zmienność indukcyjności pasma jako kosinusoidalną funkcję kąta  $\square$ , co jest do przyjęcia dla silników, w których stosunek szerokości zęba do grubości szczeliny powietrznej jest mniejszy niż 20.

### 3.2.1.3. Model matematyczny silnika skokowego o magnesie trwałym na wirniku.

Rysunek 2 przedstawia schemat modelu matematycznego silnika skokowego o magnesach trwałych. Równania napięć doprowadzonych do pasm uzwojenia silnika mają postać:

$$u_1(t) = Ri_1(t) + L \frac{di_1(t)}{dt} + U_i$$

$$u_2(t) = Ri_2(t) + L \frac{di_2(t)}{dt} + U_i$$

Napięcie indukowane  $U_i$  jest generowane w pasmach uzwojenia stojana dzięki ruchowi wirnika z magnesem trwałym w stosunku do biegunów magnetycznych stojana. Zakładając sinusoidalny rozkład indukcji magnetycznej stojana i posługując się równaniami Maxwella, napięcie indukowane można wyrazić wzorem:

$$U_i = \frac{K_e}{Z_r} \frac{d\theta(t)}{dt} \sin\theta(t) \quad (W-8)$$

gdzie:

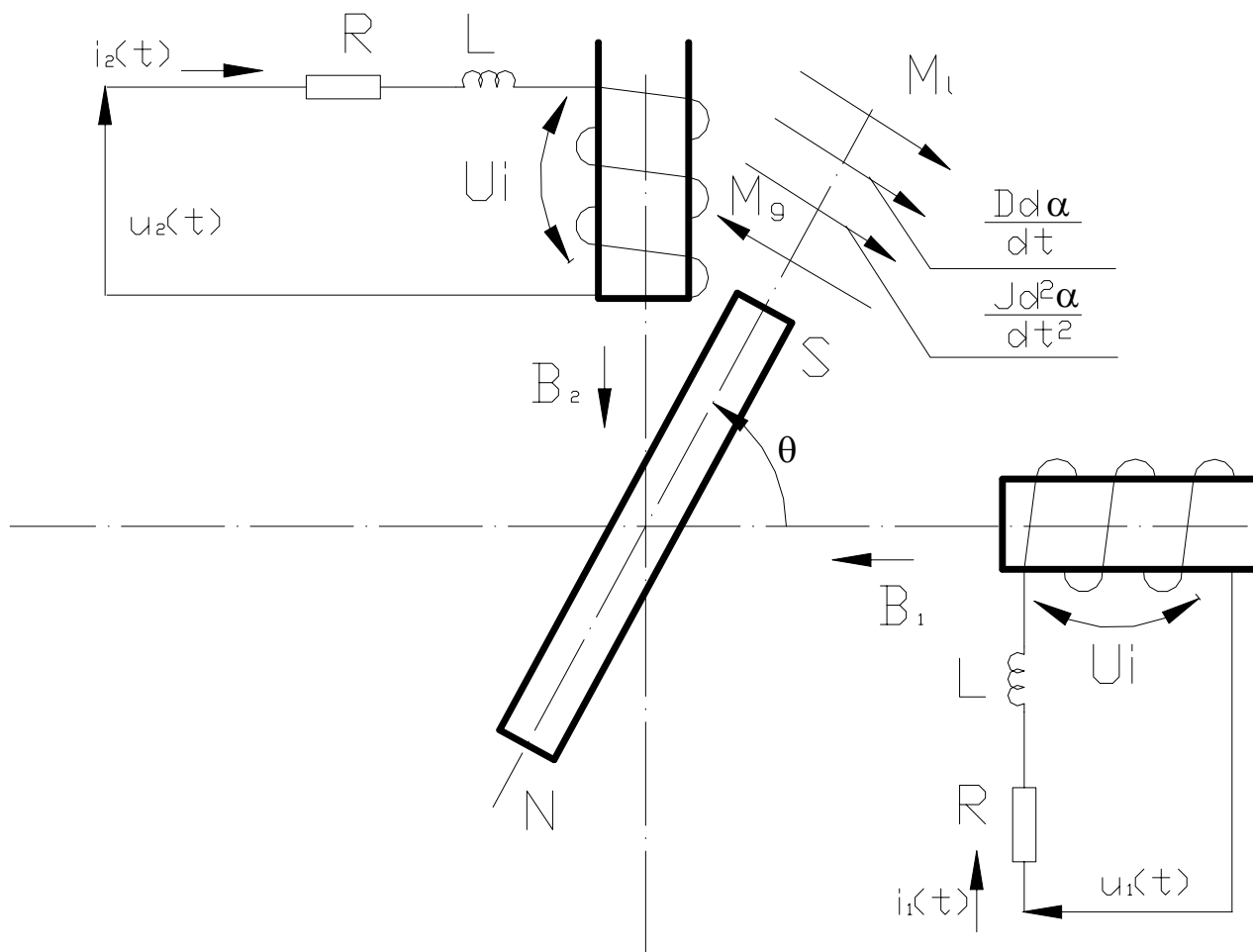
$K_e$  – stała wiążąca napięcie indukowane i indukcję magnetyczną stojana, V\*s/stopień;

$Z_r$  – liczba zębów wirnika.

Po uwzględnieniu zależności ( W-8 ) równania różniczkowe napięć pasm uzwojenia stojana przyjmą postać:

$$u_1(t) = Ri_1(t) + L \frac{di_1(t)}{dt} + \frac{K_e}{Z_r} \frac{d\theta(t)}{dt} \sin\theta(t)$$

$$u_2(t) = Ri_2(t) + L \frac{di_2(t)}{dt} + \frac{K_e}{Z_r} \frac{d\theta(t)}{dt} \cos\theta(t)$$



**Rys.12**

Moment obrotowy wytwarzany przez silnik skokowy przy obu pasmach zasilonych może być wyrażony – w zależności od indukcji magnetycznej  $B$  w stojanie i momentu magnetycznego  $H$  wirnika – równaniem:

$$M_g = B_2 H \cos \theta(t) - B_1 H \sin \theta(t)$$

w którym  $H$  – moment magnetyczny wirnika, A/m.

Moment magnetyczny wirnika jest funkcją jego geometrii i energii zastosowanego magnesu trwałego. Indukcja magnetyczna jest proporcjonalna do liczby zwojów uzwojenia oraz prądu  $i(t)$  w uzwojeniu. Zatem wytwarzany moment obrotowy może być wyrażony jako:

$$M_g = K_m i_2(t) \cos \theta(t) - K_m i_1(t) \sin \theta(t)$$

gdzie  $K_m$  – stała momentowa, W/A.

Momentowi  $M_g$  generowanemu przez silnik przeciwstawiają się działające na wale, przeciwnie skierowane, mechaniczne momenty składowe:

- moment spowodowany bezwładnością wirnika i obciążenia na wale:

$$J \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2}$$

- moment tłumienia za pomocą tarcia lepkiego, uwzględniający tłumienie silnika i cieczy tłumiącej:

$$D \frac{d \alpha(t)}{dt}$$

- moment tarcia Coulomba:

$$M_{fr} = \frac{\frac{d \alpha(t)}{dt}}{\left| \frac{d \alpha(t)}{dt} \right|}$$

- zewnętrzny moment obciążenia na wale:

$$M_t(t)$$

Przy czym między kątem  $\alpha$  i kątem obrotu  $\theta$  zachodzi zależność:

$$\alpha = Z_r \theta$$

Przyrównując mechaniczne momenty oporu na wale do momentu generowanego przez silnik skokowy, otrzymuje się;

$$\begin{aligned} M_g(t) &= K_m i_2(t) \cos \theta(t) - K_m i_1(t) \sin \theta(t) = \\ &= \frac{J}{Z_r} \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} + \frac{D}{Z_r} \frac{d \theta(t)}{dt} + M_r \frac{d \theta(t) / dt}{|d \theta(t) / dt|} + M_l(t) \end{aligned}$$

Dla naszych celów możemy dla przykładu rozpatrzeć transmitancję analizowanego silnika skokowego dla punktu pracy, kiedy wirnik jest w równowadze po wykonaniu skoku, przy zasilonych obu pasmach. Wybór tego punktu jest uzasadniony łatwością eksperymentalnego określenia parametrów dla niego. Jako warunki początkowe przyjęto prędkość i przyspieszenie równe zeru. Uzględniając warunki początkowe i pomijając tarcie suche, zlinearyzowane równania odnoszące się do tego punktu pracy przyjmują postać:



$$- K_m I_{1-0} \sin \theta(t) - K_m I_{2-0} \cos \theta(t) + K_m \cos \theta i_2 - K_m \sin \theta i_1(t) =$$

$$= \frac{J}{Z_r} \frac{d^2}{dt^2} \Delta \theta(t) + \frac{d}{dt} \Delta \theta(t) + \Delta M_l(t)$$

$$u_1(t) = R \Delta i_1(t) + L \frac{d}{dt} \Delta i_1(t) + \frac{K_e}{Z_r} \sin \theta_0 \frac{d}{dt} \Delta \theta(t)$$

$$u_2(t) = R \Delta i_2(t) + L \frac{d}{dt} \Delta i_2(t) + \frac{K_e}{Z_r} \cos \theta \frac{d}{dt} \Delta \theta(t)$$

Dzięki transformacji Laplace'a trzech powyższych równań otrzymamy:

$$\Delta\theta(s) = \frac{K_m \cos \theta_0 \Delta I_2(s) - K_m \sin \theta_0 \Delta I_1(s) - \Delta M_l(s)}{\frac{Js^2}{Z_r} + \frac{Ds}{Z_r} + K_m I_{1-0} \sin \theta_0 + K_m I_{2-0} \cos \theta_0}$$

$$I_2(s) = \frac{\Delta U_2(s) + \frac{U_{2-0}}{s} - \frac{K_e}{Z_r} \sin \theta_0 s \Delta\theta(s)}{R + Ls}$$

$$I_1(s) = \frac{U_1(s) + \frac{U_{1-0}}{s} - \frac{K_e}{Z_r} \cos \theta_0 s \Delta\theta(s)}{R + Ls}$$

Przez rozwiązanie tych trzech powyższych równań, otrzymuje się wyrażenie na odpowiedź silnika skokowego w zakresie jednego skoku, przy obu uzwojeniach zasilonych:

$$\Delta\theta(s) = \frac{\frac{K_m \cos \theta_0}{R + Ls} \left[ \Delta U_2(s) + \frac{U_{2-0}}{s} \right] - \frac{K_m \sin \theta_0}{R + Ls} \left[ \Delta U_1(s) + \frac{U_{1-0}}{s} \right] - \Delta M_l(s)}{\frac{Js^2}{Z_r} + \frac{Ds}{Z_r} + \frac{K_m K_e}{Z_r (R + Ls)} (\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0) s + K_m I_{1-0} \sin \theta_0 + K_m I_{2-0} \cos \theta_0}$$

Równanie powyższe może być uproszczone przez podstawienie  $I_{2-0} = I_{1-0} = I$  oraz założenie, że początkowy moment obciążenia  $M_{l0} = 0$ . Posługując się tymi uproszczeniami, otrzymano:  $\cos \square_0 - \sin \square_0 = 0$  lub  $\square_0 = 45^\circ$ . Wówczas ostatnie równanie można zapisać w postaci:

$$\Delta\theta(s) = \frac{\frac{0,707K_m}{R + Ls} \left[ \Delta U_2(s) + \frac{U_{2-0}}{s} \right] - \frac{0,707K_m}{R + Ls} \left[ \Delta U_1(s) + \frac{U_{1-0}}{s} \right] - \Delta M_l(s)}{\frac{Js^2}{Z_r} + \frac{Ds}{Z_r} + \sqrt{2}K_m I}$$

Przy zakłóceniach momentu obciążenia wokół punktu pracy po wykonaniu skoku i początkowym momencie obciążenia równym zero, odpowiedź silnika skokowego ogranicza się do wyrażenia:

$$\Delta\theta(s) = \frac{-\frac{1}{J}\Delta M_l(s)Z_r}{s^2 + \frac{D}{J}s + \sqrt{2}\frac{K_m IZ_r}{J}}$$

Wyrażenie to jest bardzo użyteczne, gdyż odpowiedź silnika skokowego jest opisana jako funkcja częstotliwości drgań własnych, współczynnika tłumienia i stałej sztywności mechanicznej, te zaś parametry mogą być łatwo określone eksperymentalnie.

Częstotliwość drgań własnych i współczynnik tłumienia zlinearyzowanego modelu silnika skokowego o magnesach trwałych mogą również być wyznaczone przez rozpatrzenie małych zmian  $\square\square$  w stosunku do punktu równowagi.

