

# EKSPLOATACJA GENERATORÓW

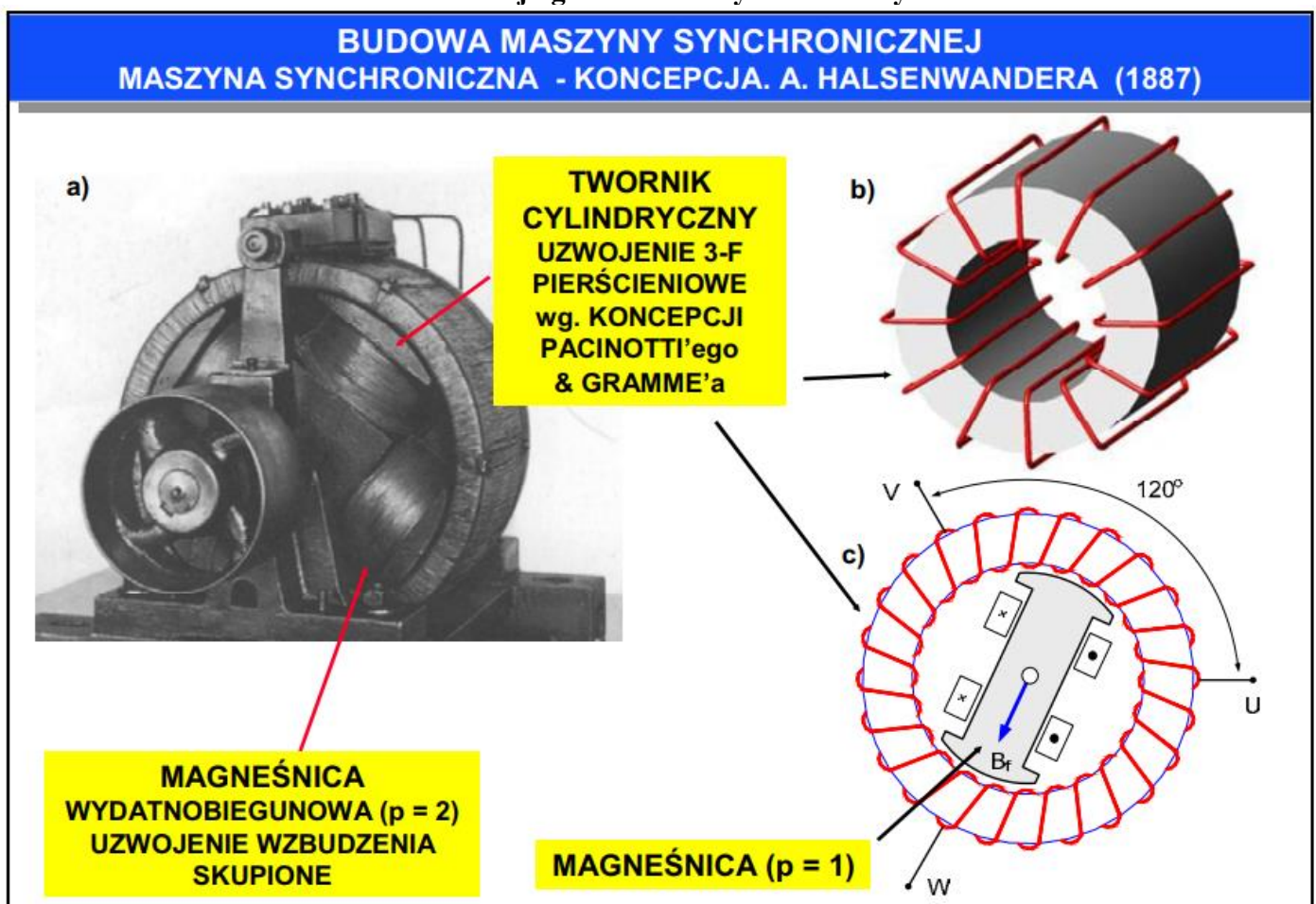
## Zagadnienia

1. Konstrukcja generatorów synchronicznych
2. Parametry i charakterystyki generatorów synchronicznych. Diagram eksploatacyjny turbogeneratora.
3. Układy wzbudzenia generatorów synchronicznych
3. Kołysania i stabilność pracy równoległej
4. Stany nieustalone i niesymetryczne. Zwarcia generatorów.
5. Straty i sprawność generatorów synchronicznych
6. Uszkodzenia eksploatacyjne.
7. Perspektywy wzrostu mocy granicznych

