

UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY W BYDGOSZCZY  
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ  
INSTYTUT EKSPLOATACJI MASZYN I TRANSPORTU  
**ZAKŁAD STEROWANIA**



## **ELEKTROTECHNIKA I ELEKTRONIKA**

ĆWICZENIE: **E19**

### **BADANIE PRĄDNICY SYNCHRONICZNEJ**

Piotr Kolber, Daniel Perczyński  
Bydgoszcz 2011

## 1. Wprowadzenie

Maszyną synchroniczną nazywamy taką maszynę prądu przemiennego w której istnieje ścisła zależność pomiędzy częstotliwością  $f$  prądu twornika, prędkością obrotową wirnika  $n$  i liczbą par biegunów  $p$ . Opisuje to następująca zależność:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

gdzie:

$n$  – prędkość obrotowa [obr/min].

Podczas obciążenia prądnicy płynący, przez trójfazowe uzwojenie twornika, prąd o częstotliwości  $f$  wywołuje strumień magnetyczny wirujący z prędkością

$$n = \frac{60f}{p} \quad [\text{obr/min}] \quad (2)$$

a więc z taką samą prędkością obrotową jak wirnik maszyny. *Wirnik wiruje synchronicznie ze strumieniem maszyny.*

Maszyny synchroniczne stosuje się we współczesnych układach elektroenergetycznych najczęściej w charakterze przetworników energii mechanicznej na elektryczną, czyli jako prądnice.

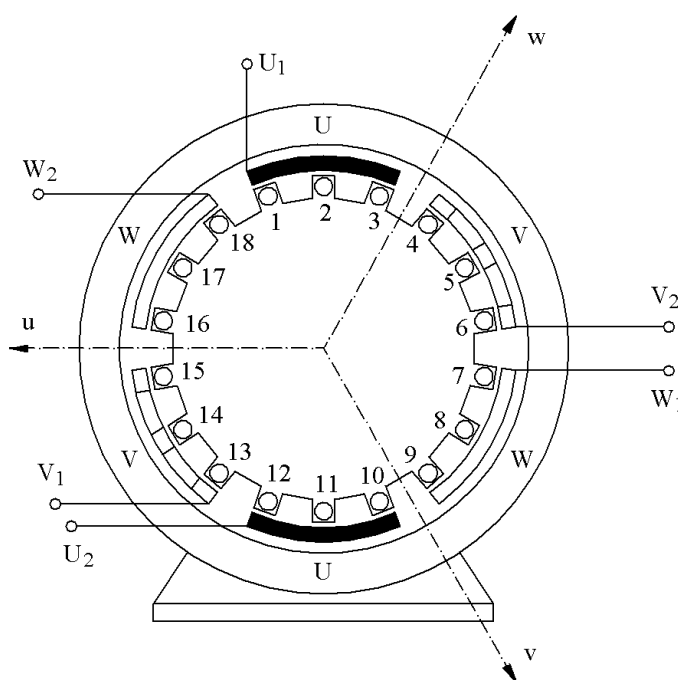
## 2. Budowa

Maszyny synchroniczne, podobnie jak maszyny prądu stałego, składają się z magneśnicy i twornika. Maszyny synchroniczne buduje się najczęściej jako trójfazowe. Trójfazowe uzwojenie twornika umieszczone jest z reguły w stojanie, a uzwojenie wzbudzenia zasilane poprzez pierścienie ślizgowe prądem stałym w wirniku. Uzwojenie wzbudzenia jest zasilane zwykle z prądnicy prądu stałego, zwanej wzbudnicą. Wzbudnica najczęściej jest osadzona na wale maszyny synchronicznej. Stojan maszyny synchronicznej

wykonany jest z pakietu blach wzajemnie izolowanych. W odpowiednich żłobkach, rozmieszczonych na wewnętrznym obwodzie stojana, umieszczone jest trójfazowe uzwojenie twornika - połączone najczęściej w gwiazdę. Uzwojenie to [1] dostosowane do liczby par biegunów wirnika ( $p$ ), liczby faz ( $m=3$ ) składa się z  $3p$  grup zwojów. Uzwojenie każdej fazy ma  $p$  grup zwojów połączonych ze sobą szeregowo lub równoległe. Rozpiętość każdej grupy na obwodzie twornika opisana jest zależnością

$$\tau_p = \frac{2\pi r}{p} \quad (3)$$

Na rys.1. przedstawiono przykładowe rozmieszczenie uzwojeń stojana trójfazowej, dwubiegunowej maszyny synchronicznej. Literami  $u,v,w$  oznaczono osie symetrii uzwojeń  $U,V,W$ .