Rozpatrując zlinearyzowane równanie dla punktu równowagi stabilnej, przy stałym prądzie stojana i momencie obciążenia równym zeru, uzyskuje się jego uproszczenie do postaci:

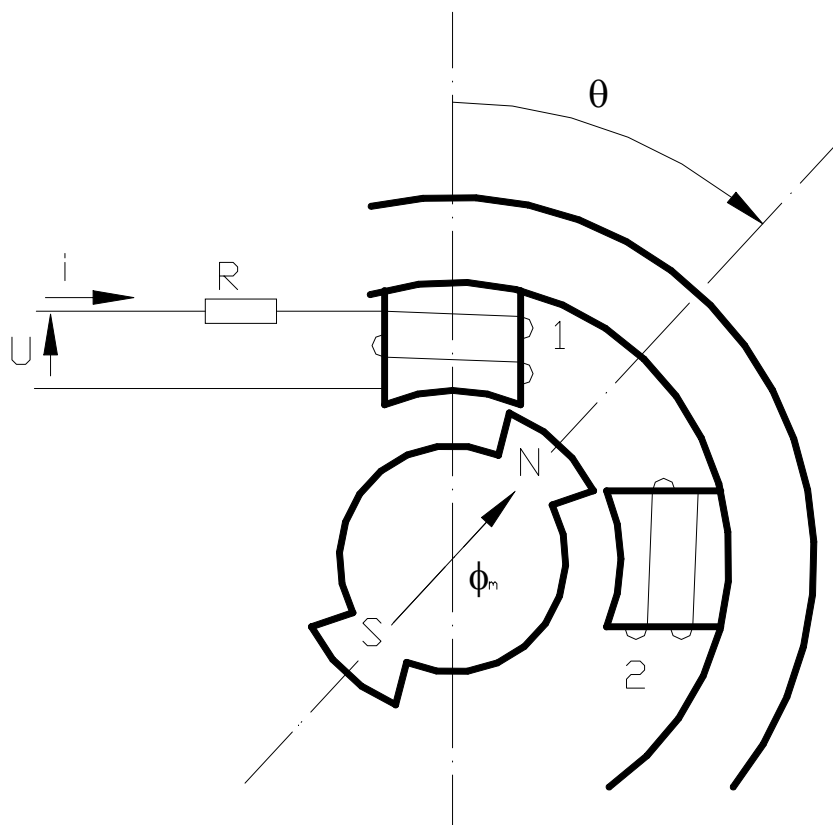
$$\Delta\theta(s) = \frac{\left[s + \frac{D}{J}\right]\Delta\theta(0)}{s^2 + \frac{D}{J}s + \frac{\sqrt{2}K_m IZ_r}{J}}$$

Równanie powyższe może być użyte do wyznaczenia częstotliwości drgań własnych i współczynnika tłumienia zlinearyzowanego modelu dla stabilnego punktu równowagi.

#### 3.2.1.4. Model matematyczny hybrydowego silnika skokowego.

Modelem hybrydowego silnika skokowego posłużyli się D.W.J. Pulle i A. Hughes przy analizie pracy silnika skokowego zasilanego napięciem o stałej wartości. Celem było znalezienie relacji pomiędzy parametrami silnika i jego wyjściową mocą mechaniczną oraz przedstawienie wyników w postaci ogólnej, przydatnej dla wszystkich silników hybrydowych.

Jako podstawę do stworzenia modelu przyjęto hybrydowy silnik skokowy pokazany na rysunku poniżej.



**Rys.13**

Poczyniono następujące założenia upraszczające: przyjęto, że indukcyjność własna jest niezależna od położenia wirnika; prądy wirowe i efekt nasycenia pominięto. Ponadto z uwagi na konfigurację uzwojeń, indukcyjność wzajemną pominięto. Te założenia upraszczające są typowe dla tego rodzaju silników i prowadzą do modelu jaki został przedstawiony na rysunku powyżej.

Każde z pasm było wzbudzone impulsami prostokątnymi napięcia w układzie bipolarnym, które są reprezentowane w analizie przez podstawową składową napięcia  $u(t)$ . Rezystancja  $R$ , widoczna na powyższym rysunku jest sumą rezystancji pasma i rezystancji zewnętrznej, zwanej forsującą.

W niniejszej pracy będzie rozpatrzony silnik pracujący ze stałą prędkością wirnika  $\omega_m$ . Uwaga będzie skupiona na tym, jak wpływa obciążenie na wale silnika na jego pracę oraz jak jego parametry układu wpływają na maksymalną moc, uzyskiwaną przy danej prędkości.

Napięcie wzbudzenia  $u(t)$  jest wyrażone wzorem:

$$u = \sqrt{2}U \cos \omega t$$

Równanie napięć dla pasma 1:

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{di}$$

Występująca w równaniu powyższym wielkość zmienna  $\theta$  jest strumieniem skojarzonym z pasmem 1, który można określić wzorem:

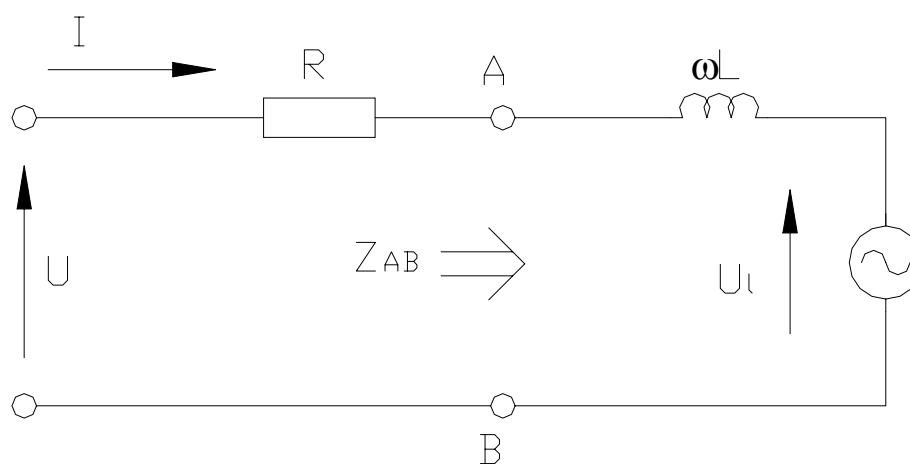
$$\Psi = Li + N\Phi_m \cos \theta$$

Pierwszy czynnik jest związany z indukcyjnością własną pasma, drugi zaś zależy od strumienia  $\Phi_m$  magnesu trwałego i od liczby prętów  $N$  w paśmie 1.

Biorąc pod uwagę założenie o stałej prędkości kątowej  $\omega_m$ , kąt będzie określony wzorem:

$$\theta = \omega t - \left( \vartheta + \frac{\pi}{2} \right)$$

Kąt obciążenia  $\vartheta$  jest – podobnie jak w teorii konwencjonalnych maszyn synchronicznych – kątem pomiędzy  $U_i$  oraz  $U$  w schemacie zastępczym, taki jak pokazany na rysunku poniżej. Jest to schemat zastępczy hybrydowego silnika skokowego.



**Rys.14**

Związek częstotliwości wzbudzenia z liczbą skoków  $S$  wynika ze wzoru:

$$\omega = \tilde{\omega} S$$

Podstawiając dwa poprzednie równania do powyższego otrzymuje się:

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{d}{dt} \left[ N\Phi_m \cos \left( \omega t - \left( \vartheta + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right]$$

Rozwiązanie powyższego równania można uzyskać przez przekształcenie w dziedzinę liczb zespolonych, za pomocą wyrażenia:

$$x(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} [x e^{j\omega t}]$$

które umożliwi przedstawienie poprzedniego równania w postaci:

$$\underline{U} - \underline{U}_i = (R + j\omega L) \underline{I}$$

gdzie:

$$\underline{U}_i = \omega N\Phi_m e^{-j\vartheta}$$

Powyższe równanie prowadzi bezpośrednio do modelu obwodu przedstawionego na rysunku 25, w którym  $Z_{AB}$  jest impedancją wejściową, odczytywaną z zacisków A i B. Prąd w pasmie 2 będzie identyczny jak w pasmie 1, lecz przesunięty w czasie o kąt  $\tilde{\vartheta}$

Schemat zastępczy hybrydowego silnika skokowego przedstawiony na rysunku 25 jest zbudowany jak typowy schemat zastępczy maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi, co wynika z poczynionych założeń upraszczających.

Maksymalna mechaniczna moc wyjściowa może być obliczona ze wzoru:

$$P_{\max} = U^2/4R$$

### 3.3. Ograniczenie oscylacji silników skokowych.

#### 3.3.1. Przyczyny powstawania oscylacji.

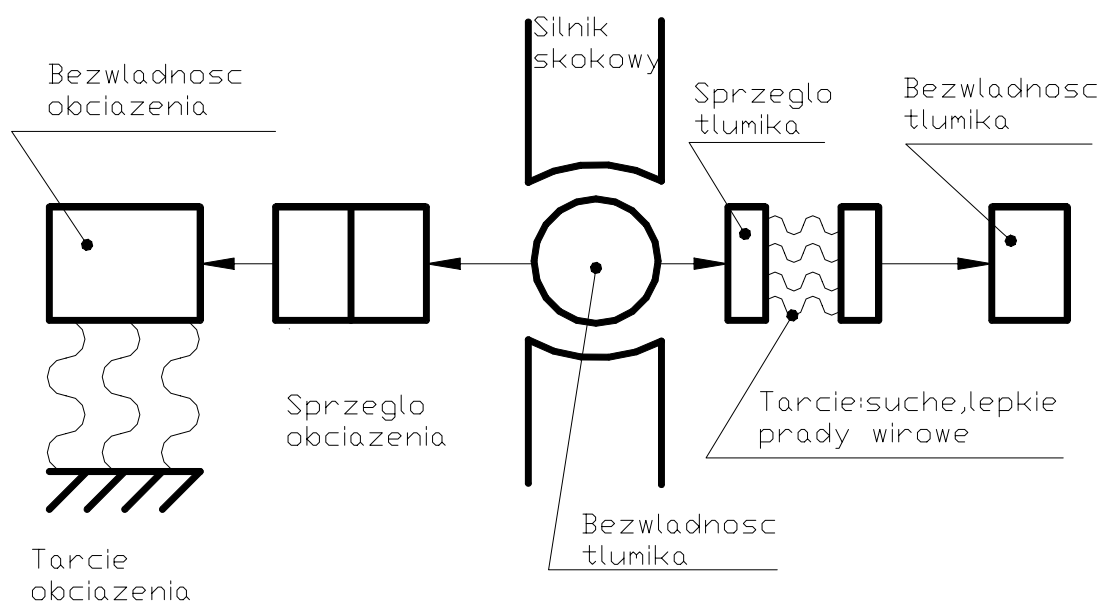
Występowanie oscylacji prędkości kątowej silnika krokowego jest związane z bezwładnością mechaniczną, wyrażoną przez moment

bezwładności  $J$  i elektryczną, wyrażoną przez indukcyjność  $L$  uzwojeń. Moment bezwładności  $J$  i indukcyjność uzwojeń  $L$  mają wpływ na energię potencjalną pola. Wykonana praca mechaniczna jest równa przyrostowi energii pola. Przyrostowi energii pola odpowiada ubytek mechanicznej energii potencjalnej i wzrost energii kinetycznej poruszających się mas napędu.

Przy każdym przełączeniu uzwojenia silnika skokowego, do układu wprowadza się energię niezbędną do zrealizowania pracy użytecznej, a także pewną nadwyżkę energii, która jest rozpraszana w procesie wytwarzania drgań oscylacyjnych w postaci strat mechanicznych, elektrycznych i magnetycznych. Łączne straty określają czas ustalania położenia wirnika i wartość amplitudy drgań. Poniżej przedstawimy krótko kilka sposobów tłumienia oscylacji.

### 3.3.2. Tłumienie mechaniczne ( bezwładnościowe ).

Jak już sugeruje tytuł, tłumienie mechaniczne jest tłumieniem bezwładnościowym. Oprócz obciążenia, na wale silnika jest zamocowany dodatkowy zewnętrzny element bezwładnościowy ( tłumik ) i znajdujące się pomiędzy nim i silnikiem sprzęgło, charakteryzujące się stratami własnymi. Schemat ogólny przedstawiono poniżej.



**Rys.15**

Jako czynnik użyty w sprzęgle łączącym tłumik bezwładnościowy z wałem silnika może wystąpić: tarcie suche, tarcie lepkie ( sprzęgło z zastosowaniem cieczy ) oraz prądy wirowe wzbudzone dzięki zastosowaniu magnesu trwałego.

Pożądana wartość bezwładności zewnętrznego tłumika mechanicznego zależy od wielu czynników, do których należą: bezwładność silnika;

bezwładność obciążenia odniesionego do wału silnika; tarcie obciążenia; rodzaj zastosowanego sprzęgła silnik – obciążenie; pożądana intensywność tłumienia. Przyjmuje się, że w większości przypadków bezwładność tłumika powinna być 1,5 – 4 razy większa od bezwładności całego układu odniesionej do wału silnika.

### 3.3.3. Tłumienie elektromagnetyczne.

Tłumienie to można zastosować zarówno w przypadku silników skokowych o magnesach trwałych, jak i reluktancyjnych silników skokowych. Ogólne warunki uzyskania tłumienia elektromagnetycznego mogą być określone następująco. Ruch wirnika wokół położenia równowagi musi spowodować indukowanie w pasmach uzwojenia stojana napięć, które są przyczyną powstawania prądu, wytwarzającego moment tłumiący.

Stopień tłumienia zależy od trzech parametrów obwodu silnika, występujących w jego operatorowym równaniu charakterystycznym, które dla silnika dwupasmowego ma postać:

$$s^3 + \left(\frac{R}{L}\right)s^2 + (1+k)\omega_n^2 s + \left(\frac{R}{L}\right)\omega_n^2 = 0$$

Pierwszym z tych parametrów jest stosunek  $R/L$ , który jest odwrotnością elektromagnetycznej stałej czasowej obwodu stojana. Wartość tego parametru może być z łatwością zmieniana przez zmianę  $R$  włączonej w szereg z uzwojeniem stojana.

Drugim parametrem jest bezwymiarowy współczynnik  $k$ , który jest miarą zdolności tłumienia silnika.

Trzecim parametrem wpływającym na tłumienie jest  $\omega_n^2$  – kwadrat nie tłumionych drgań własnych wokół położenia równowagi.

W celu uzyskania najkorzystniejszego tłumienia musi być zapewniona odpowiednia równowaga pomiędzy wymienionymi parametrami.