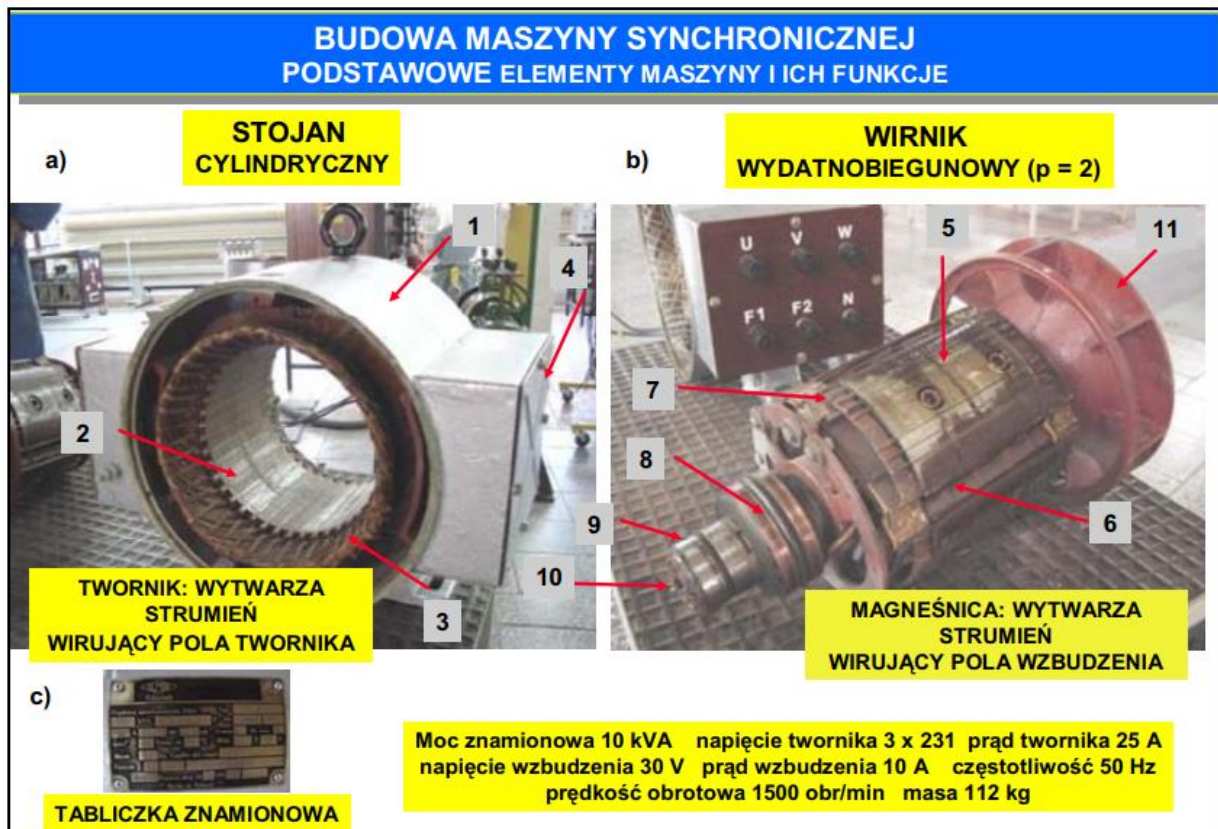
## Literatura

1. Latek W., *Turbogeneratory*, WNT Warszawa., 1973
2. Bytnar A., *Wybrane zagadnienia z konstrukcji i eksploatacji turbogeneratorów*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa., 1983
3. Anuszczyk J., *Maszyny elektryczne w energetyce. Zagadnienia wybrane*, WNT Warszawa., 2005
4. Laudyn D, Pawlik M., Strzelczyk F., *Elektrownie*, WNT Warszawa., 2005
5. Paszek W., *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT Warszawa., 1986
6. Przybysz J., *Turbogeneratory. Zagadnienia eksploatacyjne*, Instytut Energetyki, Warszawa., 2004
7. Glinka T., Szymaniec S., *Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów*, WNT Warszawa., 2019
8. Przybysz J., *Hydrogeneratory. Diagnostyka i naprawy*, Wydawnictwo Instytutu Energetyki Warszawa., 2019

## Konstrukcja generatorów synchronicznych



Przykład budowy maszyny synchronicznej 3-fazowej z początkowego okresu rozwoju

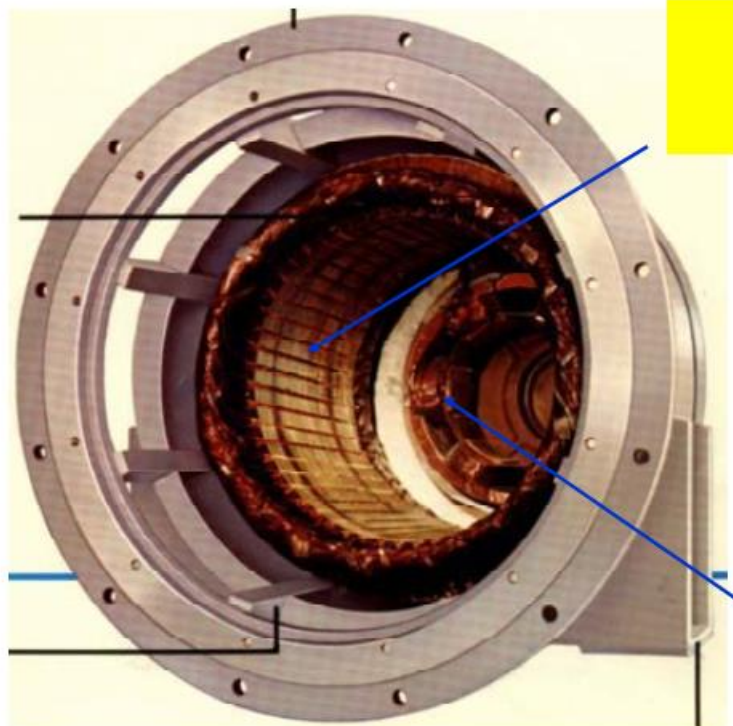


Budowa i podstawowe elementy maszyny synchronicznej (produkcja firmy ELMOR Gdańsk):  
 a) twornik 3-fazowy, b) wzbudnik wydatnobiegunowy, c) tabliczka zaciskowa, d) tabliczka znamionowa  
 Elementy maszyny: 1 – kadłub stojana, 2 – rdzeń blachowany, 3 – 3-fazowe uzwojenie twornika, 4 – skrzynka zaciskowa, 5 – biegun/nabiegownik magnesny, 6 – skupione uzwojenie wzbudzenia, 7 – klatka tłumiąca, 8 – pierścień ślizgowy, 9 – łożyska, 10 – wał, 11 – wentylator



