

Badanie silnika synchronicznego o magnesach trwałych

Permasyny - silniki synchroniczne małej mocy mające na wirniku zamiast wzbudzenia elektromagnetycznego wzbudzenie magnetyczne od magnesów trwałych.

Silnikiem synchronicznym nazywa się maszynę elektryczną prądu przemiennego, której wirnik w stanie ustalonym wiruje z prędkością średnią równą prędkości pola magnetycznego, tzn. z prędkością kątową $\omega_1 = \frac{2\pi f}{p}$ lub z odpowiadającej jej prędkością obrotową $n_1 = \frac{60f}{p}$, gdzie f - częstotliwość sieci zasilającej.

Spośród dużej liczby odmian silników synchronicznych małej mocy można wyodrębnić dwie zasadnicze grupy:

- silniki o polu wirującym, z uzwojeniem stojana wielopasmowym, przede wszystkim na duże prędkości obrotowe, ale także reduktorowe i o wirniku toczącym się – te ostatnie redukujące prędkość obrotową wału wyjściowego bez reduktora mechanicznego;
- silniki o polu oscylacyjnym, z uzwojeniem jednopasmowym, zasilane jednofazowo, na małe prędkości obrotowe (najczęściej na $p = 8 - 12$).

Według kryterium rozruchu (silnik synchroniczny rozwija różny od zera średni moment obrotowy tylko przy prędkości synchronicznej), rozróżnia się silniki: o rozruchu własnym (indukcyjnym, histerezyowym, a w silnikach wolnoobrotowych – magnetomechanicznym) i o rozruchu częstotliwościowym, przy czym ten ostatni, wraz z rozwojem układów elektronicznych, jest coraz częściej wykorzystywany.

Rozruchy częstotliwościowy i histerezyowy są płynne – silnik w procesie rozruchu albo cały czas biegnie synchronicznie z coraz szybciej wirującym polem, albo jest wprowadzany w synchronizm łagodnie (moment histerezyowy jest stały i ma tę samą wartość zarówno w zakresie pracy asynchronicznej, jak i synchronicznej). Natomiast przy rozruchu indukcyjnym następuje mniej lub bardziej gwałtowny proces wpadu w synchronizm, polegający na przyśpieszeniu wirnika, pod działaniem momentu synchronicznego, od prędkości podsynchronicznej do synchronicznej.

Z punktu widzenia zasady działania są to silniki wykorzystujące:

- **moment synchroniczny wzbudzeniowy**, przy czym ich magnesnice to z reguły układy magnesów trwałych,
- **moment synchroniczny reluktancyjny**, powstający w wyniku zamierzonej asymetrii układu magnetycznego silnika,
- **moment histerezyowy**, którego źródłem jest opóźnienie (wskutek tarcia molekularnego) obrotu domen magnetycznych magnetowodu wirnika w stosunku do obrotu osi magnetycznej strumienia wywołanego prądami uzwojenia stojana.

Ze względu na wspólną cechę omawianych silników, poszukiwaną w wielu zastosowaniach, a mianowicie sztywność charakterystyki mechanicznej $n = f(T)$ oraz stworzoną od niedawna przez tanie układy elektroniczne łatwość częstotliwościowego – w tym przez zmianę szerokości impulsów, PWM (ang. Pulse Width Modulation), napięcia zasilania – sterowania prędkości, mamy do czynienia z burzliwym rozwojem mikrosilników synchronicznych. W dodatku, przy zasilaniu uzwojenia silnika synchronicznego impulsami prądu stałego, można wytworzyć pole magnetyczne, którego położenie w przestrzeni zmienia się dyskretnie. Pociąga to za sobą skokowy ruch wirnika. Tak zasilane i sterowane silniki synchroniczne noszą nazwę *skokowych*.

Podstawowe momenty elektromagnetyczne małych silników synchronicznych

W silnikach małej mocy nie można pomijać rezystancji uzwojenia twornika w wyrażeniach na moment elektromagnetyczny gdyż, w odróżnieniu od maszyn synchronicznych dużych mocy, wartość jej stosunku do reaktancji synchronicznej jest znacząca i tym większa im mniejsza jest maszyna. Zakładając, że strumień magnesnicy (pochodzący w mikromaszynach od magnesów trwałych) jest niezależny od strumienia reakcji twornika (założenie całkowicie usprawiedliwione w

odniesieniu do nowoczesnych magnesów o bardzo dużych natężeniach powściąających indukcji), można, napisać następujące wyrażenie opisujące moment elektromagnetyczny rozwijany przez maszynę synchroniczną o stałym wzbudzeniu i asymetrii magnetycznej.