### 3.3.4. Tłumienie elektroniczne.



Tłumienie tego rodzaju polega na tym, że do sekwencji sterowania silnika są wprowadzane impulsy, które wywołują ujemne momenty obrotowe.

Istotę tłumienia elektronicznego można wyjaśnić następująco:  
Przy stałej wartości napięcia zasilającego, ruchomy wirnik powoduje zaindukowanie w zasilonym uzwojeniu stojana napięcia, które jest przyczyną powstania w tym uzwojeniu prądu o wartości:

$$i_{m1} = \frac{K_e}{R} \sin \theta(t) \frac{d\theta(t)}{dt}$$

Uzwojenie jest w zasadzie obwodem zwartym dla napięć i prądów powstających w stanach przejściowych. Podobny efekt będzie występował w jakimkolwiek zwartym niezasilonym paśmie uzwojenia w czasie trwania jednego impulsu. Jeżeli na przykład uzwojenie prostopadłe w stosunku do omawianego będzie zwarte, to prąd w nim będzie wyrażony wzorem:

$$i_{m2} = \frac{K_e}{R} \cos \theta(t) \frac{d\theta(t)}{dt}$$

Wynika stąd, że niezasilone pasma uzwojenia mogą być sekwencyjnie zwierane, w celu zwiększenia efektu tłumienia.

Jest możliwe zwiększenie współczynnika tłumienia przez włączenie w szereg z uzwojeniem ujemnej rezystancji  $R$ . Jeżeli rezystancja efektywna obwodu wyniesie  $R_{ef}$ , to przy napięciu zasilania o stałej wartości, współczynnik tłumienia określi wzór:

$$\xi = \frac{D + \frac{K_m K_e}{R_{ef}} \sin^2 \theta_0}{2 \sqrt{\frac{JK_m U}{R_{ef}} \cos \theta_0}}$$

w którym:

- $R_{ef}$  – efektywna rezystancja zasilanego uzwojenia;
- $U$  – napięcie przyłączone do pasma uzwojenia stojana;
- $D$  – współczynnik tłumienia lepkiego;
- $\theta_0$  – kąt położenia wirnika w punkcie pracy.

### 3.3.5. Ograniczenie oscylacji przez zastosowanie układu zamkniętego.

Jest przyjęte rozpatrywanie pracy silnika krokowego w układzie otwartym. Jednakże silnik krokowy w układzie zamkniętym ma znacznie lepsze

właściwości. Na podstawie licznych analiz wykazano, że zastosowanie układu zamkniętego z regulatorami prędkości i położenia umożliwia otrzymanie szybko zanikającego procesu przejściowego.

### 3.4. Sterowanie silników skokowych.

#### 3.4.1. Komutacja symetryczna i niesymetryczna silnika skokowego.

Silnik skokowy przetwarza ciąg sterujących impulsów elektrycznych na ciąg kątowych przemieszczeń wału wokół jego osi. Jest to więc silnik o działaniu dyskretnym.

Konwencjonalny silnik elektryczny prądu stałego lub przemiennego o wejściu i wyjściu analogowym nie wymaga stosowania elektronicznego układu sterowania. Układy takie, znacznie polepszające jego właściwości, są wytworem ostatnich dwudziestu lat. Natomiast silnik skokowy nie może pracować bez elektronicznego układu sterowania, jeśli nie brać pod uwagę jakiegoś prymitywnego sposobu wytwarzania impulsów sterujących.

Rozpatrując właściwości silnika skokowego trzeba brać pod uwagę silnik z układem sterowania – jako całość. Rozpatrywanie samego tylko silnika daje obraz dalece niepełny. Układ sterowania odgrywa bowiem decydującą rolę w kształtowaniu korzystnych charakterystyk silnika skokowego. Ciągły rozwój silników skokowych jaki się ciągle odbywa zmierza w kierunku zwiększenia ilości skoków, momentu obrotowego i sprawności a zmniejszenia inercji mechanicznej.

Nawet przeciętny silnik dzięki odpowiedniemu sterowaniu może rozwijać duży moment obrotowy przy dużej częstotliwości pracy. Pojęcie małej, średniej, czy dużej częstotliwości pracy silnika skokowego wynika z charakterystycznych rodzajów jego pracy.

Prędkość obrotowa ( $\text{min}^{-1}$ ) szybkiego silnika skokowego może być obliczona ze wzoru:

$$n = \frac{60}{360} \alpha_s f$$

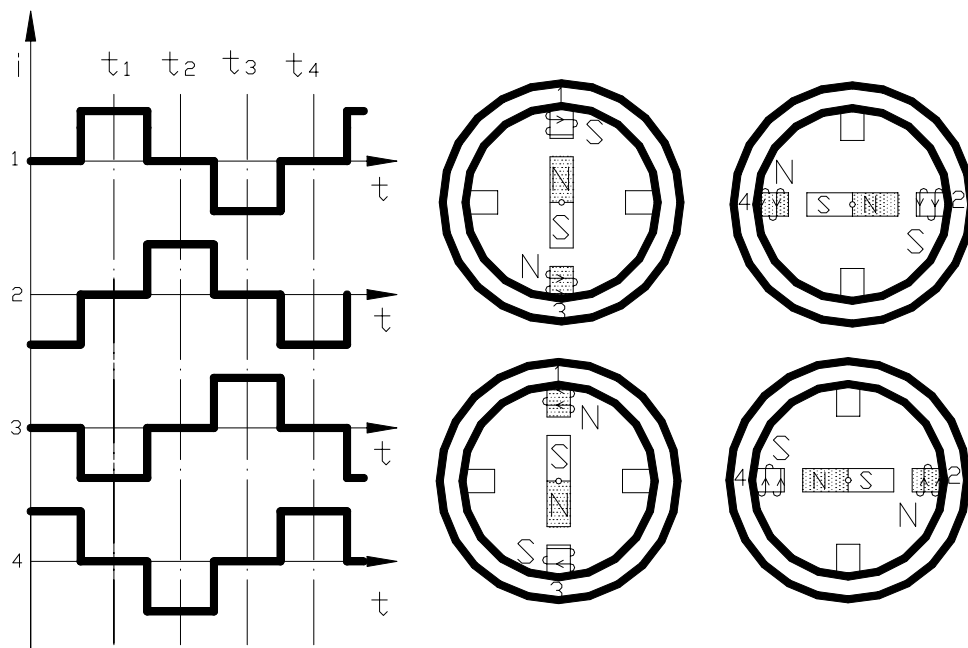
gdzie:

$\alpha_s$  – wartość skoku;

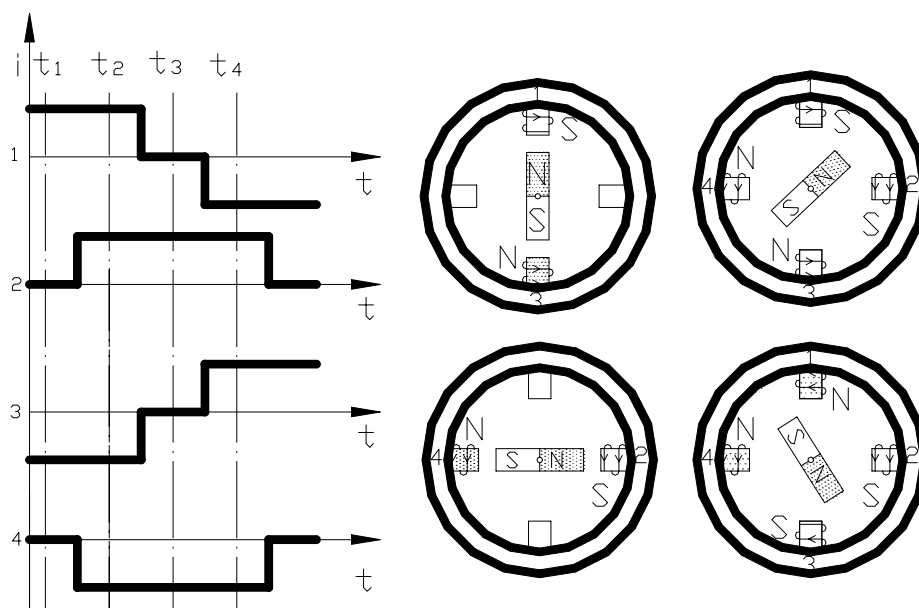
$f$  – częstotliwość pracy silnika, równa liczbie impulsów na sekundę.

Na przykład przy typowej wartości kąta  $\alpha_s = 1,8^\circ$  i częstotliwości  $f = 20\,000$  skoków/s otrzymuje się wartość prędkości obrotowej  $6\,000\text{ min}^{-1}$ . Również przy  $f = 100\,000$  skoków/s, lecz przy kacie skoku  $0,36^\circ$ , prędkość obrotowa wynosi  $6\,000\text{ min}^{-1}$ .

Kąt skoku nawet tego samego silnika może być różny w zależności od wytworzonego przez układ elektroniczny programu sterowania, co ilustrują rysunki 13 i 14.



**Rys.16**



**Rys.17**

Na rysunku 16.a. pokazano cyklogram sterowania dwubiegunowego silnika skokowego o magnesach trwałych na wirniku ( przebiegi czasowe prądu w poszczególnych pasmach uzwojenia ), na rysunku 16.b,c,d,e zaś – położenia wirnika w czasie  $t_1, t_2, t_3, t_4$ . W celu uproszczenia rysunków na każdym z nich pokazano tylko to pasmo uzwojenia, które w danej chwili jest zasilane impulsem prądowym. Komutację według przedstawionego na rysunku 16 schematu

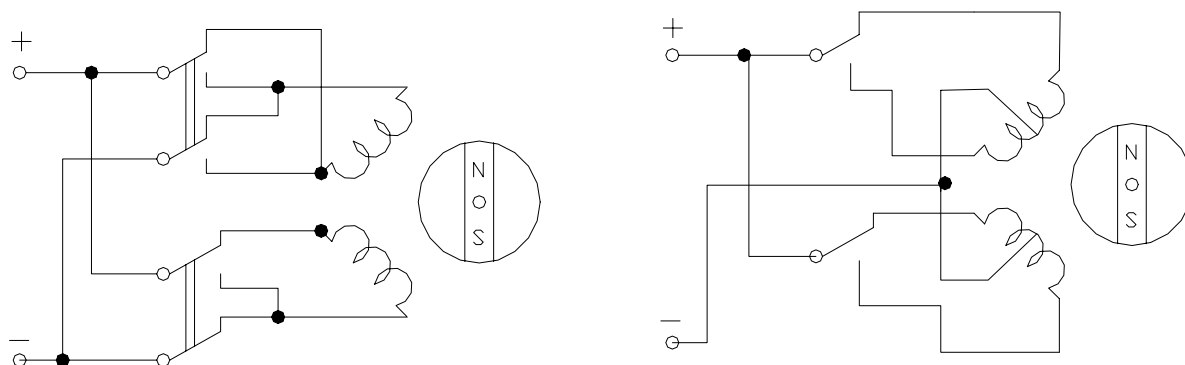
zasilania impulsami nazwano symetryczną. Jak widać z rysunku 16 kąt skoku wynosi  $90^{\circ}$ .

Ten sam silnik, zasilany impulsami według sekwencji przedstawionej na rysunku 17.a., wykonuje pracę półskokową. W położeniach przedstawionych na rysunku 17.c,e, impulsy prądowe są jednocześnie podawane na wszystkie pasma uzwojenia i w rezultacie działania wytworzonego pola magnetycznego wirnik zatrzymuje się w położeniu pośrednim, po przemieszczeniu o kąt skoku wynoszący  $45^{\circ}$ . Tego rodzaju komutację nazwano niesymetryczną.

Przez odpowiednie zaprojektowanie układu sterowania można również uzyskać pracę miniskokową, polegającą na tym, że silnik wykonuje w granicach jednego skoku bazowego pewną liczbę miniskoków o bardzo małej wartości ( rzędu setnych, a nawet tysięcznych części stopnia ).

### 3.4.2. Sterowanie bipolarne i unipolarne dwupasmowych silników skokowych.

Sterowanie bipolarne, przy którym całe pasmo uzwojenia bierze jednocześnie udział w pracy ( rysunek 18.a. ), oraz unipolarne, przy którym jednocześnie jest włączona tylko połowa pasma ( rysunek 18.b. ), stanowią podstawowe sposoby sterowania dwupasmowych silników skokowych.



**Rys.18**

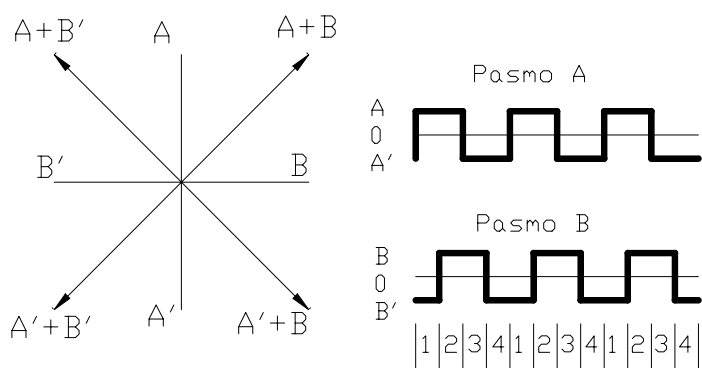
Zaletą sterowania bipolarnego jest dobre wykorzystanie momentu obrotowego dzięki temu, że całe uzwojenie jest w stanie prądowym po otrzymaniu impulsu. Wadą jest to, że zapewnienie przeciwnego zwrotu prądu w uzwojeniu wymaga aż ośmiu tranzystorów w sterowniku silnika, przez co cały układ staje się bardziej kosztowny.