Budowa i podstawowe elementy maszyny synchronicznej z wzbudnicą szczotkową:  
 a) zespół generator-wzbudnica, b) stojan generatora i wzbudnicy, c) węzeł zestyku ślizgowego wzbudnicy (komutator i szczotki) i magnesny (pierścień ślizgowy i szczotki), d) wirnik generatora i wzbudnicy

**BUDOWA MASZYNY SYNCHRONICZNEJ**  
**STOJAN: TWORNIK GENERATORA I MAGNEŚNICA WZBUDNICY**

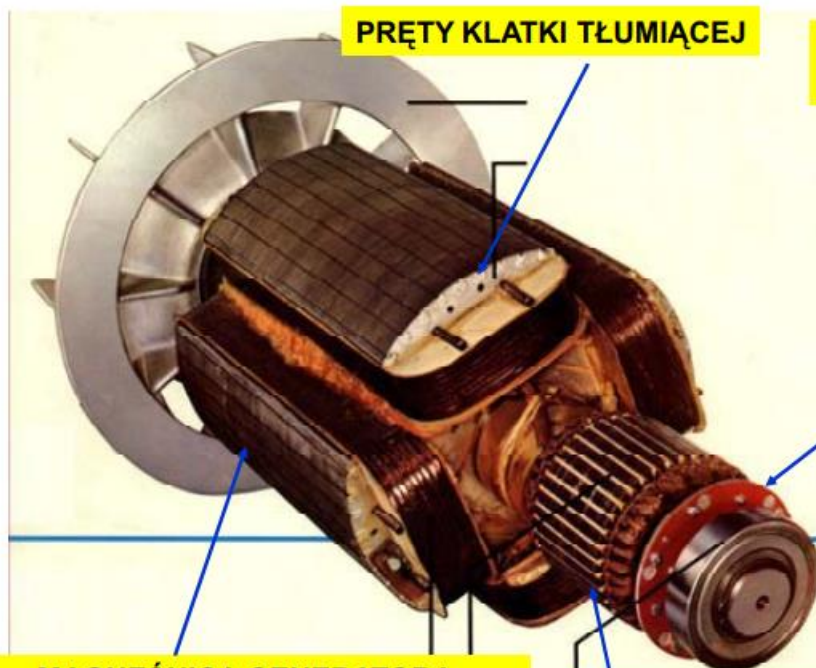


**TWORNIK GENERATORA  
CYLINDRYCZNY  
UZWOJENIE 3-FAZOWE  
ROZŁOŻONE**

**MAGNEŚNICA WZBUDNICY  
WYDATNOBIEGUNOWA  
UZWOJENIE WZBUDZENIA  
SKUPIONE**

Stojan maszyny synchronicznej bezszczotkowej: uzwojenie twornika generatora i uzwojenie magnesy wzbudnicy (źródło: materia y The Lima Electric Co.)