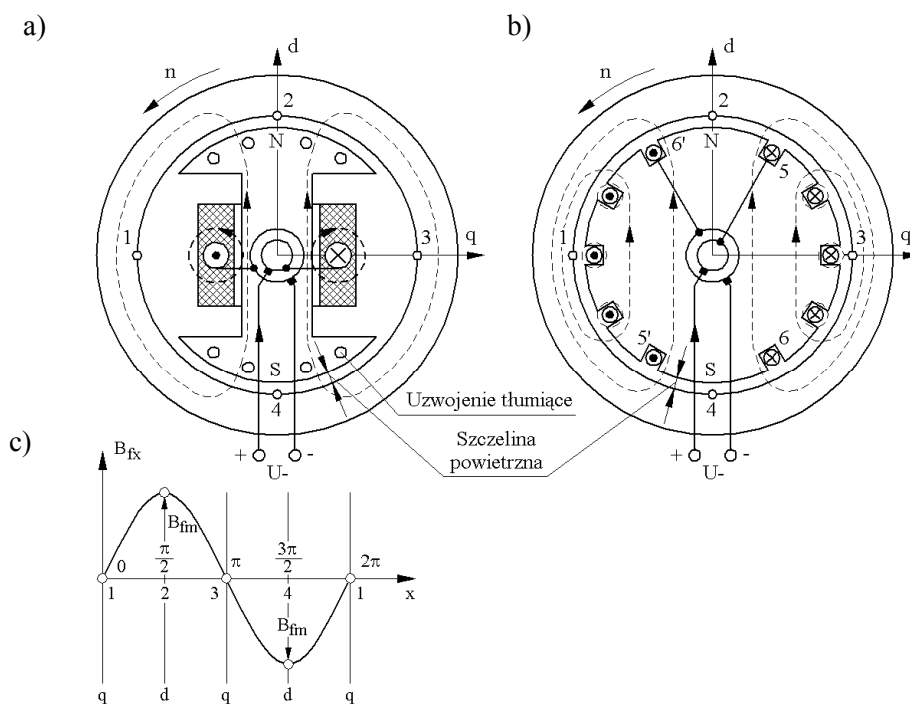


Rys.1. Rozmieszczenie uzwojeń stojana prądnicy synchronicznej

Wirniki maszyn synchronicznych wykonuje się w dwojaki sposób (rys.2.)

- w maszynach synchronicznych szybkobieżnych - (3000 obr/min lub rzadziej 1500 obr/min) wirniki są cylindryczne z tzw. biegunami utajonymi,
- w maszynach synchronicznych, wolnobieżnych - (500 - 750 obr/min) wirniki mają jawne (wystające) bieguny.

W nabiegunkach umieszczone są pręty miedziane, zwarte na obu końcach przez pierścienie zwierające. Są to klatki spełniające rolę uzwojeń tłumiących (np. tłumiących kołysanie wirnika) [2].



Rys.2. Maszyny synchroniczne a) o biegunach jawnych, b) o biegunach utajonych,

c) przebieg indukcji magnetycznej w uzwojeniu stojana.

### 3. Zasada działania prądnicy synchronicznej

Schemat prądnicy synchronicznej trójfazowej, z uzwojeniem stojana połączonym w gwiazdę i z obwodem wzbudzenia zasilanym przez prądnicę bocznikową sprzęgniętą wałem z prądnicą, przedstawiono na rys.3. Jeżeli uzwojenie wzbudzenia (umieszczone w nieruchomym wirniku) będzie zasilane prądem stałym  $I_w$ , to wytworzy ono stałe, względem wirnika i stojana pole magnetyczne o strumieniu  $\Phi$ .

Napędzając wirnik prądnicy (np. przez silnik M na rys.3) z prędkością obrotową  $n$  to powstanie, wirujące względem stojana i nieruchome względem wirnika, pole magnetyczne, które spowoduje zaindukowanie w każdej fazie, nieruchomego uzwojenia stojana sinusoidalnie zmienną siłą elektromotoryczną  $E$  o wartości skutecznej opisaną poniższą zależnością :