Zaletą wariantu unipolarnego jest prostszy układ połączeń i mniejsza liczba tranzystorów, wadą zaś to, że jednocześnie pracuje tylko połowa uzwojenia, a zatem nie wytwarza się moment obrotowy o pełnej wartości.

Inną korzyścią wynikającą ze sterowania bipolarnego lub unipolarnego jest możliwość zmniejszania wartości skoku silnika. Przez odpowiednie przełączenie uzyskuje się pracę: pełnoskokową, półskokową lub

ćwierćskokową, co zostanie zilustrowane wykresami wektorowymi i cyklogramami przebiegów prądowych w pasmach uzwojenia silnika.

Aby otrzymać pracę pełnoskokową przyłącza się na przemian dodatnie i ujemne impulsy prądowe do pasm dwupasmowego silnika skokowego, sterowanego bipolarnie. Pełny obrót wirnika składa się z czterech skoków. Jest to widoczne na wykresie wektorowym, przedstawionym na rysunku 19.a.

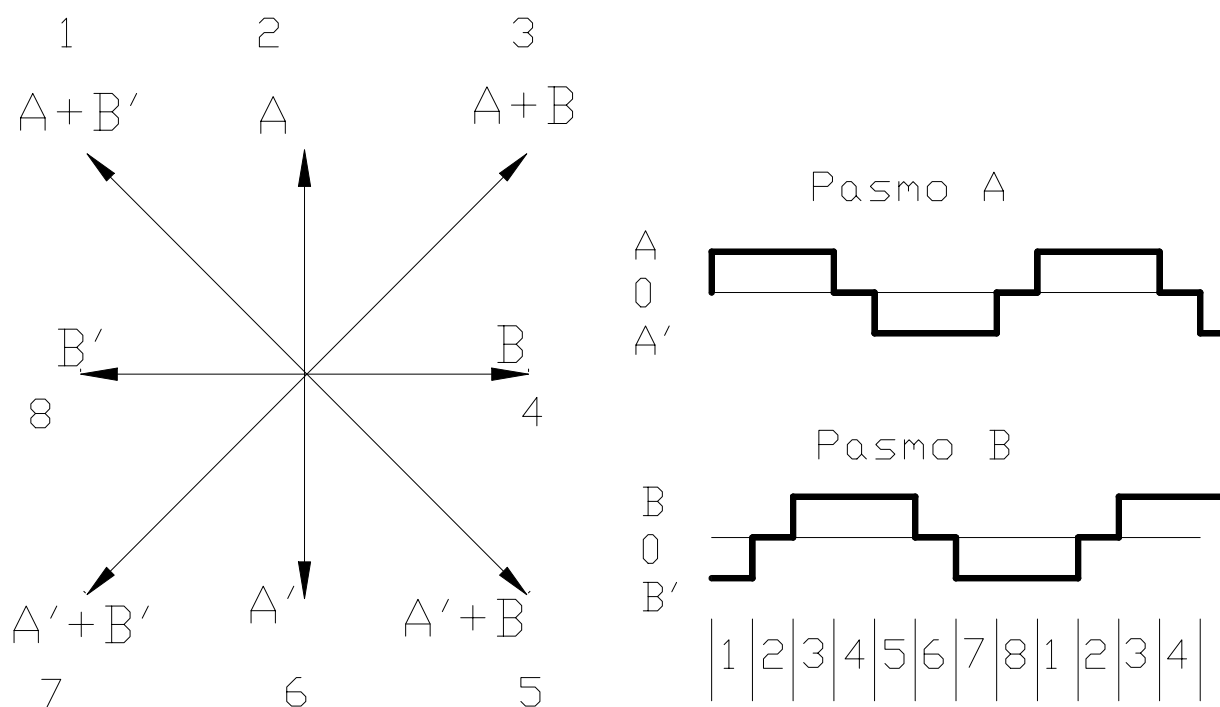


**Rys.19**

Współrzędna  $A$  oznacza prąd dodatni, natomiast  $A'$  ujemny w pasmie  $A$ . To samo dotyczy współrzędnych  $B$ - $B'$  w pasmie  $B$ . Wektory na wykresie wskazują położenia wirnika przy pracy pełnoskokowej.

W położeniu 1 pasmo  $A$  jest zasilane prądem dodatnim,  $B$  zaś ujemnym. W następnym skoku (położenie 2 na wykresie wektorowym) w obu pasmach występuje prąd dodatni ( $A+B$ ). Kiedy pasmo  $A$  jest zasilane prądem ujemnym, pasmo 2 zaś dodatnim ( $A'+B$ ), wtedy wirnik przemieszcza się ponownie o kąt  $90^\circ$ , osiągając położenie 3. W czwartym skoku oba uzwojenia są zasilane prądami ujemnymi ( $A'+B'$ ) i wówczas sekwencja powtarza się. Rysunek 16.b. pokazuje sposób zasilania impulsami pasm dwupasmowego silnika skokowego, sterowanego bipolarnie, przy pracy pełnoskokowej.

W odróżnieniu od pracy pełnoskokowej, kiedy oba uzwojenia są zasilane, przy pracy półskokowej (1/2 skokowej) jedno z uzwojeń znajduje się w stanie bezprądowym co drugi skok (rysunek 20.b.). To powoduje, że silnik wykonuje ruch tylko o pół skoku, jak to wynika z wykresu wektorowego na rysunku 20.a. W położeniach 2,4,6 i 8 tylko jedno pasmo jest zasilane. Jeden pełny obrót wirnika przy pracy półskokowej składa się z ośmiu skoków, tj. dwukrotnie więcej aniżeli przy pracy pełnoskokowej. Oczywiście wartość skoku zmniejsza się o połowę i wynosi  $45^\circ$ .



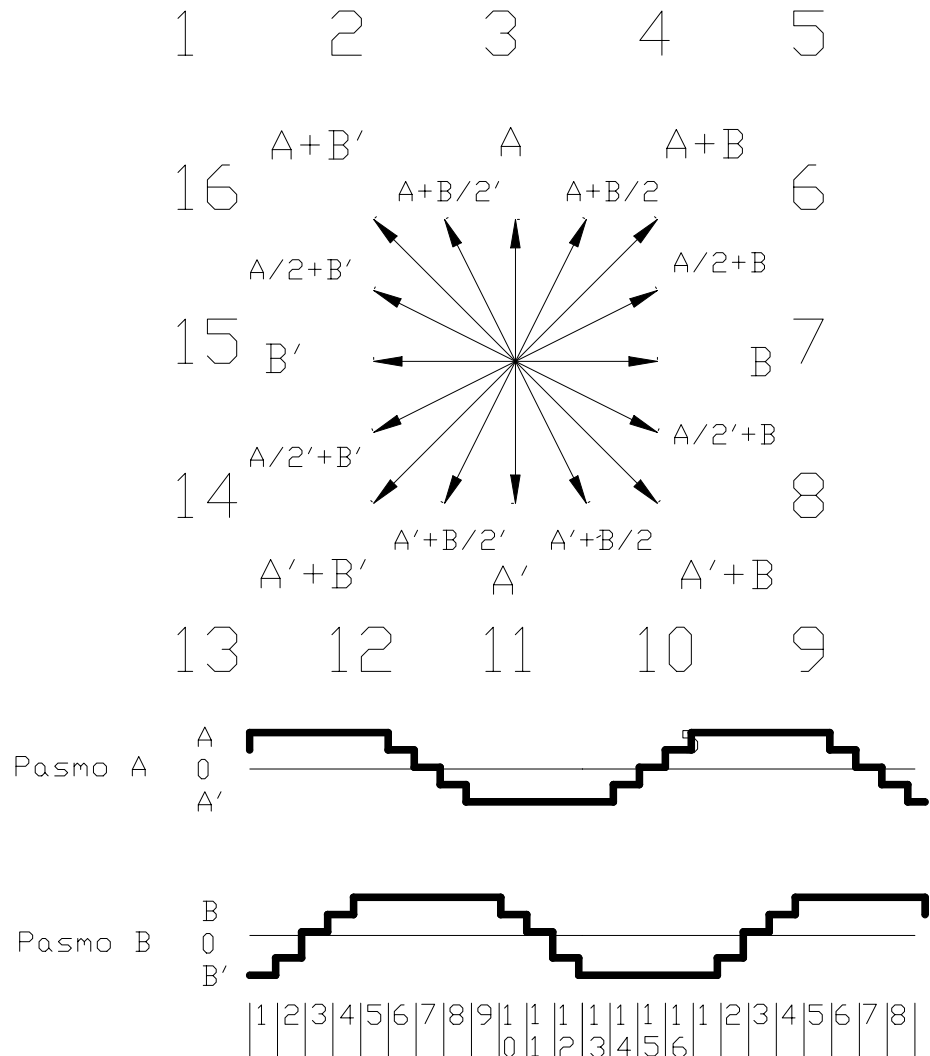
### Rys. 20

Wibracje i rezonans, które pojawiają się przy przyspieszaniu, opóźnianiu lub zatrzymywaniu silnika, są znacznie ograniczone przy pracy półskokowej.

Wadą tego sposobu sterowania jest nieco mniejszy moment statyczny, występujący co drugi skok, gdyż wówczas tylko jedno pasmo jest wzbudzone. Wyrażono to na wykresie wektorowym ( rysunek 20.a. ) przedstawiając wektory A, B, A', B' jako krótsze niż A+B, A'+B, A'+B', A+B'.

Praca ćwierćskokowa (  $\frac{1}{4}$  skokowa ) umożliwia zajmowanie przez wirnik położenia pośredniego pomiędzy dwoma położeniami półskokowymi, dzięki możliwości zasilania całego pasma i połowy drugiego, co jest możliwe ( jak to wynika z rysunku 15 ) przy sterowaniu unipolarnym.

Jest to widoczne na wykresie wektorowym przy pracy ćwierćskokowej co pokazano na rysunku 21.a. w położeniach 2,4,6,8,10,12,14 i 16. Odpowiednie przebiegi prądowe dla pracy  $\frac{1}{4}$  skokowej przedstawiono na rysunku 21.b. Pełny obrót wirnika składa się z 16 skoków. Przy pracy  $\frac{1}{4}$  skokowej następuje dalsze ograniczenie rezonansu. Praca miniskokowa, przy której skok bazowy może być podzielony na dużą liczbę ( 100 i więcej ) miniskoków o bardzo małej wartości, będzie rozpatrywana oddzielnie.

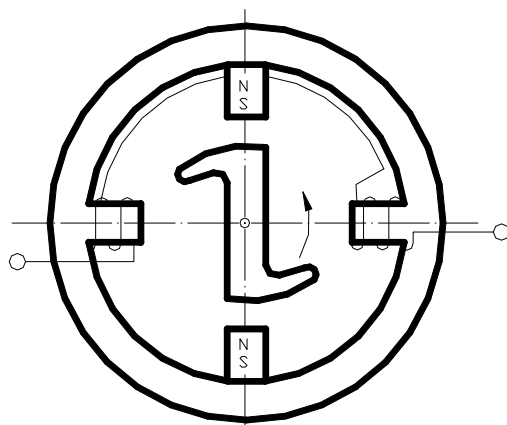


Rys.21

### 3.5. Uzwojenia silników skokowych.

#### 3.5.1. Jednopasmowe silniki skokowe.

Najprostszym uzwojeniem silnika jest uzwojenie jednopasmowe. Jednym z przedstawicieli tego rodzaju silników jest jednopasmowy, hybrydowy silnik skokowy z magnesami trwałymi umieszczonymi na stojanie. Schemat tego silnika przedstawiono na rysunku 22.



**Rys.22**

Wirnik silnika ma dwa zęby o specjalnie ukształtowanych nabiegunkach, które określają kierunek wirowania. Gdy prąd w uzwojeniu sterującym jest równy zeru, wówczas oś podłużna wirnika pokrywa się z osią magnesów trwałych. Kiedy uzwojenie otrzyma impuls sterujący, wówczas pod wpływem pola biegunów, na których jest ono umieszczone, wirnik obróci się o kąt  $90^{\circ}$  w kierunku wystającego nabiegunka, ustawiając się w takim położeniu, iż jego oś podłużna pokryje się z osią biegunów uzwojonych. Silnik musi być tak obliczony, aby pole magnetyczne wytworzone dzięki impulsowi sterującemu było w stanie pokonać przyciąganie magnesów trwałych oraz obciążenie na wale silnika skokowego.

Został wykonany skok, który wynosi  $90^{\circ}$ . Silnik wykona drugi skok, równy  $90^{\circ}$  po odłączeniu napięcia sterującego dzięki działaniu magnesu trwałego.

Wadami jednopasmowego silnika skokowego w porównaniu z wielopasmowymi są;

- liczba skoków na obrót określona jest tylko przez liczbę par biegunów;
- stosunkowo mała moc mechaniczna;
- mniejsza częstotliwość ruchu.

Zalety silnika jednopasmowego w porównaniu z wielopasmowymi przedstawiają się następująco:

- łatwość przeprowadzenia miniaturyzacji;
- prosty, unipolarny lub bipolarny, układ elektronicznego sterowania;
- niższa cena silnika i układu elektronicznego.