**BUDOWA MASZYNY SYNCHRONICZNEJ**  
**WIRNIK: MAGNEŚNICA GENERATORA I TWORNIK WZBUDNICY**



**PRĘTY KLATKI TŁUMIĄCEJ**

**PROSTOWNIK WIRUJĄCY  
WZBUDNICY**

**MAGNEŚNICA GENERATORA  
UZWOJENIE WZBUDZENIA SKUPIONE**

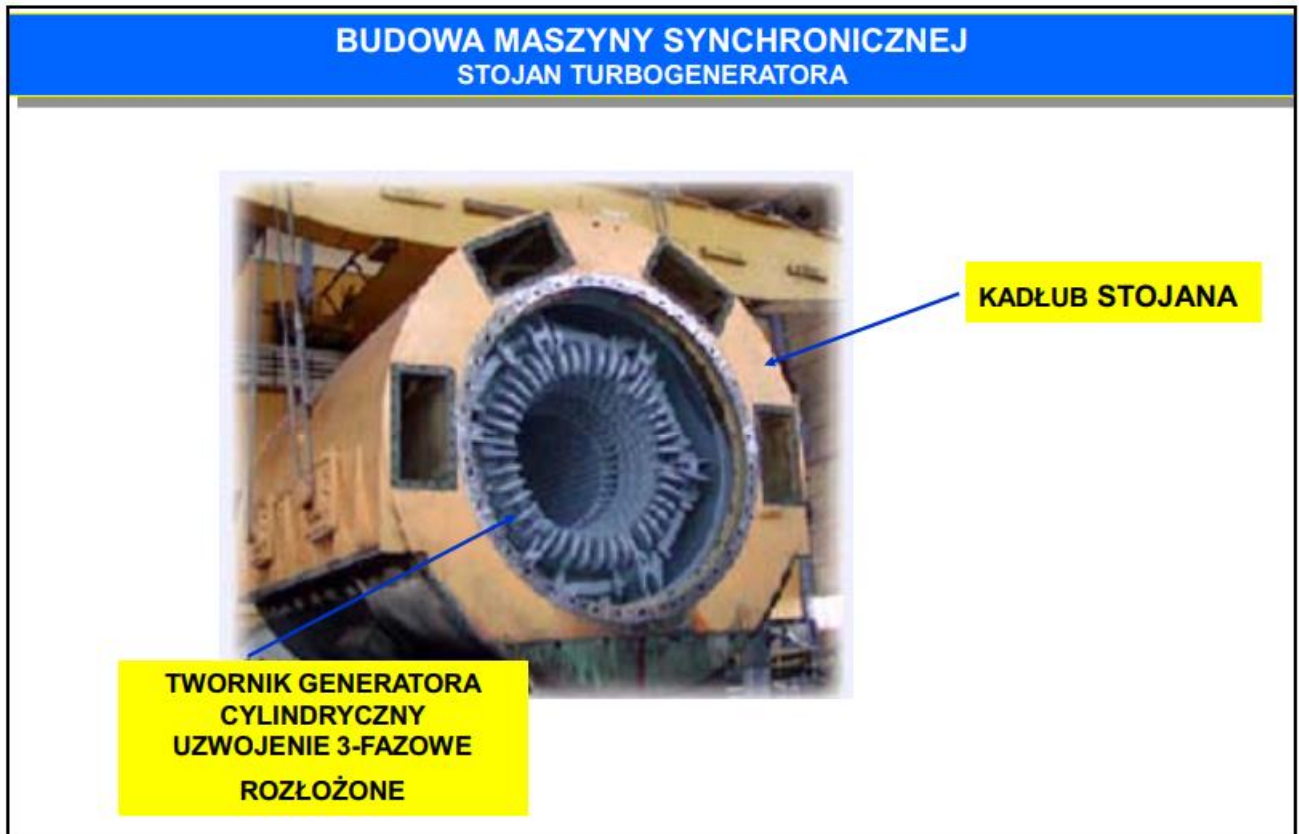
**TWORNIK WZBUDNICY CYLINDRYCZNY  
UZWOJENIE 3-FAZOWE ROZŁOŻONE**

Wirnik maszyny synchronicznej bezszczotkowej: magnesy generatora, twornik wzbudnicy i prostownik wirujący

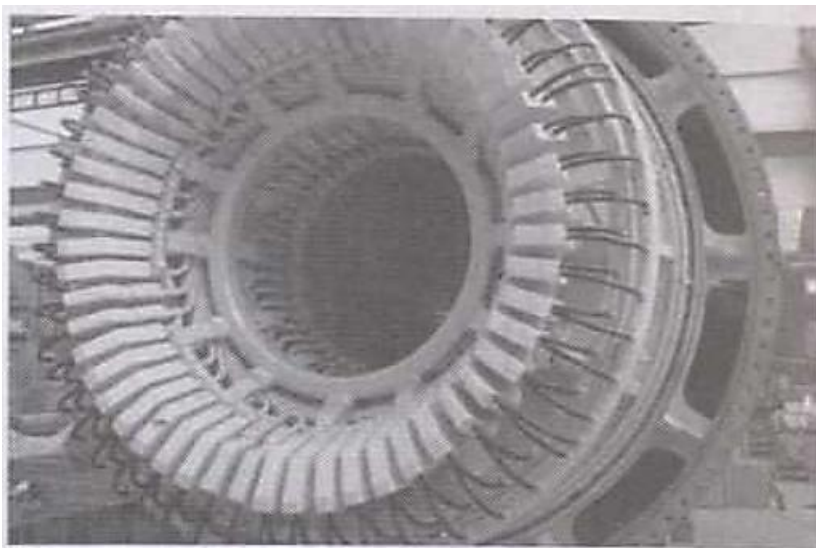
W systemie energetycznym jako źródła energii elektrycznej stosuje się generatory synchroniczne bardzo dużych mocy (nawet do 2 GVA). W elektrowniach węglowych stosuje się turbogeneratory napędzane turbinami parowymi. Prędkość obrotowa wirników to zwykle 1500 lub 3000 obr/min.

Rdzeń stojana wykonany jest z pakietów izolowanych blach (rys. 6.6). W żłobkach stojana rozłożone jest trójfazowe uzwojenie twornika.

Cylindryczny wirnik turbogeneratora wykonany jest z odkuwki stalowej łącznie z wałem (rys. 6.7). Średnice zewnętrzne wirników, z uwagi na duże prędkości obrotowe, są niewielkie – w turbogeneratorach najwyższych mocy dochodzą do 1,2 m. Uzwojenie wzbudzenia umieszczone jest w żłobkach wirnika, które zajmuje 2/3 obwodu wirnika (rys. 6.7).