$$E = c \Phi n \quad [V] \quad (4)$$

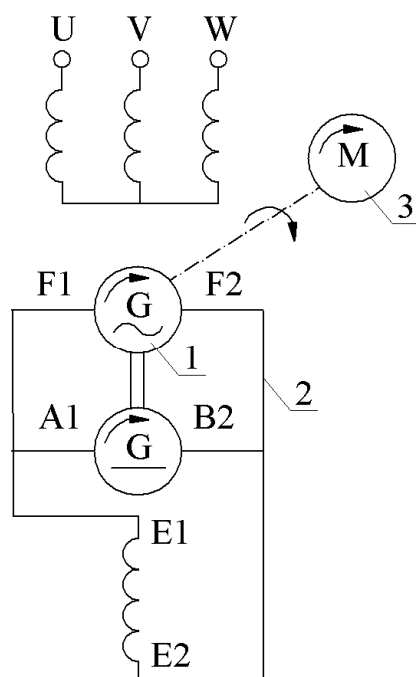
gdzie :  $E$  - siła elektromotoryczna indukowana w każdej fazie stojana

$\Phi$  - strumień magnetyczny,

$n$  - prędkość obrotowa wirnika, .

$c$  - stała konstrukcyjna maszyny.

Sinusoidalnie zmienne siły elektromotoryczne przesunięte są względem siebie o kąt fazowy  $120^\circ$ . Sinusoidalną zmienność siły elektromotorycznej uzyskuje się dzięki sinusoidalnemu rozkładowi indukcji magnetycznej wzdłuż wewnętrznego obwodu stojana (rys.6.2.c). Rozkład taki otrzymuje się poprzez odpowiednie ukształtowanie nabiegunników biegów jawnych lub poprzez sposób ułożenia uzwojenia w maszynach z biegunami utajonymi.



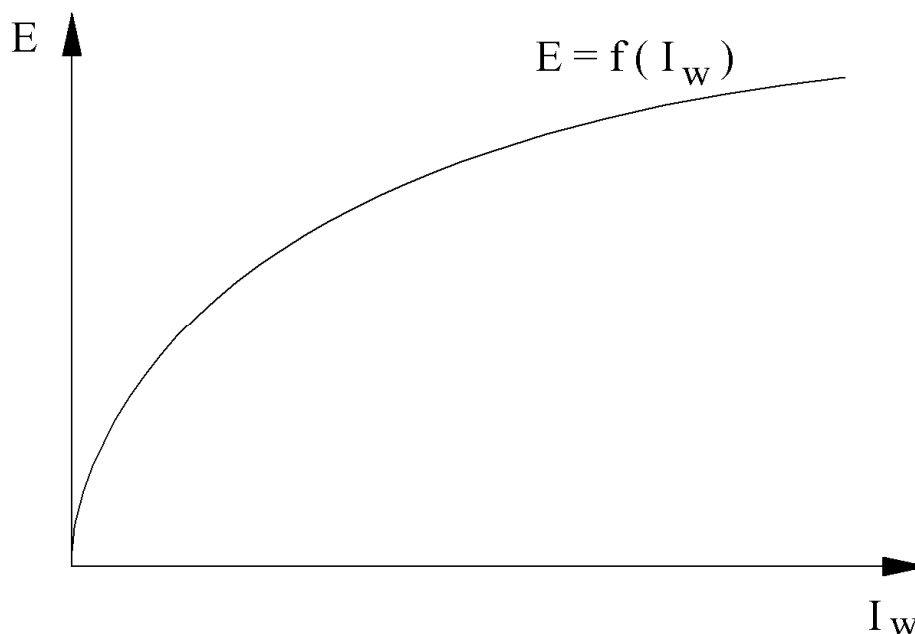
Rys.3. Schemat trójfazowej prądnicy synchronicznej z uzwojeniem stojana połączonym w gwiazdę oraz prądnicą bocznikową osadzoną na wspólnym wale. Oznaczenia: U,V,W – zaciski uzwojenia twornika (stojana) 1 - uzwojenie wzbudzenia (wirnik), F1F2 - zaciski uzwojenia wzbudzenia prądnicy synchronicznej, 2 – obwód wzbudzenia, A1B2 – zaciski uzwojenia twornika prądnicy bocznikowej , E1E2 - zaciski uzwojenia wzbudzenia prądnicy bocznikowej, 3 - silnik napędzający prądnicę.

#### 4. Bieg jałowy prądnicy synchronicznej

Bieg jałowy to taki stan pracy prądnicy synchronicznej w którym prądnicą jest napędzana i przez jej uzwojenie wzbudzenia płynie prąd  $I_w$  , ale nie jest ona obciążona, co oznacza, że prąd w tworniku jest równy zero ( $I=0$ ).