Silniki skokowe przeznaczone do napędów zegarów, do których należą silniki jednopasmowe, powinny spełniać wiele warunków, a wśród nich:

- mały pobór energii elektrycznej, co jest istotne w związku z zasilaniem bateryjnym;
- korzystny elektromechaniczny współczynnik sprzężenia;
- duża wartość współczynnika sprawności;
- pewna praca ( nie występowanie skoków podwójnych lub w przeciwnym kierunku );

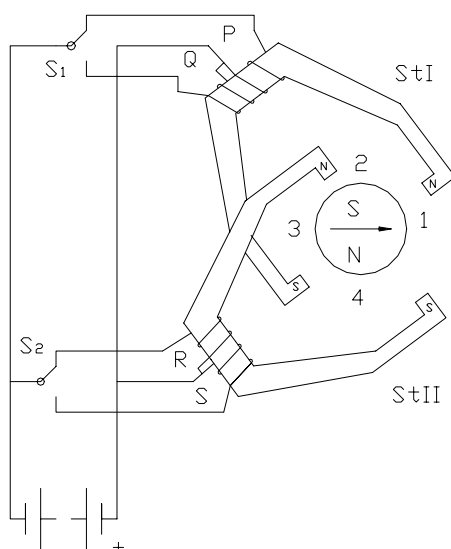


- duży moment statyczny;
- mała objętość;
- ograniczenie hałasu.

### 3.5.2. Wpływ liczby pasm na właściwości silnika.

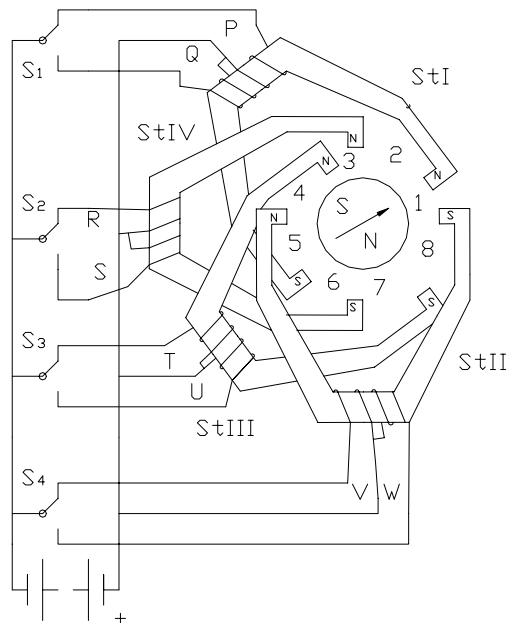
Silniki skokowe rozróżnia się pod względem liczby pasm uzwojenia. Każde pasmo jest częścią uzwojenia i jest zasilane impulsami. Kiedy potencjał pasma zmienia się, wtedy wirnik przemieszcza się w nowe położenie. Rozróżnia się jedno-, dwu-, trzy-, cztero- i pięciopasmowe silniki skokowe.

W celu stwierdzenia wpływu liczby pasm uzwojenia na właściwości silnika skokowego porównajmy krzywe statycznego momentu obrotowego dwupasmowego silnika skokowego o magnesach trwałych ( rysunek 23 ) i silnika czteropasmowego ( rysunek 24 ). W obu przypadkach wirnik jest dwubiegunowy, a sterowanie unipolarne.



**Rys. 23**

Podobnie rzecz się ma na rysunku 24.



**Rys. 24**

Z porównania rysunków 23 i 24 wynika, że ze wzrostem liczby pasm silnika zwiększa się moment obrotowy i liczba skoków na obrót, przy malejącej wartości skoku.

Bardzo popularne stały się w ostatniej dekadzie silniki pięciopasmowe. Mają one szereg zalet, a między innymi:

- duża rozdzielczość;
- ograniczenie zjawiska rezonansu;
- maksymalny moment statyczny na wale jest praktycznie taki sam przy pracy pełno- i półskokowej;
- dobre tłumienie oscylacji.

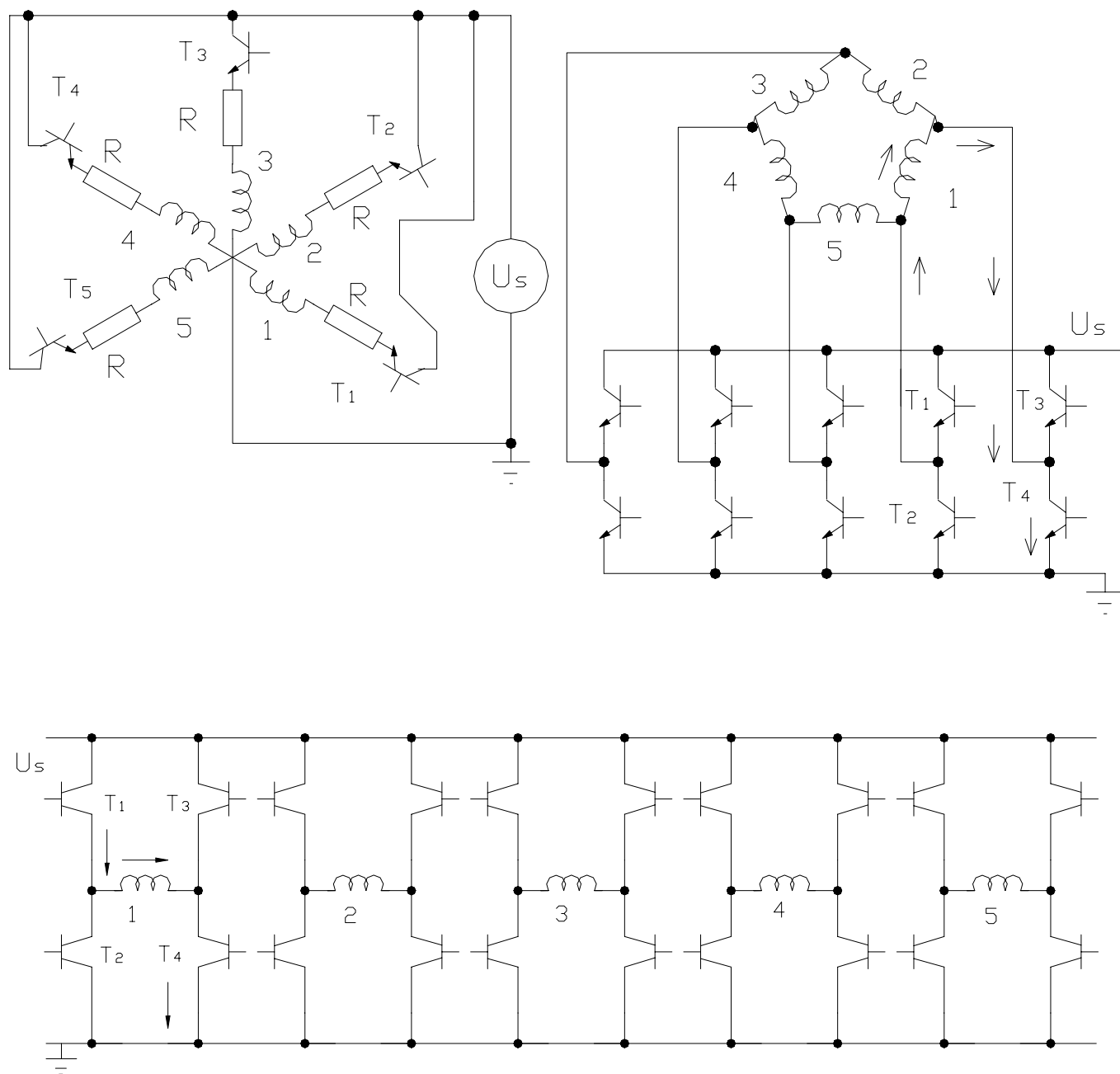
### 3.5.3. Pięciopasmowe silniki skokowe.

Właściwości pięciopasmowego silnika skokowego zależą od rodzaju zastosowanego układu sterowania, w tym również od rodzaju jego końcówki mocy.

Mogą być stosowane trzy rodzaje układów połączeń uzwojeń pięciopasmowych silników skokowych:

- gwiazda ( rysunek 25 a. );

- pentagon ( rysunek 25.b. );
- układ 5H ( rysunek 25.c. ).



**Rys.25**

Gwiazda jest układem unipolarnym, pentagon i 5H zaś są układami bipolarnymi. Przy połączeniu w gwiazdę jest możliwy tylko jednokierunkowy prąd w pasmie, co jest charakterystyczne dla układu unipolarnego, natomiast układ pentagon i 5H zapewniają prąd dwukierunkowy, właściwy układom bipolarnym. W układzie unipolarnym tylko z jednej strony uzwojenia znajduje się tranzystor, natomiast w układzie bipolarnym tranzystory muszą być po obu stronach uzwojenia. Układ w gwiazdę jest tańszy, gdyż występuje w nim tylko 5

tranzystorów, pentagon wymaga dziesięciu, a układ 5H aż dwudziestu tranzystorów.

W układzie w gwiazdę końce pasm są złączone ze sobą i przyłączone do ujemnego zacisku źródła napięcia. Początki pasm są elektronicznie złączone z dodatnim zaciskiem źródła. Tranzystory  $T_1 - T_5$  umożliwiają ich załączanie i wyłączanie. Pasma nie są przyłączane do źródła jednocześnie lecz naprzemiennie.

Aby zapewnić rewersję pola magnetycznego można stosować uzwojenie unipolarne z wyprowadzonym punktem środkowym, jednak w tym przypadku w wytwarzaniu strumienia magnetycznego uczestniczy jednocześnie tylko połowa pasma i dlatego moc wyjściowa jest mniejsza przy sterowaniu bipolarnym. Można w przypadku zasilania unipolarnego stosować uzwojenie podwójne ( zwane też „bifilarnym” ), które umożliwia zmianę strumienia magnetycznego.

Pięciopasmowe silniki zasilane w układzie unipolarnym są o 30% gorsze pod względem prędkości i momentu od zasilanych bipolarnie. Włączony w każde z pasm rezystor  $R$  ogranicza czas narastania prądu i umożliwia zwiększenie momentu przy wzroście napięcia, jednak powoduje zmniejszenie sprawności.

W układzie bipolarnym jest zapewniona zmiana zwrotu prądu w pasmie dzięki temu, że każda końcówka pasma uzwojenia jest przyłączona do tranzystora. Chociaż ten sposób zwiększa złożoność układu zasilania, to jednocześnie zwiększa wydajność układu i poprawia sterowanie.

Najczęściej stosowanymi sposobami łączenia pasm uzwojenia pięciopasmowych silników skokowych są dwa rodzaje układów bipolarnych: pentagon i układ 5H.

W układzie pentagon pasma uzwojenia stojana silnika skokowego są połączone szeregowo, tworząc pentagon ( rysunek 25.b. ). Każdy wierzchołek pentagonu jest przyłączony do dwu tranzystorów mocy. Jeden służy do doprowadzania prądu źródła (  $T_1$  na rysunku 25.b. ), drugi zaś do jego odprowadzania (  $T_4$  na rysunku 25.b. ). Prąd w uzwojeniu ma stałą wartość. Ponieważ w układzie występuje 10 tranzystorów w porównaniu z 20 tranzystorami układu 5H, więc prąd tranzystora jest dwukrotnie większy. Układ pentagonalny, podobnie jak układ połączony w gwiazdę, nie zapewnia pracy półskokowej. Jednocześnie mogą być włączone co najmniej 4 pasma uzwojenia.

Praca półskokowa w silnikach pięciopasmowych może być uzyskiwana za pomocą układu 5H ( rysunek 25.c. ). Każde pasmo uzwojenia wraz z tranzystorami tworzy w tym układzie literę H. Dwie pionowe kreski litery H zawierają po dwa tranzystory każda. Poziomą kreskę stanowi pasmo uzwojenia.

Pracę półskokową realizuje się przez włączenie najpierw czterech pasm uzwojenia, a następnie piątego. Podobnie jak w układzie pentagonalnym praca pełnoskokowa wymaga tylko czterech pasm. Zastosowanie czterech pasm do pracy pełnoskokowej silnika pięciopasmowego daje oszczędność poboru mocy

o 20% przy momencie obrotowym wynoszącym ok. 95% wytwarzanego z użyciem pięciu pasm.

Połączenie tranzystorów w układ 5H umożliwia uzyskanie prądu o dowolnym zwrocie, w dowolnym uzwojeniu, w dowolnym czasie, co pozwala w pełni wykorzystać zalety silnika pięciopasmowego. W układzie 5H jest możliwa praca pełnoskokowa, pół-, ćwierć-, oraz 1/8- skokowa bez uciekania się do techniki pracy miniskokowej.

### 3.6. Zjawisko rezonansu w silnikach skokowych.

Jeżeli pominiemy indukcyjności pasm uzwojenia, aby prąd osiągnął swoją nową wartość natychmiast, to równanie dynamiki silnika skokowego możemy zapisać w postaci:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + M_{fr} \operatorname{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = M$$

Charakterystyka silnika  $M = f(\square)$  i moment bezwładności  $J$  określają częstotliwość drgań własnych układu, wokół której, lub jej podwielokrotności, silnik może poruszać się zbyt szybko wprzód lub w tył i opuszczać skoki lub zwiększać ich liczbę.