Stojan turbogeneratora

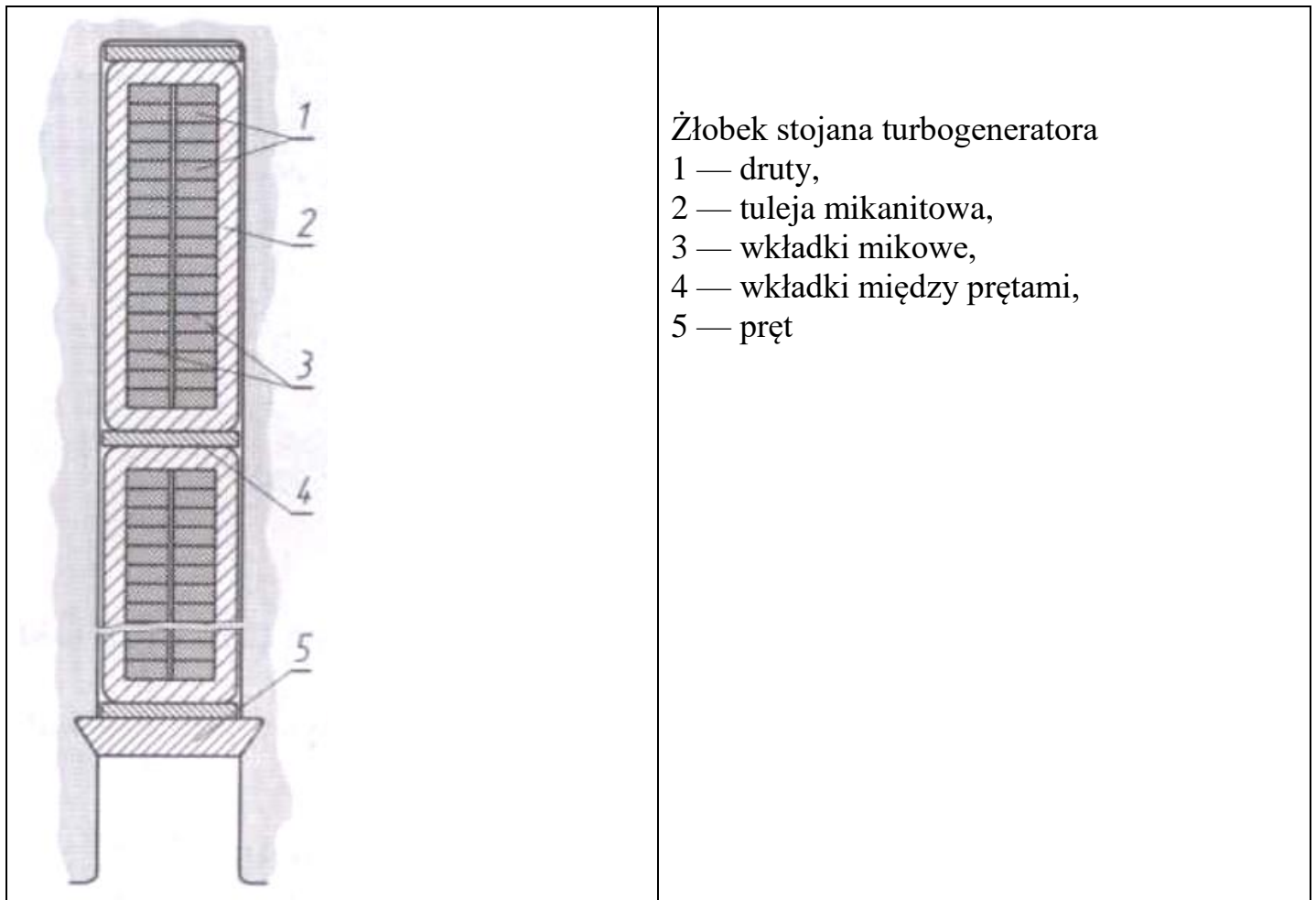


Uzwojenie stojana turbogeneratora o mocy 1200 MW z chłodzeniem wodno-wodorowym (fot. ALSTOM Power, Oddział we Wrocławiu)

Rdzeń stojana jest wykonany z pakietów izolowanych blach elektromagnetycznych o małej stratności. Grubość pakietu wynosi 4-5 cm. Znajdujące się między pakietami blach rozporki tworzą promieniowe kanały wentylacyjne o grubości kilku milimetrów. Rdzeń znajduje się w spawanym korpusie, który spełnia

rolę konstrukcji nośnej, a jednocześnie dzięki odpowiednim komorom — ukierunkowuje przepływ czynnika chłodzącego.

W żłobkach stojana jest umieszczone dwuwarstwowe uzwojenie twornika. W celu zabezpieczenia przed skutkami bardzo dużych sil przy zwarciach połączenia czołowe są mocowane do odpowiednich wsporników na obwodzie. W bardzo dużych generatorach uzwojenia tworników są uzwojeniami jednozwojnymi, przy czym pręt zwoju jest wykonany z wielu izolowanych od siebie elementarnych prętów.



#### Żłobek stojana turbogeneratorskiego

- 1 — druty,
- 2 — tuleja mikanitowa,
- 3 — wkładki mikowe,
- 4 — wkładki między prętami,
- 5 — pręt