Siła elektromotoryczna wzbudzana w uzwojeniu twornika (stojana) jest przy stałej częstotliwości ( $f = \text{const}$ ) proporcjonalna do strumienia magnetycznego przenikającego to uzwojenie. Wartość strumienia  $\Phi$  , zależna od prądu przepływającego przez uzwojenie

wzbudzenia  $I_w$ , przedstawia krzywą zbliżoną do krzywej magnesowania. Zależność  $E=f(I_w)$  przedstawioną na rys.4 dla  $n=const$  i  $I=0$  nazywa się charakterystyką biegu jałowego.



Rys.4. Charakterystyka biegu jałowego prądnicy synchronicznej  $E=f(I_w)$  przy  $I=0$ ,  $n=const$ .

## 5. Obciążenie prądnicy synchronicznej

W stanie obciążenia prądnicy synchronicznej przez poszczególne fazy uzwojenia twornika przepływa prąd  $I$ . Prąd ten wytwarza strumień magnetyczny twornika  $\Phi_t$ . Część tego strumienia skojarzona jest tylko z uzwojeniem twornika i nazywana jest strumieniem rozproszenia. Powoduje ona zaindukowanie w uzwojeniu twornika sem reprezentowaną przez spadek napięcia na reaktancji  $X_r$ .

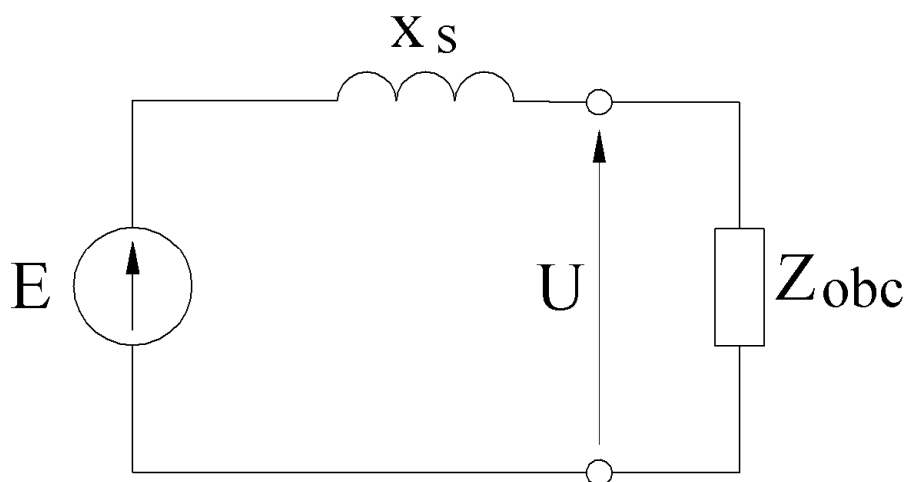
Druga część strumienia twornika (nazywana strumieniem oddziaływania twornika) jest skojarzona ze strumieniem magnetycznym wytwarzanym w uzwojeniu wzbudzenia, tworząc wypadkowe, wirujące pole magnetyczne maszyny. Strumień ten indukuje w uzwojeniu twornika sem reprezentowaną przez spadek napięcia na reaktancji oddziaływania twornika  $X_t$ .

Reaktancja

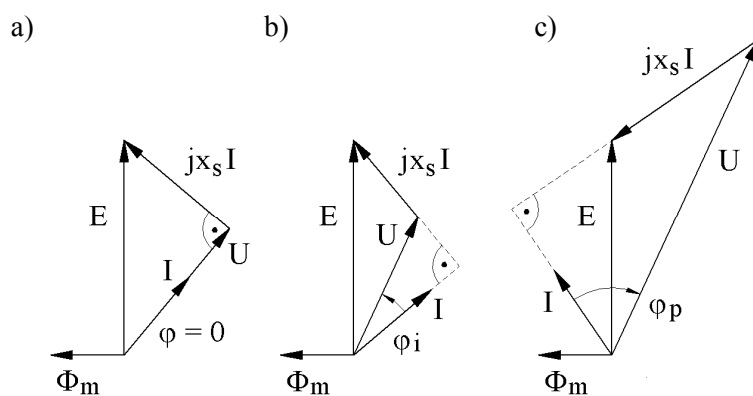
$$X_s = X_r + X_t \quad (5)$$

nosi nazwę reaktancji synchronicznej.

Na rys.5 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy maszyny synchronicznej pomijając rezystancję stojana  $R_s$ . Natomiast na rys.6 przedstawiono wykresy wektorowe odpowiadające różnym charakterom obciążeń.