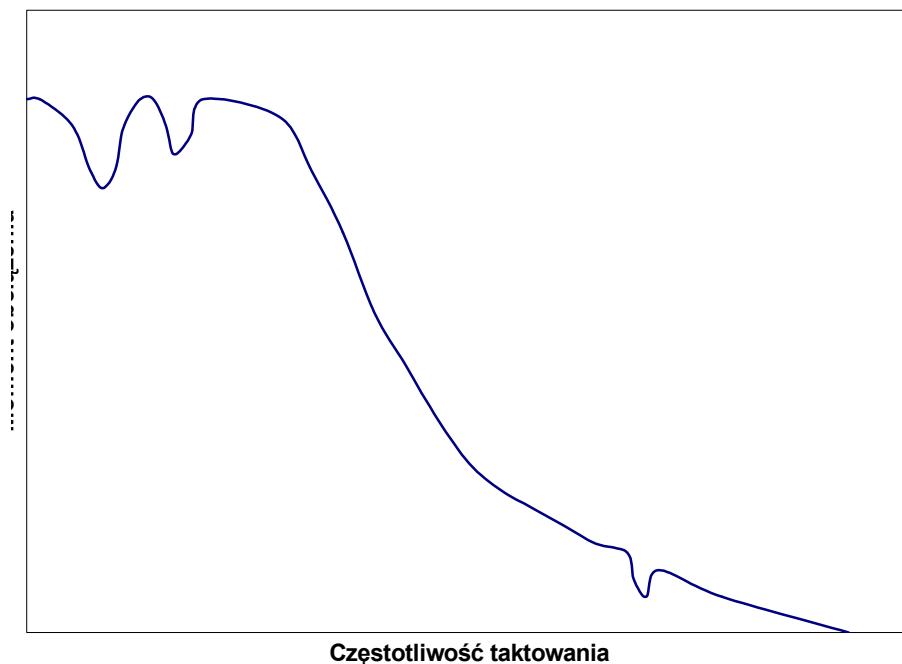
Możliwe strefy niestabilności pracy silnika skokowego pokazano na następnej stronie.

Zjawiska rezonansowe przy niskich częstotliwościach komutacji zachodzą, gdy spełniony jest warunek:

$$\omega = \frac{p}{q} \omega_0$$

gdzie:

- $\square$  - częstość kołowa pierwszej harmoniczej wymuszenia;
- $p, q$  – liczby całkowite nie mające wspólnego podzielnika;
- $\square_0$  – częstość kołowa drgań własnych silnika.



**Rys.26.** Obszary niestabilnej pracy silników skokowych. Pokazany został rezonans wysokoczęstotliwościowy i rezonans harmoniczny – dla niskich częstotliwości.

W przypadku  $\square\square\square$  rezonans nosi nazwę podstawowego, gdy  $\square\square\square_0/q$  ( $p = 1$ ) rezonansu podharmonicznego, a gdy  $\square\square\square_0p$  ( $q = 1$ ) rezonansu parametrycznego. Praca w zakresie częstotliwości rezonansowych, szczególnie w układach bez sprzężenia zwrotnego jest niezalecana, gdyż silnik może wypaść z synchronizmu, zgubić skok i w efekcie zatrzymać się. Wpływ rezonansu na pracę silnika można zredukować stosując obciążenie momentem tarciovym, szczególnie tarcie lepkiem. Silniki o dużym tłumieniu wewnętrznym, a więc silniki z magnesami trwałymi czy hybrydowe, a także silniki o małym skoku w znacznie mniejszym stopniu podlegają zjawiskom rezonansu niż silniki reluktancyjne.

Mechanizm zjawisk dynamicznej niestabilności jest bardzo złożony. Przyczyną tych zjawisk są niskoczęstotliwościowe wahania prędkości obrotowej, które powodują indukowanie prądów w uzwojeniach stojana. Prądy te sumują się z prądami wymuszenia powodując przesuwanie fazy zasilania. Przesunięcie fazy prowadzi do powstania momentu hamującego wirnik w pozycjach, w których powinien on być rozpędzany i rozpędzanie – gdy powinien on być hamowany. Zjawisko to nazywane w literaturze „ujemnym tłumieniem” prowadzi do tak dużego kołysania wirnika, że wypada on z synchronizmu i zatrzymuje się. Powtórne uruchomienie wirnika wymaga zmniejszenia częstotliwości zasilania. Dynamiczna niestabilność występuje głównie przy niedostatecznym tłumieniu mechanicznym.

Również rezonans wysokoczęstotliwościowy, który pojawia się w pracy z często-tliwościami zbliżonymi do maksymalnych, ma przypuszczalnie mechanizm powstania podobny do powodującego niestabilność dynamiczną,

jednak w literaturze żaden z autorów nie wyjaśnia w sposób dostateczny tego zjawiska. Przy małych częstotliwościach taktowania silnika, gdy prąd płynący przez jego uzwojenia ma kształt zbliżony do fali prostokątnej, kołysanie wirnika ma postać tłumionych drgań po wykonaniu każdego skoku. Maksymalna amplituda kołysania jest mniejsza od wartości skoku i pojawia się zaraz po jego wykonaniu.

Przyczyną kołysania wirnika przy dużych częstotliwościach może być:

- zmiana obciążenia ( szczególnie skokowa );
- zmiana częstotliwości komutacji pasm.

#### **IV. Zastosowanie silników krokowych.**

##### **4.1. Porównanie napędów z silnikami krokowymi z innymi rodzajami napędów elektrycznych.**

###### **4.1.1. Silnik skokowy w układzie otwartym.**

Do głównych zalet zastosowania silników skokowych w napędzie, w porównaniu z serwonapędem prądu stałego, uważa się:

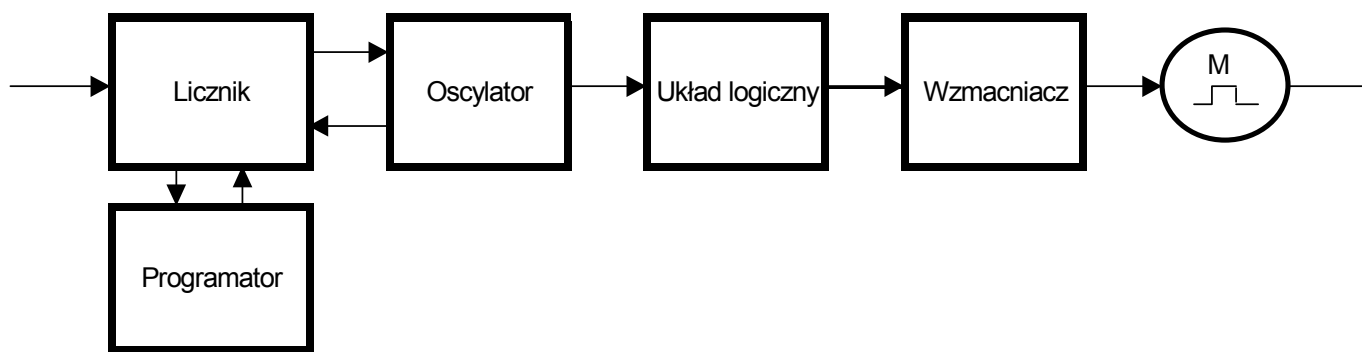
- niewystępowanie sprzężenia zwrotnego;
- możliwość realizowania bardzo małych przemieszczeń ( jeden skok na dobę bez zastosowania przekładni mechanicznej );
- możliwość prostej synchronizacji wirowania kilku silników skokowych;
- duża niezawodność;
- niska cena.

Rzeczą godną uwagi jest fakt, że silnik skokowy w układzie otwartym zastępuje system złożony z silnika wykonawczego, wzmacniacza, prądnicy tachometrycznej i przekładni. Ma on ponadto mniejszy prąd rozruchowy i charakteryzuje się łatwością zastosowania w układach cyfrowych.

Niestety silnik krokowy posiada też szereg wad, do których należy:

- możliwość wypadania z synchronizmu;
- mniejsza prędkość maksymalna;
- możliwość występowania stref rezonansowych częstotliwości sterowania;
- oscylacje powstające w końcu skoku;
- mniejsza sprawność, większe wymiary, wyższy poziom hałasu oraz gorsze wskaźniki dynamiczne w porównaniu z silnikami prądu stałego i silnikami indukcyjnymi prądu przemiennego;
- duża wrażliwość na zmiany momentu bezwładności momentu obciążenia, którego wzrost może spowodować przeregulowanie, zwiększenie stałej czasowej i zmniejszenie maksymalnej częstotliwości.

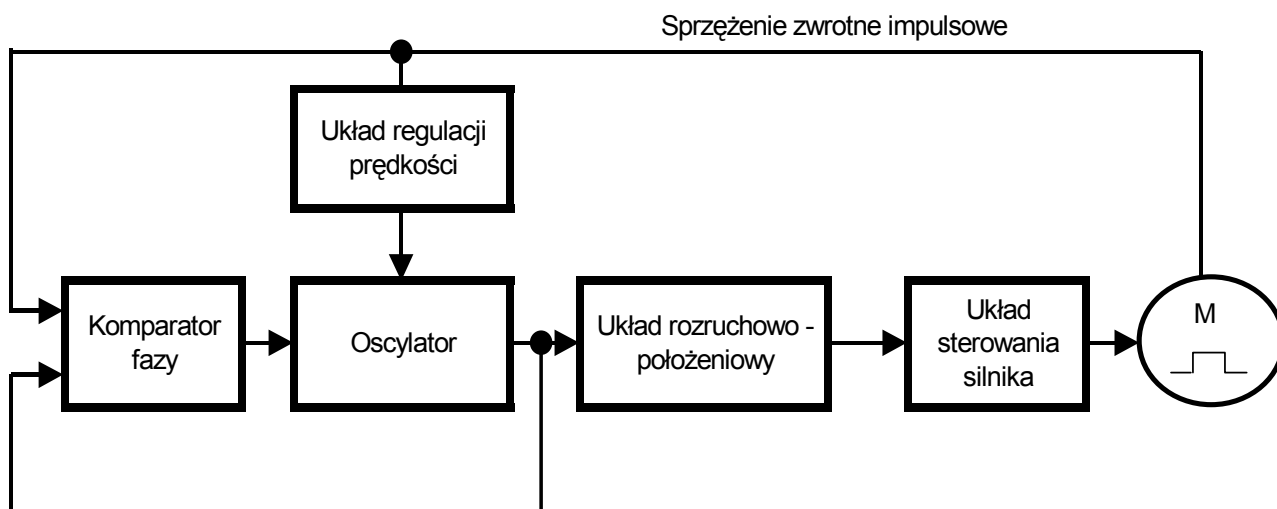
Poniżej przedstawiono schemat silnika skokowego w układzie otwartym.



#### 4.1.2. Silnik skokowy w układzie zamkniętym.

Silniki skokowe w układzie zamkniętym rozpatrywane są ze względu na gorsze właściwości dynamiczne silników skokowych w układzie otwartym w porównaniu z silnikami prądu stałego i indukcyjnymi.

Schemat silnika skokowego w układzie zamkniętym przedstawiono poniżej.



Dlatego też należy brać pod uwagę jego pracę w układzie zamkniętym, w którym jego właściwości dynamiczne są porównywalne z właściwościami serwonapędów prądu stałego i asynchronicznych prądu przemiennego.

Układ przedstawiony powyżej jest tylko jedną z kilku możliwości zastosowania silników skokowych w układzie zamkniętym. Zasada działania jest następująca: gdy ciąg impulsów jest przekazany do silnika skokowego, wówczas impulsy sprzężenia zwrotnego są porównywane w komparatorze fazy z impulsami z oscylatora. Dzięki temu oscylator jest sterowany w ten sposób, że jego sygnał wyjściowy jest przesunięty w fazie w stosunku do impulsów silnika,



przy czym nie może to spowodować opuszczania skoków. Po osiągnięciu przez silnik swojej końcowej prędkości układ regulacji prędkości powoduje odłączenie sprzężenia zwrotnego od oscylatora i silnik pracuje ze stałą częstotliwością wejściową.

Zaletą tego układu jest jego przydatność w urządzeniach ze sterowaniem numerycznym, gdyż silnik skokowy jest typowym siłownikiem cyfrowym.

## *4.2. Przykłady zastosowań silników skokowych*

### 4.2.1. Napędy obrabiarek.

Silniki skokowe znalazły szerokie zastosowanie w napędach obrabiarek do dokładnej, automatycznej obróbki metali, w tym obrabiarek sterowanych numerycznie.

W napędach posuwów obrabiarek sterowanych numerycznie znalazły zastosowanie dwa rodzaje silników krokowych:

- a) silniki wysokomomentowe, przeznaczone do bezpośredniego napędu śruby;
- b) silniki niskomomentowe, stosowane do napędu lekkich sań lub stołów obrotowych z małą prędkością posuwu.

### 4.2.2. Napędy urządzeń do pisania.

Do grupy urządzeń piszących, w których stosuje się silniki skokowe, należą elektryczne maszyny do pisania, drukarki komputerów oraz plotery.

### 4.2.3. Napędy reaktorów jądrowych.

Do podstawowych układów napędowych reaktorów jądrowych należą układy sterowania i zabezpieczeń awaryjnych. Sterowanie przebiegiem reakcji w reaktorze odbywa się za pomocą prętów regulacyjnych, wykonanych z materiału silnie pochłaniającego neutrony, które są wsuwane lub wysuwane z rdzenia. Ruch prętów pochłaniających odbywa się dzięki elementom wykonawczym serwonapędów – silnikom elektrycznym, sterowanym automatycznie, wśród których znaczące miejsce mają silniki skokowe. Są to silniki skokowe w układzie otwartym zapewniające prostotę sterowania.

O zastosowaniu silników skokowych w reaktorach jądrowych decyduje między innymi to, że przy ich zastosowaniu zmniejsza się liczba przekładni zębatych, stosunkowo łatwo je wykonać o budowie hermetycznej, pracują one przy małej prędkości obrotowej, nie wymagają specjalnych łożysk.