$$T = \frac{m}{\omega_s} \left\{ -R \left[E^2 \frac{R^2 + X_q^2}{Z} + \frac{U^2 (X_d - X_q)^2}{2Z} \right] - \right. \\ \left. - UE \left[R \frac{X_q (X_d - X_q) - (R^2 + X_q^2)}{Z} \cos \beta - \frac{R^2 (X_d - X_q) + X_d (R^2 + X_q^2)}{Z} \sin \beta \right] + \right. \\ \left. + U^2 \left[R \frac{X_d^2 - X_q^2}{2Z} \cos 2\beta + \frac{(X_d - X_q)(X_d X_q - R^2)}{2Z} \sin 2\beta \right] \right\}$$

X_d – reaktancja synchroniczna w osi podłużnej

X_q – reaktancja synchroniczna w osi poprzecznej

R – rezystancja uzwojenia twornika

E – napięcie indukowane w uzwojeniu twornika

m – liczba faz

W silnikach (cylindrycznych) o biegunach utajonych przy pominięciu R i $X_q = X_d$:

$$\text{moment } T = \frac{m}{\omega_s} \frac{UE}{X_d} \sin \beta$$

W silnikach jawnobiegunowych, w których $X_q \neq X_d$ i przy pominięciu R

$$\text{moment } T = \frac{m}{\omega_s} \left\{ \frac{UE}{X_d} \sin \beta + \frac{U^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\beta \right\}$$

W silnikach reluktancyjnych w których $X_q \neq X_d$, $E = 0$ i przy pominięciu R

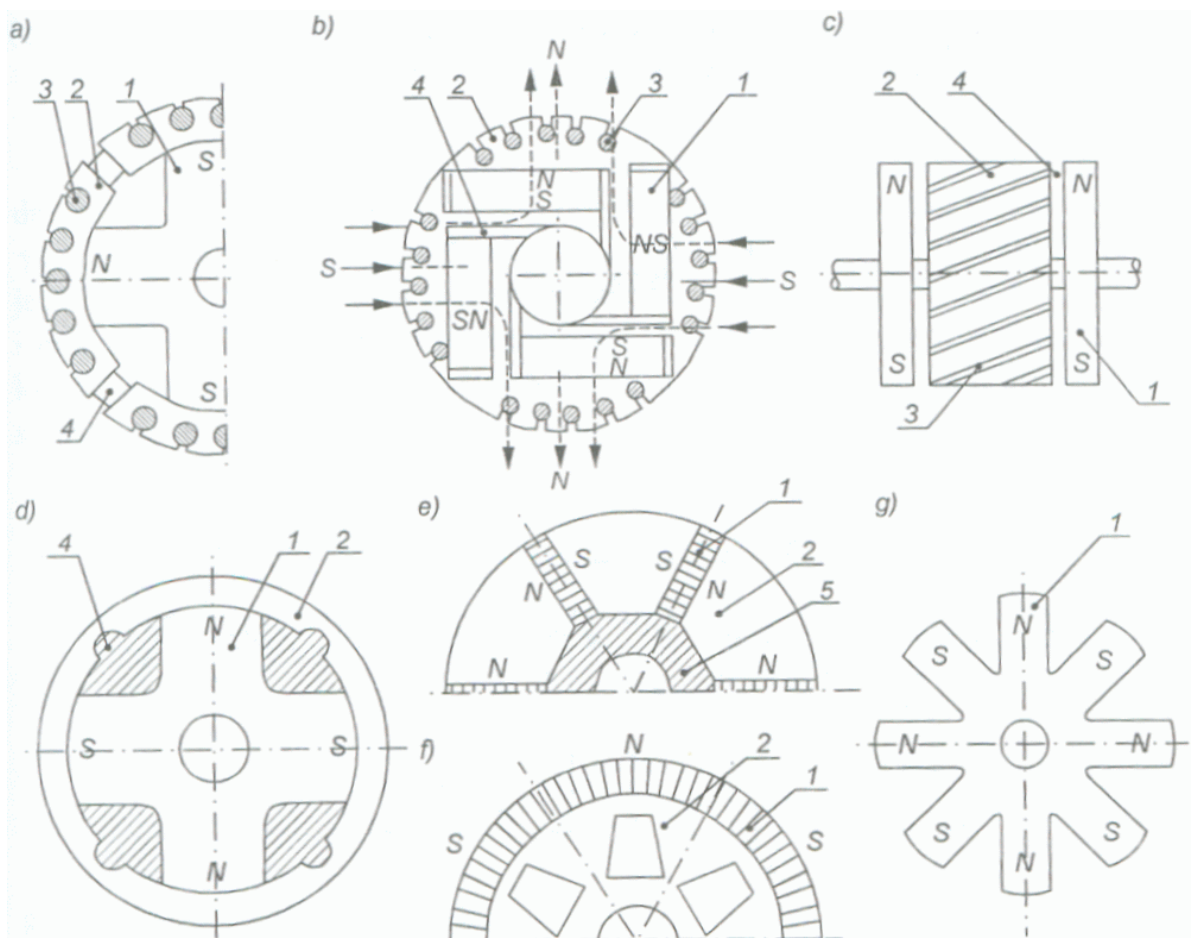
$$\text{moment } T = \frac{m}{\omega_s} \frac{U^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\beta$$