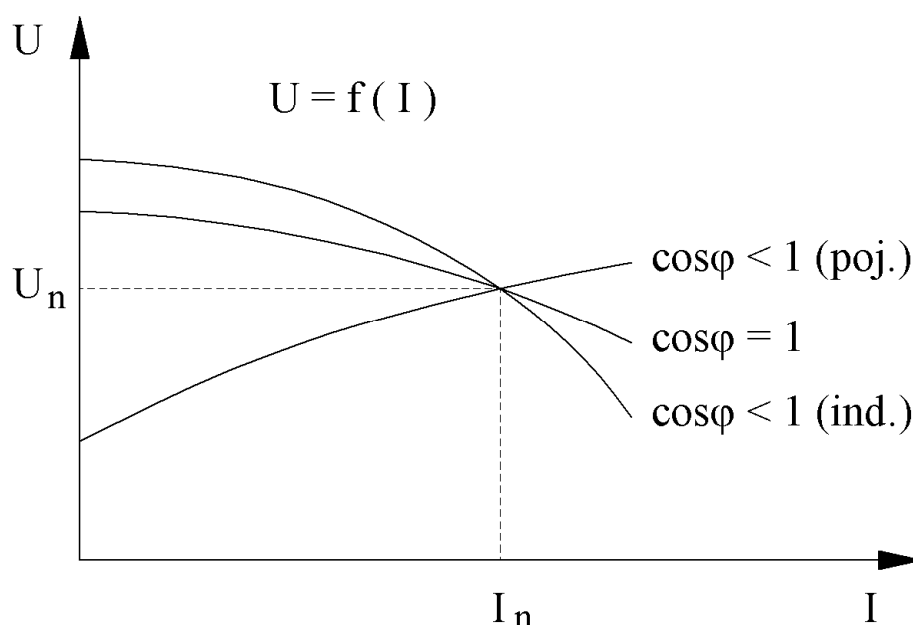
Rys.5. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej.



Rys.6. Wykresy wektorowe prądnicy synchronicznej dla obciążenia o charakterze a) rezystancyjnym, b) rezystancyjno-indukcyjnym, c) rezystancyjno-pojemnościowym ( $I_w = \text{const}$ ).



Dla obciążenia o charakterze czynnym i indukcyjnym wartość siły elektromotorycznej  $E$  jest większa od wartości napięcia na zaciskach prądnicy  $U$  ( $E > U$ ), natomiast w przypadku obciążenia pojemnościowego wartość siły elektromotorycznej  $E$  jest mniejsza od wartości napięcia  $U$  ( $E < U$ ). Powyższą własność ilustruje charakterystyka zewnętrzna prądnicy  $U=f(I)$ , czyli zależność napięcia na zaciskach prądnicy  $U$  od prądu twornika  $I$  przy stałej prędkości obrotowej  $n$  ( $n=\text{const}$ ), stałym prądzie wzbudzenia  $I_w$  i przy stałym współczynniku mocy  $\cos\varphi$ . Przebiegi charakterystyk zewnętrznych  $U=f(I)$  przedstawiono na rys.7.



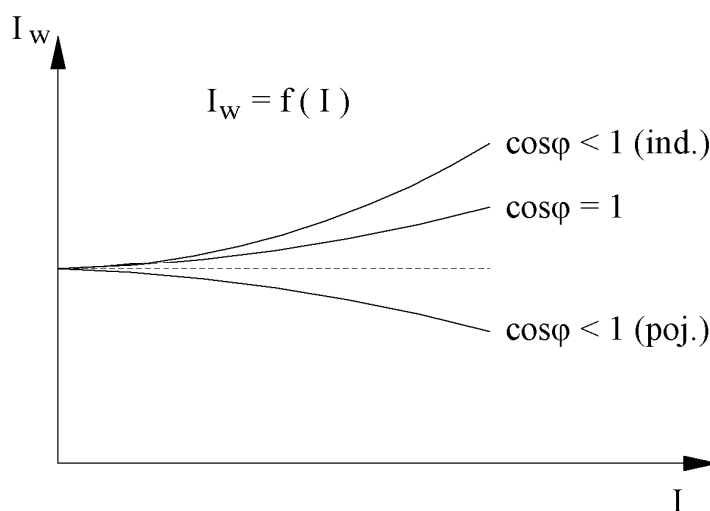
Rys.7. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy synchronicznej  $U=f(I)$  przy  $I_w=\text{const}$ ,

dla różnych wartości współczynnika mocy  $\cos\varphi$

Gdy przez uzwojenie twornika maszyny synchronicznej przepływa prąd, wówczas wartość napięcia na zaciskach maszyny ulega zmianie wskutek oddziaływania twornika i wskutek spadku napięcia w uzwojeniu twornika.