Innym zastosowaniem silnika skokowego w reaktorach jądrowych jest napęd prętów bezpieczeństwa ( pochłaniających neutrony ) w zabezpieczeniach awaryjnych. Ze względu na dużą liczbę prętów bezpieczeństwa jeden napęd służy do sterowania kilkoma złączonymi mechanicznie prętami. Taka grupa prętów, której masa może wynosić

kilkadziesiąt kilogramów, powinna być w razie awarii wprowadzona możliwie krótkim czasie.

w

#### 4.2.4. Napędy skokowe skanerów termalnych.

Termowizja umożliwia rozszerzenie naszego widzenia, czyniąc widzialnym promieniowanie cieplne nagranych obiektów. Poza zakresem światła widzialnego wzrok nie jest czuły (  $0,4 - 0,7 \mu\text{m}$  ). Konieczny jest przyrząd do przetwarzania promieniowanej energii na obraz, podobnie jak to czyni oko w dzień.

Urządzenia służące do przetwarzania obrazu są wyposażone w ruchome zwierciadła, których napęd wymaga zastosowania specjalnych układów i silników, w tym również skokowych. Zwierciadła są elementami urządzenia zwanego skanerem, które służy do przemieszczania obrazu wytworzonego przez układ optyczny.

#### 4.2.5. Silniki krokowe w technice pomiarowej.

Zakres zastosowań silników krokowych w technice pomiarowej jest bardzo szeroki. Jednak głównie sprowadza się jego rolę do napędów elementów odpowiedzialnych za dokładne pozycjonowanie elementów pomiarowych względem obiektu pomiarowego ( lub na odwrót ).

Poza przypadkami omówionymi powyżej istnieje jeszcze cały szereg działów, w których silniki krokowe znalazły zastosowanie, jednak ze względu na charakter tej pracy nie będą one tutaj dokładniej omawiane.

### ***V. Badanie silników skokowych.***

#### *5.1. Mierzone wielkości charakterystyczne silników skokowych.*

Silnik skokowy jest specjalnym rodzajem maszyny elektrycznej i dlatego do jego badania nie wystarczy zastosowanie ogólnie znanych metod badania maszyn elektrycznych, w tym również mikromaszyn. W trakcie badań silników skokowych dokonuje się pomiarów różnych wielkości charakterystycznych ( parametrów ), a także ich funkcji, czyli charakterystyk. Rozróżniamy wielkości i charakterystyki statyczne i dynamiczne.

Do wielkości statycznych silników skokowych zaliczają się:

- maksymalny statyczny moment synchronizujący  $M_{st\ m}$  przy danym prądzie pasma, tj. maksymalny moment wytwarzany przez silnik przy znamionowym napięciu zasilania, znamionowym cyklu komutacji oraz częstotliwości przełączania równej zero;

- znamionowy kąt skoku  $\alpha_s$  silnika jako zadana wielkość konstrukcyjna, tj. wartość kąta pojedynczego skoku silnika przy znamionowym cyklu komutacji;
- błąd statyczny skoku  $\Delta\alpha_s$  przy zadanym prądzie pasma i jedno- lub dwupasmowym zasilaniu, tj. różnica pomiędzy pomierzoną a znamionową wartością skoku silnika.

Do wielkości dynamicznych silników skokowych zaliczają się:

- maksymalna częstotliwość rozruchu  $f_{r\max}$  przy zadanym obciążeniu;
- częstotliwość graniczna pracy  $f_g$  przy zadanym układzie połączeń;
- maksymalna częstotliwość nawrotu  $f_n$ ;
- amplituda przeregulowań wirnika  $a_o$  przy zadanym obciążeniu, układzie połączeń i okresie drgań;
- odchyłka wartości szczytowej „a” od pożądanego położenia kąowego, przy zadanym obciążeniu, układzie połączeń i czasie.

Ponadto określa się różne wielkości pomocnicze, jak np. moment bezwładności wirnika  $J_r$ ; średnia impedancja pasma uzwojenia  $Z_{sr}$ ; średnia elektromagnetyczna stała czasowa pasma  $T_{sr}$ .

Najistotniejszymi charakterystykami silników skokowych są:

- moment obrotowy w funkcji częstotliwości – charakterystyka mechaniczna;
- zależność momentu statycznego w funkcji prądu pasma  $M_{st}=f(I)$ ;
- częstotliwość rozruchu w funkcji prądu obciążenia  $f_r=f(I_l)$ .

## 5.2. Doświadczalne określanie wielkości i charakterystyk statycznych.

### 5.2.1. Charakterystyka kątowa statycznego momentu synchronizującego $M_{st}=f(\alpha)$ .

Jedną z najważniejszych charakterystyk, użyteczną przy projektowaniu silników krokowych jest zależność  $M_{st}=f(\alpha)$ , zwana charakterystyką kątową momentu synchronizującego. Od przebiegu tej charakterystyki zależy nie tylko obciążalność silnika i jego stabilność, lecz również zdolność do precyzyjnego odtwarzania zadanego programu ruchu. Charakterystyka ta nie może być uzyskana z dużą dokładnością na podstawie obliczeń analitycznych. Jej przebieg zależy od konstrukcji samego silnika, jego stanu elektrycznego, tzn. od liczby jednocześnie wzbudzanych pasm, wartości prądów w pasmach, nasycenia magnetowidu. Dlatego też najlepszym wyjściem jest eksperymentalne zdjęcie charakterystyki.

### 5.2.2. Określenie błędu statycznego skoku $\Delta\alpha_s$ silnika.

Zgodnie z normą błąd statyczny skoku silnika nie powinien przekraczać:

- przy skoku znamionowym do  $45^\circ$  --  $\pm 20\%$  wartości znamionowej skoku;
- przy skoku znamionowym do  $5^\circ$  --  $\pm 5\%$  wartości znamionowej skoku;

- przy skoku znamionowym ponad  $5^{\circ}$  do  $15^{\circ}$  --  $\pm 3\%$  wartości znamionowej skoku;
- przy skoku znamionowym ponad  $15^{\circ}$  --  $\pm 2\%$  wartości znamionowej skoku.

Określenie błędu statycznego skoku wykonuje się z zastosowaniem podzielnicy optycznej, wyposażonej w uchwyt mocujący silnik skokowy. Jako wskaźnik położenia wału silnika stosuje się przetwornik położenia kąowego.

Po zamocowaniu silnika w uchwycie podzielnicy optycznej należy obracając jej głowicę, znaleźć zero napięcia wyjściowego z przetwornika położenia kąowego. Następnie przełącza się uzwojenie silnika w taki sposób, aby wykonał on jeden skok i znajduje się najbliższe nowe położenie głowicy podzielnicy optycznej odpowiadające zeru napięcia wyjściowego z przetwornika położenia kąowego. Różnica położzeń głowicy podzielnicy optycznej, odczytana z jej skali, daje wartość skoku silnika. Pomiar wykonuje się dla kolejnych skoków tyle razy, ile wynosi liczba skoków przypadająca na jeden pełny obrót silnika. Wyniki pomiaru przedstawia się graficznie, odkładając na osi rzędnych błąd bezwzględny, tzn. różnicę między skokiem znamionowym a zmierzonym, a na osi odciętych – numery kolejnych skoków.

### 5.2.3. Wyznaczenie charakterystyki $M_{st\ max} = f(I)$ .

Maksymalny moment statyczny wzrasta ze wzrostem prądu. Porównując ze sobą dwa rodzaje silników, a mianowicie silnik reluktancyjny i hybrydowy można stwierdzić co następuje.

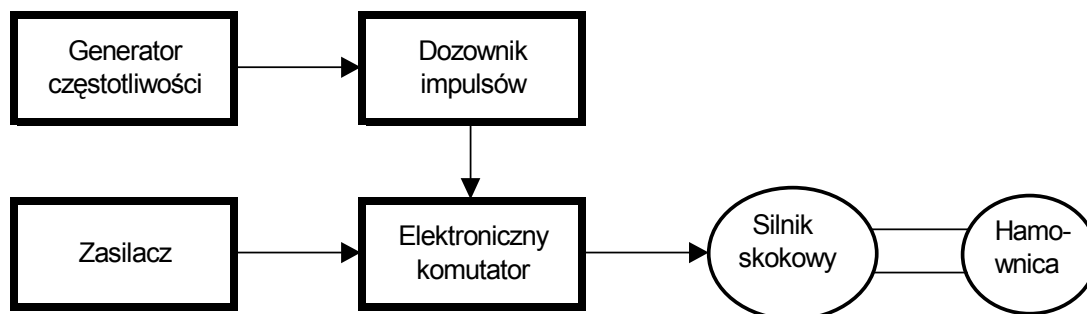
W przypadku silnika reluktancyjnego, przy braku wzbudzenia moment jest równy zeru, a przy małych wartościach prądu wzrasta parabolicznie. Natomiast przy dużych wartościach prądu szybkość narastania momentu nie jest duża w związku z nasyceniem obwodu magnetycznego.

W silniku hybrydowym ( lub o magnesach trwałych ) moment występuje nawet przy braku wzbudzenia. Jest to moment ustalający położenie wirnika. Zarówno charakterystyka silnika hybrydowego jak i o magnesach trwałych jest zbliżona do liniowej.

## *5.3. Wyznaczenie wielkości i charakterystyk dynamicznych.*

### 5.3.1. Wyznaczenie charakterystyk rozruchowych $M_l = f(f_{r\ max})$ .

Charakterystykami rozruchowymi są zależności momentu oporu obciążenia przy różnych częstotliwościach, przy których silnik może ruszać i zatrzymywać się bez utraty synchronizmu. Charakterystyki rozruchowe zdejmuje się w układzie pokazanym na rysunku poniżej.



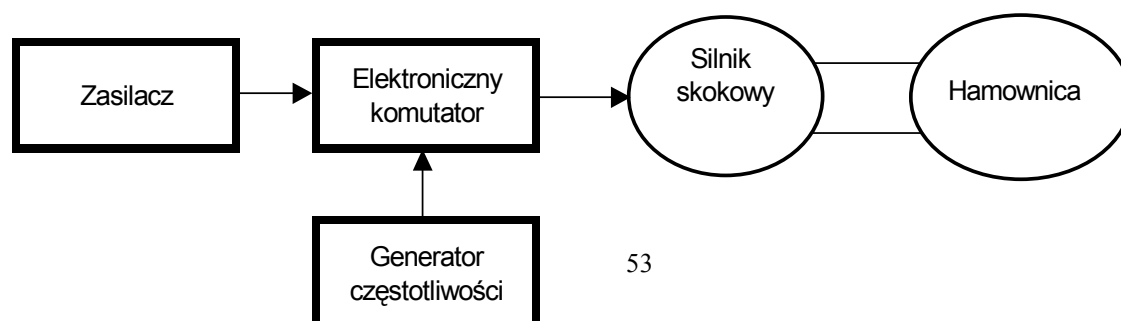
Silnik umocowany na wale kółkiem zamachowym o momencie bezwładności równym znamionowemu momentu bezwładności obciążenia należy umieścić w hamownicy, imitującej suche tarcie. Silnik włącza się do źródła prądu stałego za pośrednictwem komutatora elektronicznego, sterowanego z generatora częstotliwości poprzez dozownik impulsów.

Na dozowniku impulsów należy nastawić serię impulsów odpowiadających wielokrotności obrotu wału silnika, a następnie załączyć generator częstotliwości. Wirnik silnika, po wykonaniu nastawionej liczby obrotów powinien zatrzymać się w pozycji wyjściowej. Nastawiając na hamownicy określone obciążenie i zmieniając nastawienie generatora częstotliwości, należy znaleźć odpowiadające danym obciążeniom największe częstotliwości następowania impulsów sterujących, przy których wirnik silnika wraca jeszcze do położenia wyjściowego.

Próby powtarza się dla obu kierunków wirowania, przy czym każdy rozruch należy zaczynać przy innej kombinacji zasilania pasm uzwojeń aż do wyczerpania wszystkich stanów w nominalnym cyklu komutacji. Na podstawie otrzymanych wyników wykreśla się charakterystykę  $M_l = f(f_{r \max})$  przy momencie bezwładności  $J = J_n = \text{const}$ . Zmieniając moment bezwładności obciążenia można uzyskać rodzinę charakterystyk.

### 5.3.2. Wyznaczenie charakterystyki granicznej $M_l = f(f_g)$ .

Do wyznaczenia charakterystyki służy układ przedstawiony poniżej.



Na wale silnika badanego umieszcza się koło zamachowe o momencie bezwładności zalecanym przez odpowiednią normę. Bezwładność ta wynosi 0,5 momentu bezwładności wirnika. Silnik obciąża się hamownicą imitującą suche tarcie, i przyłącza się do źródła prądu za pośrednictwem komutatora elektronicznego sterowanego z generatora częstotliwości.

Po nastawieniu częstotliwości generatora o wartości mniejszej od maksymalnej częstotliwości rozruchowej silnik załącza się. Następnie silnik obciąża się, a częstotliwości generatora zadającego zwiększa w sposób płynny tak długo, aż silnik wypadnie z synchronizmu i zatrzyma się. Największa częstotliwość następowania impulsów sterujących, przy której silnik nie wypada jeszcze z synchronizmu, jest właśnie wyznaczoną częstotliwością graniczną przy danym obciążeniu. Pomiary powtarza się zwiększając stopniowo obciążenie.