Najczęstsze odmiany małych silników synchronicznych

Z punktu widzenia wykorzystania materiałów czynnych (żelaza i miedzi) najlepszymi okazują się silniki synchroniczne rozwijające, jako podstawowy, moment synchroniczny wzbudzeniowy. Znane są one pod nazwą **permasy** (ang. Permanent magnet excited synchronous motors). Stojany tych silników, z wyjątkiem stojanów silników najmniejszych mocy o uzwojeniach jednofazowych i polu oscylacyjnym, niczym nie różnią się od stojanów maszyn indukcyjnych. W żłobkach blachowanego stojana jest rozłożone symetryczne uzwojenie dwupasmowe (przy zasilaniu jednofazowym) lub trójpasmowe (przy zasilaniu trójfazowym), wytwarzające w szczeliny maszyny pole magnetyczne wirujące. W przypadku zasilania jednofazowego, szeregowo z jednym z pasm włączony jest kondensator o tak dobranej pojemności, aby w zakresie obciążenia zbliżonego do znamionowego w zakresie pracy synchronicznej, pole magnetyczne było zbliżone do kołowego. Tylko sporadycznie stosuje się dodatkowy kondensator, powiększający moment rozruchowy, wymagający jednak odłączania po rozruchu.

Permasyny różnią się między sobą konstrukcją wirników. Na rysunku poniżej przedstawiono typowe rozwiązania wirników większości odmian permasynów. Pierwsze trzy, to wirniki dla silników o rozruchu indukcyjnym, z widoczną klatką rozruchowo-tłumiącą i o magnesach trwałych umieszczonych wewnątrz blachowanego rdzenia bądź (w silnikach o bardzo małych średnicach) równoległe do pakietu wirnika klatkowego. Czwarty wariant przedstawia wirnik silnika o rozruchu histerezyowym. Widoczne we wszystkich rozwiązaniach szczeliny lub przewężenia (nasycające się mostki) w rdzeniu wirnika mają na celu zmniejszenie strumieni rozproszonych magnesów (strumień magnesów umieszczonych wewnątrz ferromagnetycznego rdzenia ma tendencję raczej do zamykania się w nim, a nie do kojarzenia się z uzwojeniem umieszczonym w stojanie). Kolejne trzy konstrukcje, to wirniki współczesnych permasynów o rozruchu częstotliwościowym, z których pierwszy nosi nazwę *warstwowego*, drugi - *powłokowego*, a trzeci - *gwiazdowego*. W niektórych wirnikach gwiazdowych i pewnych odmianach wirników powłokowych, umieszcza się, przeważnie w przestrzeniach międzybiegunowych, złożoną z kilku prętów miedzianych klatkę tłumiacą kołysania wirnika, mogące powstać przy nagłych zmianach obciążenia.

W silnikach o rozruchu indukcyjnym, jak widać niesymetrycznych względem osi podłużnej (wzbudzenia) i poprzecznej, powstająca składowa reluktancyjna momentu synchronicznego, wskutek małej przenikalności rewersyjnej magnesów trwałych (porównywalnej z przenikalnością magnetyczną powietrza), ma fazę przeciwną w stosunku do maszyn synchronicznych o biegunach wydanych i wzbudzeniu elektromagnetycznym. Oznacza to, że w niektórych silnikach, szczególnie z wirnikami przedstawionymi na rysunku (a) i (b), reaktancja synchroniczna podłużna X_d jest **mniejsza** niż reaktancja synchroniczna poprzeczna X_q .