W przypadku, gdy  $\cos\varphi=1$  wartość napięcia na zaciskach prądnicy wraz ze wzrostem obciążenia nieznacznie maleje; przy obciążeniu o charakterze indukcyjnym wartość napięcia maleje bardziej wskutek oddziaływania twornika, osłabiającego główny strumień magnetyczny. Natomiast przy obciążeniu pojemnościowym wartość napięcia na zaciskach

twornika prądnicy nieznacznie wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia wskutek domagnesowującego oddziaływania twornika. Uzyskanie stałego napięcia na zaciskach twornika prądnicy synchronicznej, bez względu na zmiany obciążenia, możliwe jest dzięki odpowiedniej regulacji prądu wzbudzenia prądnicy synchronicznej. Zależność prądu wzbudzenia prądnicy  $I_w$  (przy stałym napięciu na zaciskach twornika prądnicy) od jej obciążenia  $I$  nazywa się charakterystyką regulacyjną. Zmiany wartości charakterystyk regulacyjnych dla kilku stałych wartości współczynnika mocy  $\cos\varphi$  przedstawiono na rys.8.

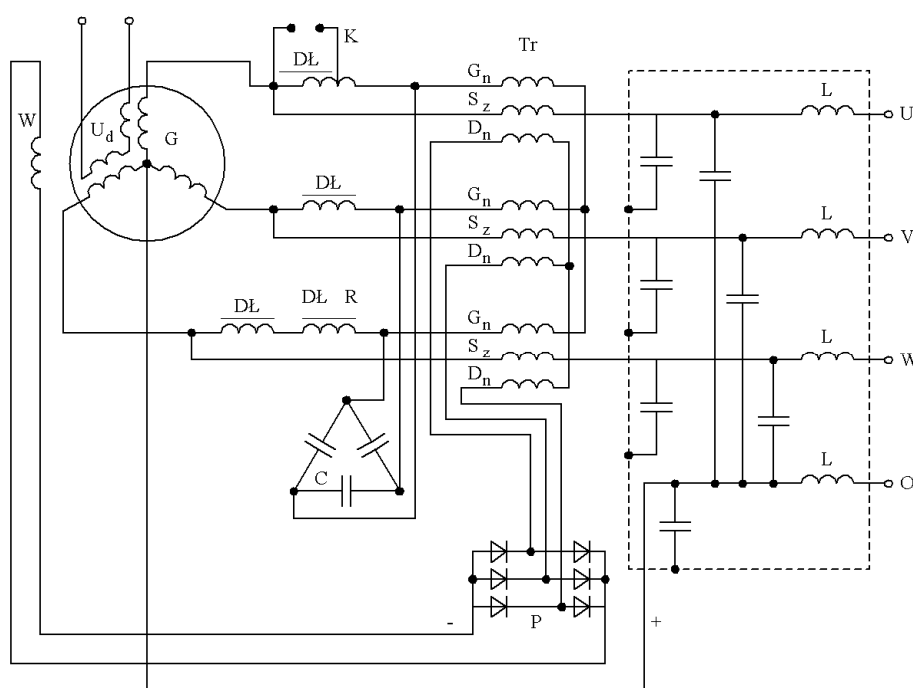


Rys.8. Charakterystyka regulacyjna prądnicy synchronicznej  $I_w=f(I)$  przy  $U=\text{const}$  dla różnych wartości współczynnika mocy  $\cos\varphi$

Z kształtu charakterystyk regulacyjnych wynika, że przy obciążeniu o charakterze czynnym i indukcyjnym, dla utrzymania stałej wartości napięcia na zaciskach maszyny, przy wzroście obciążenia należy zwiększać wartość prądu wzbudzenia, a przy obciążeniu pojemnościowym zmniejszać.

## 6. Opis stanowiska badawczego

Obiektem badań jest prądnica synchroniczna GCe 32b sprzęgnięta mechanicznie poprzez wał z trójfazowym silnikiem indukcyjnym. Obwód wzbudzenia maszyny zasilany jest z regulowanego źródła prądu stałego (rys.10) lub z układu przedstawionego na rys.9 wyposażonego w układ stabilizacji napięcia i filtr przeciwzakłóceniewy.