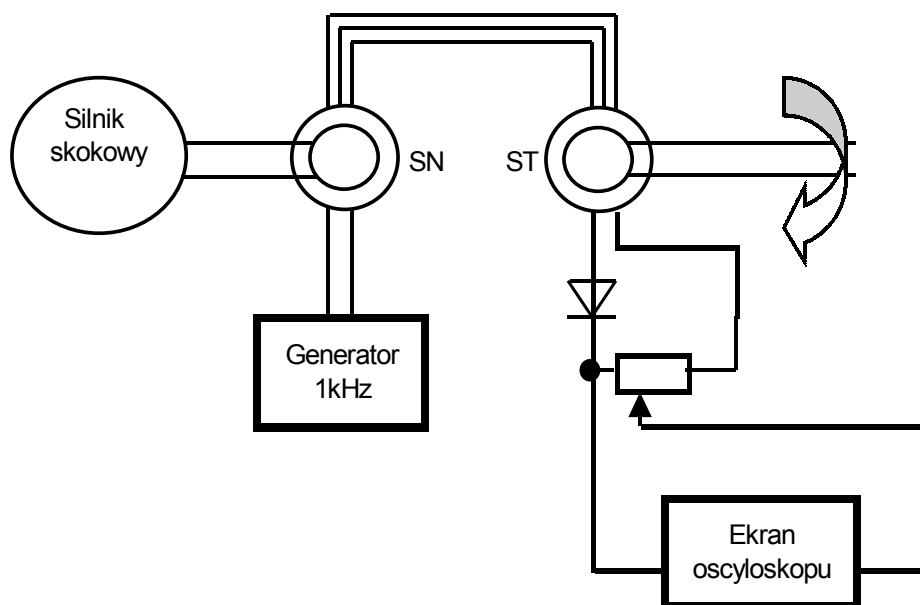
#### 5.3.3. Wyznaczanie charakterystyki nawrotu.

Pomiary wykonuje się tak samo, jak przy wyznaczaniu charakterystyki rozruchowej, z tym tylko, że na dozowniku impulsów o dwu torach wyjściowych nastawia się dwie serie impulsów dla obu kierunków wirowania. Liczby impulsów w obu seriach powinny być jednakowe. Po rozruchu i odwzorowaniu pierwszej serii impulsów, wirnik silnika zmienia kierunek ruchu i odwzorowuje drugą serię impulsów, wracając do położenia wyjściowego.

Wyznacza się rodzinę charakterystyk, przy czym każdy rozruch należy zaczynać przy innej kombinacji załączonych pasm uzwojeń, wynikającej ze znamionowego cyklu komutacji. Dla każdego stanu wyznacza się dwie charakterystyki: jedną przy rozruchu w prawo, drugą przy rozruchu w lewo. Za wartość maksymalnej częstotliwości nawrotu przyjmuje się najmniejszą spośród wartości otrzymanych ze wszystkich charakterystyk.

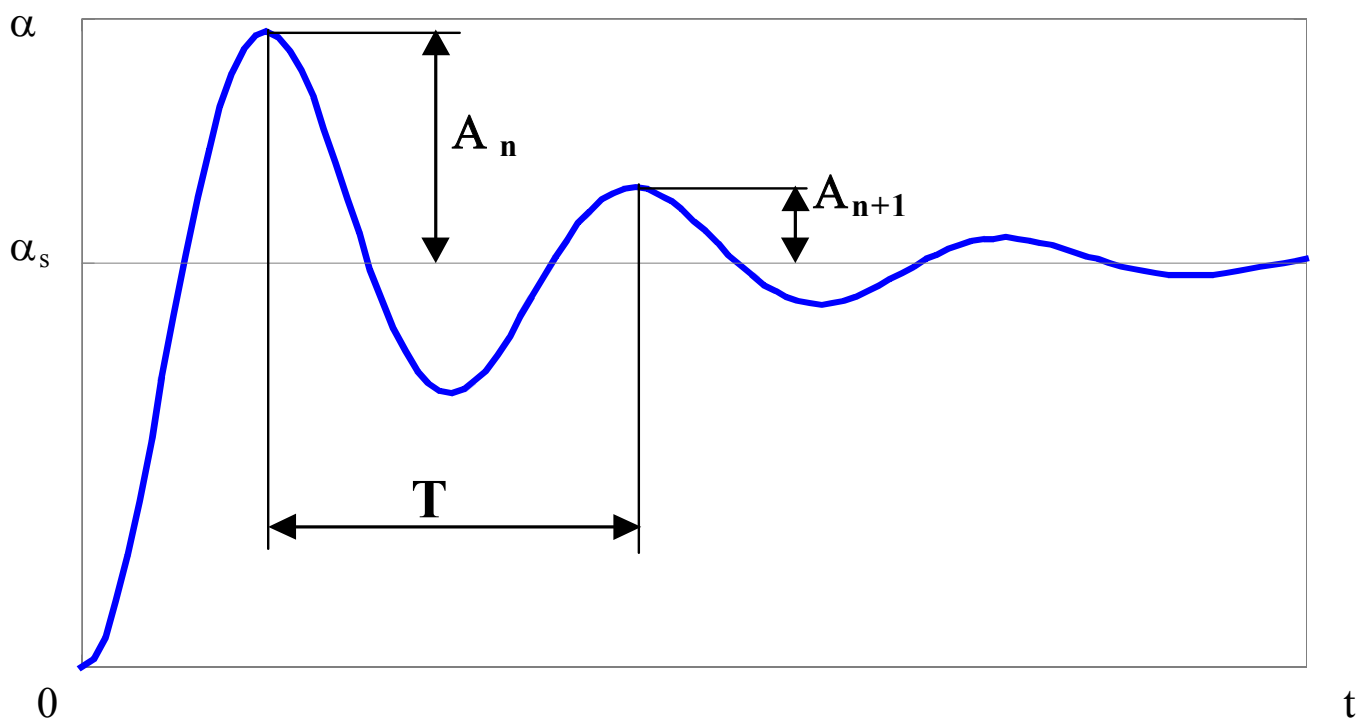
#### 5.3.4. Wyznaczanie odpowiedzi silnika na skok jednostkowy.

Ten typ pomiarów ma duże znaczenie praktyczne, gdyż na podstawie otrzymanego przebiegu można wyznaczyć amplitudy przeregulowań wirnika, logarytmiczny dekrement tłumienia oraz częstotliwość kątową drgań własnych (tłumionych i nietłumionych). Jeden z możliwych układów pomiarowych do wyznaczania odpowiedzi silnika skokowego na skok jednostkowy przedstawiono na rysunku poniżej.



Działanie układu jest następujące: wał silnika badanego jest sprzęgnięty na sztywno z wałem selsyna nadawczego SN – selsynowego łącza transformatorowego. Pożądane jest by wirnik selsyna nadawczego miał możliwie najmniejszą bezwładność. Trójfazowe uzwojenie stojana selsyna nadawczego jest połączone z trójfazowym uzwojeniem pierwotnym selsyna transformatorowego. Uzwojenie wtórne selsyna transformatorowego jest przyłączone poprzez prostownik i potencjometr do oscyloskopu. Uzwojenie wzbudzenia selsyna nadawczego jest zasilane ze źródła o częstotliwości około 1 kHz.

Po zasileniu jednego z pasm uzwojenia silnika badanego impulsem prądowym wał silnika przemieści się o jeden skok, a przebieg tego przemieszczenia w funkcji czasu odbywa się na ekranie oscyloskopu. Na podstawie oscylogramu można odczytać amplitudę przeregulowania  $\alpha_0$  oraz odchylenia wartości szczytowych przeregulowań położenia skokowego w stosunku do wartości żądanej kąta skoku  $\alpha_s$ .



Logarytmiczny dekrement tłumienia określa się na podstawie stosunku dwóch sąsiednich amplitud kołysań wokół położenia równowagi, ze wzoru:

$$\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$$

Gdzie  $A_n$  i  $A_{n+1}$  są rzędnymi dwóch sąsiednich ekstremów przebiegu oscylacyjnego, tak jak to pokazano na wykresie powyżej.

Odczytując okres oscylacji  $T$ , oblicza się częstotliwość kątową drgań własnych tłumionych jako:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Częstotliwość kątową drgań własnych nietłumionych można obliczyć ze korzystając z poniższego wzoru:

$$\omega_n^2 = \omega^2 + \xi^2$$

Gdzie  $\xi$  jest dekrementem tłumienia układu, związanym z logarytmicznym dekrementem tłumienia zależnością:

$$\xi = \frac{\delta\omega}{\pi}$$



Posługując się dwoma powyższymi wzorami uzyskuje się wyrażenie na częstotliwość kątową drgań własnych nietłumionych:

#### 5.4. Wyznaczanie wielkości pomocniczych.

$$\omega_n = \omega \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{\pi^2}}$$

Przy rozpatrywaniu zagadnień dynamiki silników skokowych istotne znaczenie ma doświadczalne określenie *momentu bezwładności wirnika*. W celu wyznaczenia momentu bezwładności wirnik musi być wymontowany z korpusu silnika i zawieszony na drucie z brązu fosforowego o znanej stałej sprężystości na skręcanie  $k_s$ . Tak zawieszony wirnik wprowadza się w drgania skrętne wokół osi podłużnej a następnie mierzy się okres drgań  $T$  wirnika ( wyrażony w sekundach ). Moment bezwładności (  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$  ) oblicza się ze wzoru:

$$J = k_s \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (W - 7)$$

gdzie  $k_s$  – stała sprężystości na skręcanie,  $\text{Nm/rad}$ .

Jeżeli nie jest znana wartość  $k_s$  zastosowanego drutu, to mierzy się okres drgań bryły o znanym momencie bezwładności i moment bezwładności wirnika wyznacza się wówczas ze wzoru;

$$\frac{T^2}{J} = \frac{T_0^2}{J_0}$$

gdzie:

$J_0$  – moment bezwładności bryły wzorcowej względem osi podłużnej;

$T_0$  – okres drgań bryły wzorcowej.

Zatem moment bezwładności wirnika silnika skokowego wynosi:

$$J = \left( \frac{T}{T_0} \right)^2 J_0$$

W przypadku gdy zachodzą trudności z wymontowaniem wirnika, moment bezwładności wyznacza się metodą przybliżoną. Na wał silnika nakłada się tuleję sprężystą o znanej stałej sprężystości na skręcanie, którą mocuje się w odpowiednim uchwycie. Po wychyleniu wirnika z położenia równowagi, zdejmuje się przyłożony moment wychylający i mierzy okres drgań. Moment bezwładności oblicza się ze wzoru ( W- 7 ).

Spośród parametrów elektrycznych ważne jest wyznaczenie *impedancji własnej pasm uzwojenia*. W celu wyznaczenia impedancji wirnik sprzęga się mechanicznie z samohamowną przekładnią ślimakową, za pomocą której można ustawić wirnik w pożądanym położeniu. Pasma uzwojenia zasilane napięciem sinusoidalnie zmiennym o wartości skutecznej równej 0,7 wartości napięcia na paśmie uzwojenia, pochodzącym ze źródła o małej rezystancji wewnętrznej i częstotliwości 50 Hz. Pomiary wykonuje się dla dwóch położzeń wirnika, odpowiadającym minimum ( oś d ) i maksimum ( oś q ) reluktancji.

Mierząc napięcie i prąd pasma oblicza się impedancję w osi podłużnej ( d ).

$$Z_d = U_d / I_d$$

i poprzecznej

$$Z_q = U_q / I_q$$

Impedancję średnią pasma oblicza się ze wzoru:

$$Z_{sr} = 0.5( Z_d + Z_q )$$

Pomiary impedancji wykonuje się dla wszystkich pasm uzwojenia silnika skokowego. Wyznaczona tym sposobem średnia impedancja własna pasm uzwojenia nie uwzględnia nasycenia obwodu magnetycznego silnika.

Średnią elektromagnetyczną stałą czasową pasma uzwojenia silnika skokowego wyznacza się – podobnie jak w przypadku innych rodzajów maszyn elektrycznych – na podstawie oscylogramu narastania prądu w paśmie załączonym na znamionowe napięcie stałe. Wirnik silnika jest unieruchomiony za pomocą samohamownej przekładni ślimakowej, tak aby można było dokonać pomiarów w dwóch położeniach wirnika ( w osi d i q ).

Ze zdjętego oscylogramu odczytuje się czas, po którym wartość prądu w badanym paśmie osiąga 0,632 wartości ustalonej, co wynika ze wzoru:

$$u(t) = U_k (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

gdzie  $U_k$  jest napięciem końcowym ( ustalonym ).

Po podstawieniu:

$$u(t) = U_k (1 - 2,718^{-1}) = U_k (1 - 0,638) = 0,632 U_k$$

Średnią z dwu położzeń wirnika elektromagnetycznego stałą czasową pasma uzwojenia silnika skokowego oblicza się ze wzoru:

$$T_{sr} = 0,5( T_d + T_q )$$



# SPIS TREŚCI



I. Cel ćwiczenia	
II. Wstęp teoretyczny	
1. Wiadomości ogólne	1
2. Klasyfikacja silników krokowych	3
2.1. Silnik skokowy o wirniku reluktancyjnym	3
2.2. Silnik skokowy o magnesach trwałych	7
2.3. Hybrydowy silnik skokowy	10
2.4. Liniowy silnik skokowy	13
III. Teoria silnika skokowego	
3.1. Stany pracy silnika skokowego	15
3.2. Analiza dynamiczna silnika skokowego	16
3.3. Ograniczenie oscylacji silników skokowych	29
3.4. Sterowanie silników skokowych	33
3.5. Uzwojenia silników skokowych	38
3.6. Zjawisko rezonansu w silnikach skokowych	43
IV. Zastosowanie silników krokowych	
4.1. Porównanie napędów z silnikami skokowymi z innymi rodzajami napędów elektrycznych	45
4.2. Przykłady zastosowań silników skokowych	47
V. Badanie silników skokowych	
5.1. Mierzone wielkości charakterystyczne silników skokowych	49
5.2. Doświadczalne określenie wielkości i charakterystyk statycznych	49
5.3. Wyznaczenie wielkości i charakterystyk dynamicznych	51