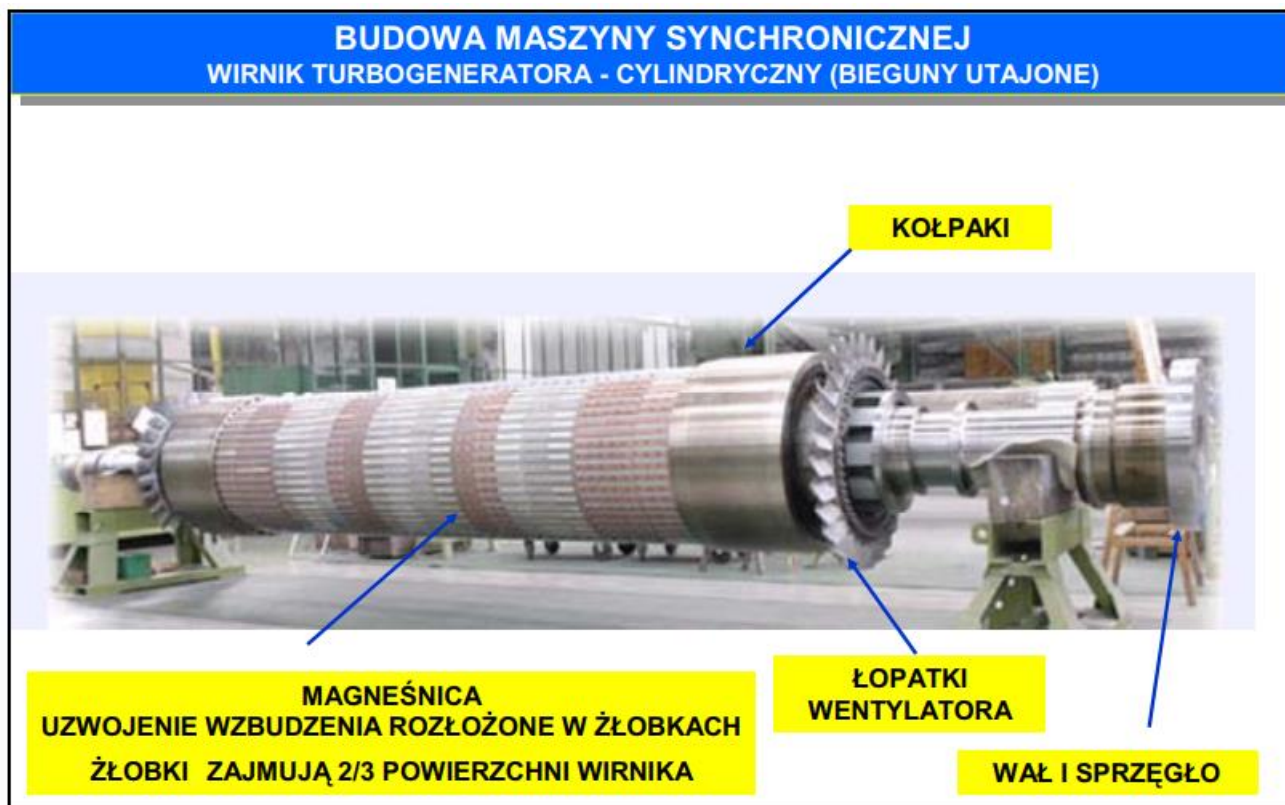
Maksymalne napięcie znamionowe produkowanych turbogeneratorów 28 kV. Tak wysokie napięcie wymaga szczególnej izolacji. Do niedawna izolacją uzwojeń twornika była izolacja z taśmy mikanitowej nasyciona i odpowiednio sprasowana. Obecnie coraz częściej używa się taśmy (papieru mikowego), a czynnikiem wiążącym są żywice sztuczne, np. epoksydowe. Izolację wykonuje się na prętach poza machyną a następnie zaizolowane i sprasowane do odpowiednich wymiarów układa się w żłobkach.

Ze względu na to że sprawność turbin dużych jest znacznie większa niż małych (koszt jednostkowy mocy maleje ze wzrostem mocy znamionowej), dlatego turbogeneratory na potrzeby energetyki zawodowej są budowane na maksymalne moce — moc graniczną jest 1500 MW. Zwiększenie mocy można uzyskać przez zwiększenie wymiarów i lepsze wykorzystanie materiałów. Zwiększenie ograniczone ze względów wytrzymałościowych i transportowych. Zwiększenie obciążenia (natężenia prądu w uzwojeniach i indukcji w rdzeniu) wymaga *intensywnego chłodzenia*.

W praktyce największe możliwości zwiększenia mocy granicznych daje zmutowanie chłodzenia, które można uzyskać przez zastosowanie chłodzenia bezpośredniego oraz zastosowanie czynnika chłodzącego o lepszych właściwościach czyli wodoru i wody. W tym celu w turbogeneratorach o mocach k MW stosuje się bezpośrednio chłodzenie wodorowe uzwojeń wirnika i pośrednie chłodzenie wodorowe uzwojeń stojana. Przy mocach powyżej 200 MW uzwojenie stojana musi być chłodzone bezpośrednio. Ze względu na nieprzydatność wodoru do tego celu stosuje się wodę odpowiednio uzdatnioną. Uzwojenie stojana turbogeneratorskiego z bezpośrednim chłodzeniem wodnym składa się z dwóch rodzajów prętów elementarnych, pełnych i rurkowych przez które przepływa woda. Rozwój metod projektowania i technologii powoduje, że możliwa staje się budowa coraz większych jednostek chłodzonych bezpośrednio powietrzem. To istotny

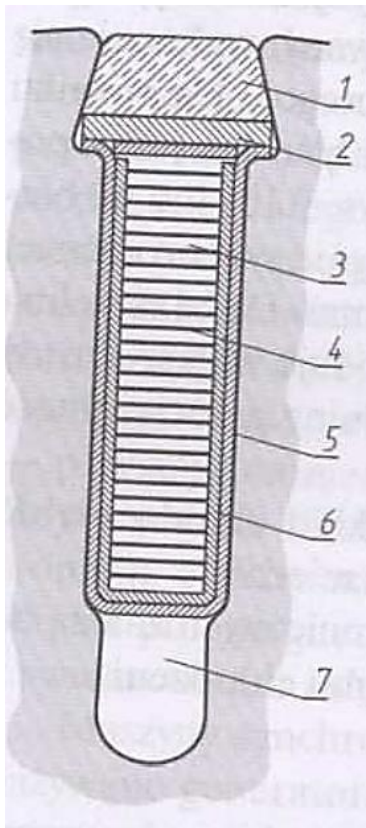
kierunek współczesnych rozwiązań konstrukcyjnych. Obecnie w Polsce produkuje się w ten sposób chłodzone turbogeneratory o mocy 260 MW.