Rys.9. Schemat ideowy prądnicy synchronicznej, typu GCe 32b, z układem stabilizacji napięcia i filtrem przeciwzakłóceniewym:

G – prądnica, W- uzwojenie wzbudzenia, DŁ- dławik trójfazowy, K- przycisk zwierający część zwojów jednej fazy uzwojenia dławika, Tr- transformator stabilizacyjny, GN- uzwojenie górnego napięcia transformatora, zasilane prądem zależnym od napięcia prądnicy, Sz- uzwojenie szeregowo transformatora, zasilane prądem obciążenia prądnicy, DN- uzwojenie dolnego napięcia transformatora zasilające obwód wzbudzenia, P- prostownik, DŁR- dławik regulacyjny, Ud- uzwojenie dodatkowe.

## **7. Badania prądnicy synchronicznej**

### **7.1. Cel badań**

Celem badań jest poznanie budowy, zasady działania i właściwości ruchowych prądnicy synchronicznej.

### **7.2. Program badań**

1. Oględziny i rejestracja danych znamionowych
2. Wyznaczenie charakterystyki biegu jałowego
3. Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej
4. Wyznaczenie charakterystyki regulacyjnej

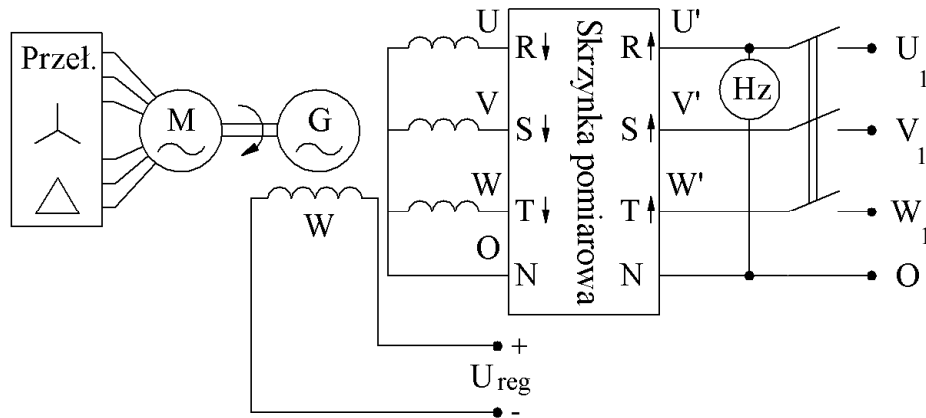
#### **7.2.1. Dane znamionowe prądnicy synchronicznej**

Z tabliczki znamionowej odczytać i zanotować dane znamionowe maszyn użytych w badaniu.

#### **7.2.2. Wyznaczenie charakterystyki biegu jałowego prądnicy synchronicznej**

Przed przystąpieniem do wyznaczenia charakterystyki biegu jałowego maszyny należy:

- a) połączyć układ pomiarowy przedstawiony na rys.6.10. Opisem „Skrzynka pomiarowa” nazwano zintegrowany układ pomiarowy QN 10,
- b) za pomocą przełącznika gwiazda - trójkąt uruchomić silnik napędzający prądnicę,



Rys.10. Schemat układu pomiarowego

- c) za pomocą regulowanego źródła napięcia stałego  $U_{reg}$  zasilającego uzwojenie wzbudzenia zmieniać prąd wzbudzenia  $I_w$  od zera do wartości znamionowej, oraz dokonać pomiaru napięć fazowych,
- d) wyniki pomiarów notować w tablicy 1.

Tablica 1. Wyniki pomiarów i obliczeń charakterystyki biegu jałowego

$I_w$					$I_w=I_n$
$U_u$					
$U_v$					
$U_w$					
$U_o$					

Napięcie  $U_o$  jest średnią arytmetyczną napięć fazowych.

- e) na podstawie pomiarów wykreślić charakterystykę biegu jałowego  $U_o=f(I_w)$ .

### 7.2.3. Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej

Za pomocą regulowanego źródła napięcia stałego  $U_{reg}$  (rys.6.10) zasilającego uzwojenie wzbudzenia dokonać regulacji napięcia przewodowego biegu jałowego prądnicy do wartości znamionowej, a następnie:

- do zacisków  $U_1, V_1, W_1$  podłączyć trójfazowy grzejnik oporowy,
- za pomocą wyłączników grzejnika oporowego zmieniać moc obciążenia prądnicy dokonując jednocześnie pomiarów napięć przewodowych  $U_{UV}, U_{UW}, U_{VW}$ , prądów przewodowych, częstotliwości  $f$ , prędkości obrotowej  $n$ , mocy czynnej  $P$  - wyniki pomiarów i obliczeń zanotować w tabelicy 2. Pomiary wykonywać przy stałym prądzie wzbudzenia  $I_w = const$ .
- obliczyć średnie wartości napięcia przewodowego, prądu przewodowego i  $\cos\varphi$  wykorzystując poniższe zależności:

$$U_p = \frac{U_{UV} + U_{UW} + U_{VW}}{3} \quad (6)$$

$$I_p = \frac{I_U + I_V + I_W}{3} \quad (7)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_p} \quad (8)$$