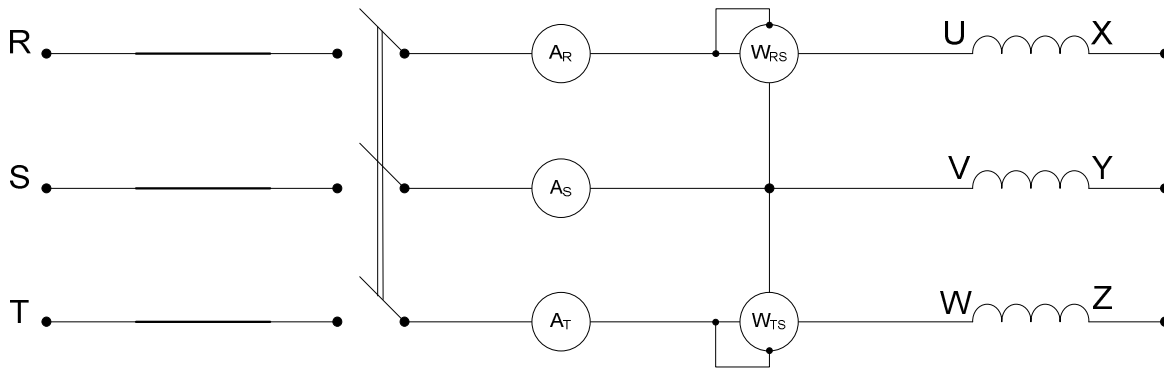
Przykładowe konstrukcje wirników: o rozruchu własnym indukcyjnym (a), (b), (c), o rozruchu własnym histerezyowym (d), o rozruchu częstotliwościowym (e), (f), (g); 1 – magnes trwały, 2 – rdzeń ferromagnetyczny lub histerezyowy(d), 3 – pręty klatki rozruchowo-tłumiącej, 4 – szczeliny ograniczające strumień rozproszony magnesów, 5 – niemagnetyczna piasta.

1. Czynności wstępne

Przed przystąpieniem do pomiarów należy zapoznać się z budową stanowiska oraz danymi znamionowymi badanej maszyny oraz przetwornika momentu obrotowego.

$$P_N = \dots\dots kW, \quad U_N = \dots V \quad I_N = \dots\dots A, \quad \cos\varphi = \dots\dots, \quad n_N = \dots\dots \text{ obr/min}$$

2. Schemat układu pomiarowego:



3. Wyznaczenie charakterystyk kątowych $T = f(\beta)$ dla napięcia zasilania $U_1 = const$ przy $f_1 = f_n$

Obciążenie silnika zmieniać aż do prądu znamionowego. Wyniki pomiarów zestawić w tablicy 3.

Tablica 3. Wyniki pomiarów i obliczeń

Lp.	Z pomiarów						Z obliczeń				
	U V	β °	<i>masa</i> g	I_R A	P_{RS} W	P_{TS} W	T Nm	P_{el} W	$\cos\varphi$ -	P_{mech} W	η %

Na podstawie wyników wykreśla się charakterystyki: $T = f(\beta)$, η , U , I , P_{mech} , $\cos\varphi = f(T)$

Moment

$$T = F \cdot r = m \cdot g \cdot r \text{ [Nm]}$$

m – masa wyrażona w kg

g – przyspieszenie ziemskie [m/s²]

r – ramię wyrażone w metrach

Moc mechaniczną obliczyć z zależności

$$P_{mech} = T \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \text{ moc użyteczna}$$

$$P_{el} = P_{RS} + P_{TS} \text{ moc elektryczna}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{el}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I} \text{ współczynnik mocy}$$

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} 100\% \text{ sprawność}$$

Wyniki przedstawić na wykresach.

4. Badanie wpływu napięcia zasilania na parametry funkcjonalne silnika przy stałym obciążeniu. Na podstawie pomiarów i obliczeń wyznaczyć charakterystyki: I , η , $\cos \varphi = f(U)$ ($T = \text{const}$).

Tablica 4. Wyniki pomiarów i obliczeń

Lp.	Z pomiarów						Z obliczeń				
	U V	β °	masa g	I_R A	P_{RS} W	P_{TS} W	T Nm	P_{el} W	$\cos \varphi$ -	P_{mech} W	η %

Wzory do obliczeń jak wyżej:

Na podstawie wyników wykreśla się charakterystyki: I , η , $\cos \varphi = f(U)$ ($T = \text{const}$).

5. Pomiar minimalnego napięcia rozruchowego przy zerowym obciążeniu ($T = 0$).

6. Badanie silnika przy zasilaniu z falownika.