Turbogeneratory serii TGH oraz GTHW są turbogeneratorami wyprodukowanymi przez firmę DOLMEL we Wrocławiu (obecna nazwa ALSTOM Power Sp. z o.o.). Seria TGH średniej mocy ma chłodzenie wodorowe bezpośrednie stojana i wirnika. Turbogenerator serii TGHW mają chłodzenie bezpośrednie wodorowe wirnika oraz bezpośrednie wodne uzwojeń stojana. Turbogeneratory serii TWW mają chłodzenie wodorowo-wodne jak w serii GTHW; (TWW-200 - licencja firmy ELEKTROSİLA, produkcja DOLMEL, TWW-500 - produkcja ELEKTROSİLA).



Wirnik turbogeneratorsa

Z powodu dużych prędkości obrotowych i związanych z tym dużych sił odśrodkowych średnicy wirników turbogeneratorów są niewielkie i przy największych mocach wynoszą do 1,3 m. W celu zwiększenia długości czynnej uzwojenia długość jest duża, kilkakrotnie większa od średnicy i wynosi do 13 m.



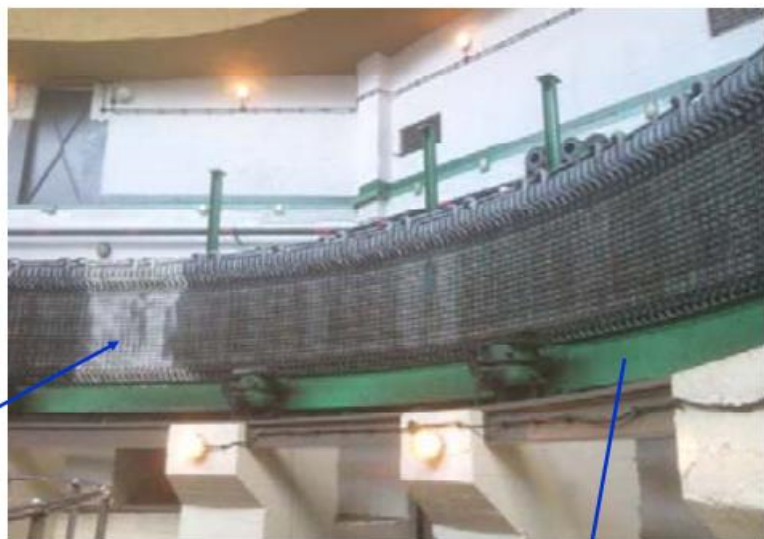
- Żłobek wirnika turbogeneratora
- 1 – klin z brązu lub stali niemagnetycznej
  - 2 – podkładka pod klin
  - 3 – druty profilowe
  - 4 – wkładki mikowe
  - 5 – blacha stalowa
  - 6 – mikanit
  - 7 – kanał wentylacyjny

W elektrowniach wodnych stosowane są hydrogeneratory. Z uwagi na małą prędkość obrotową (62,5...500 obr/min przy 50 Hz) są to maszyny wielobiegunowe. Wirnik ma konstrukcję wydłużoną o dużej średnicy zewnętrznej. Uzwojenie wzbudzenia nawinięte jest na biegunach – skupione. Hydrogenerator pracuje w pozycji pionowej