Tablica 2. Wyniki pomiarów i obliczeń charakterystyki zewnętrznej

Lp.	Pomiary									Obliczenia			
	$U_{UV}$	$U_{UW}$	$U_{VW}$	$I_U$	$I_V$	$I_W$	$P$	$N$	$f$	$\cos\varphi$	$\varphi$	$U_p$	$I_p$
	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[W]	[obr./min]	[Hz]	-	[rad]	[V]	[A]
1													
2													
3													

- d) po zakończeniu pomiarów zmniejszyć napięcie zasilające uzwojenie wzbudzenia do zera,
- e) na podstawie pomiarów i obliczeń wykonać wykres  $U_p=f(I_p)$ .

#### 7.2.4. Wyznaczenie charakterystyki regulacyjnej

Za pomocą regulowanego źródła napięcia stałego  $U_{reg}$  (rys.10), zasilającego uzwojenie wzbudzenia, dokonać regulacji napięcia przewodowego biegu jałowego prądnicy synchronicznej do wartości znamionowej.

- a) do zacisków  $U_1, V_1, W_1$  dołączyć trójfazowy odbiornik,
- b) za pomocą wyłączników zmieniać moc obciążenia prądnicy jednocześnie regulując prąd wzbudzenia tak, aby utrzymywać stałą wartość napięcia przewodowego,
- c) podczas zmian obciążeń dokonać pomiarów prądów przewodowych i prądu wzbudzenia – wyniki notować w tablicy 3,

Tablica 3. Wyniki pomiarów charakterystyki regulacyjnej

Lp.	$I_w$	$I_U$	$I_V$	$I_w$	$I_p$
-	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]
1					
2					
3					
		$I_U \leq I_n$			

- d) po zakończeniu pomiarów wyłączyć wszystkie sekcje obciążenia, zmniejszyć napięcie zasilające uzwojenie wzbudzenia do zera i wyłączyć silnik napędzający,
- e) na podstawie pomiarów i obliczeń wykonać wykres  $I_w = f(I_p)$ .

#### 7.2.5 Praca prądnicy z układem automatycznej regulacji napięcia

W celu wyznaczenia charakterystyki zewnętrznej prądnicy synchronicznej z układem automatycznej regulacji napięcia, należy połączyć układ pomiarowy przedstawiony na rys.9.

- a) za pomocą przełącznika gwiazda - trójkąt uruchomić silnik napędzający prądnicę,
- b) badania wykonać analogicznie jak w pkt. 7.2.3 a, b, c, d, e oraz dokonać odpowiednich pomiarów i obliczeń, a wyniki badań zamieścić w tablicy 4,

Tablica 4. Wyniki pomiarów i obliczeń charakterystyki zewnętrznej

Lp.	Pomiary									Obliczenia			
	$U_{UV}$	$U_{UW}$	$U_{VW}$	$I_U$	$I_V$	$I_W$	P	n	f	$\cos\varphi$	$\varphi$	$U_p$	$I_p$
	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[W]	[obr./min]	[Hz]	-	[rad]	[V]	[A]
1													
2													
3													
				$I_U \leq I_n$	$I_V \leq I_n$	$I_W \leq I_n$							

- c) skomentować wyniki oraz pracę automatycznego układu regulacji napięcia.

Sprawozdanie powinno zawierać: dane znamionowe prądnicy, schematy obwodów pomiarowych, tablice z wynikami pomiarów i obliczeń, wzory z przykładami obliczeń, wykresy charakterystyk, teoretyczne uzasadnienie ich kształtów oraz wnioski (porównać pracę prądnicy z układem oraz bez układu automatycznej regulacji napięcia).

## Literatura

1. P. Hempowicz i inni: „Elektronika i elektrotechnika dla nieelektryków”, WNT, Warszawa 1999.
2. W. Latek: „Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach” WNT Warszawa 1987.
3. A.M. Plamitzer: „Maszyny elektryczne”, WNT, Warszawa 1976.

PN-E-06755-1: „Maszyny elektryczne wirujące. Rodzaje i programy badań. Postanowienia ogólne”.