### BUDOWA MASZYNY SYNCHRONICZNEJ STOJAN HYDROGENERATORA



**BOKI CEWEK  
UZWOJENIA TWORNIKA**

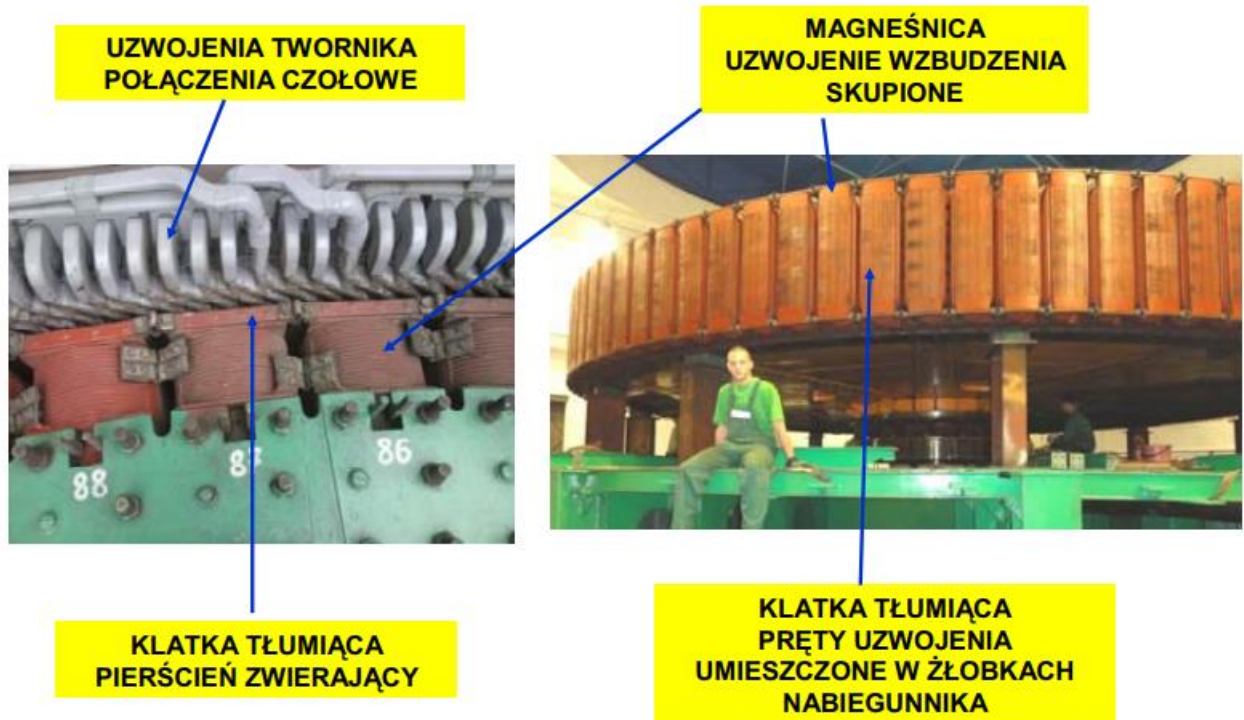


**TWORNIK GENERATORA  
CYLINDRYCZNY  
UZWOJENIE 3-FAZOWE  
ROZŁOŻONE W ŻŁOBKACH**

**KADŁUB STOJANA**

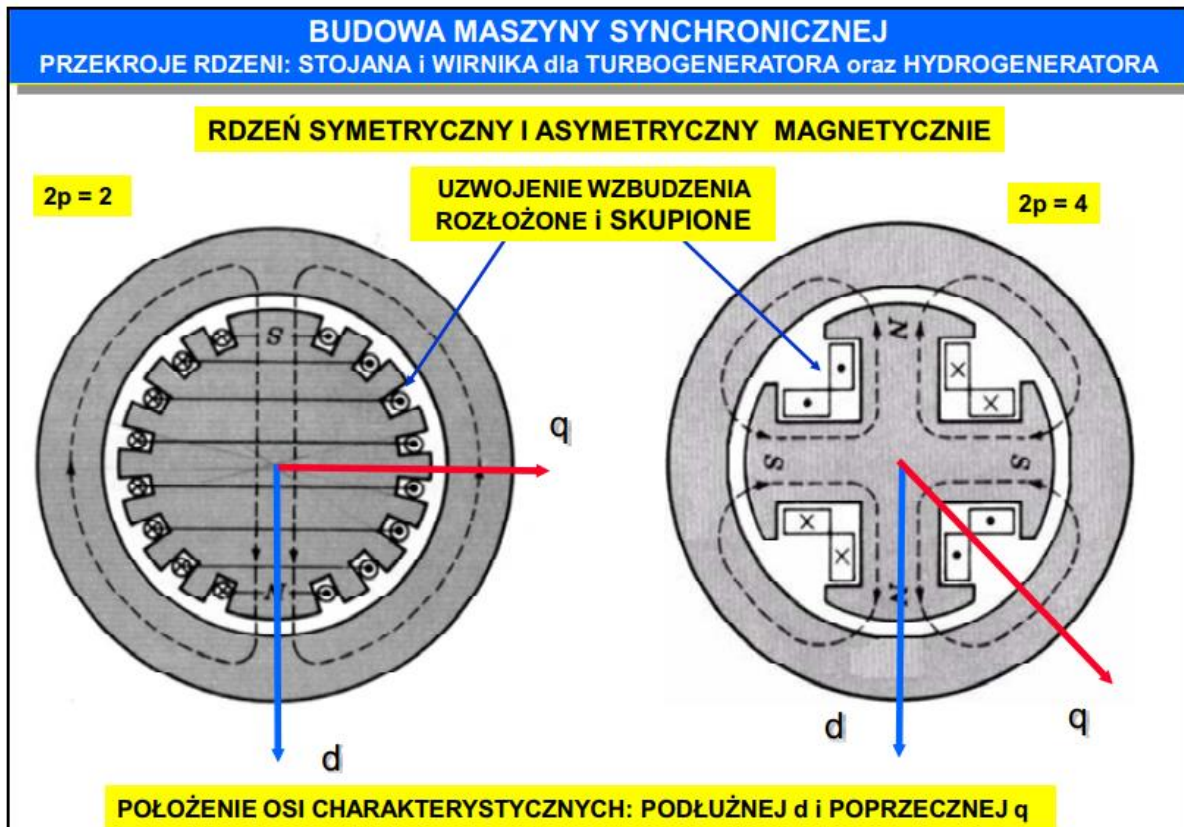
Stojan hydrogeneratora – Elektrownia Wodna we Włocławku

**BUDOWA MASZYNY SYNCHRONICZNEJ**  
**WIRNIK HYDROGENERATORA - WYDATNOBIEGUNOWY (BIEGUNY WYDATNE)**



Wirnik hydrogeneratora – Elektrownia Wodna we Włocławku

Na następnym rysunku przedstawiono przekroje rdzeni wirników: cylindrycznego oraz wydatno biegunowego. Uzwojenie wzbudzenia w wirniku cylindrycznym zabezpieczone jest przed działaniem sił odśrodkowych za pomocą klinów zamykających żłobki. Kliny te mogą jednocześnie spełniać funkcję klatek tłumiących. W przypadku wirnika wydatno biegunowego klatki tłumiące umieszczone są w żłobkach nabiegunnika. Klatki są zwarte poprzez pierścień na każdym nabiegunniku osobno lub na wszystkich razem.



Przekroje rdzeni stojana i wirnika dla turbogeneratorsa oraz hydrogeneratora



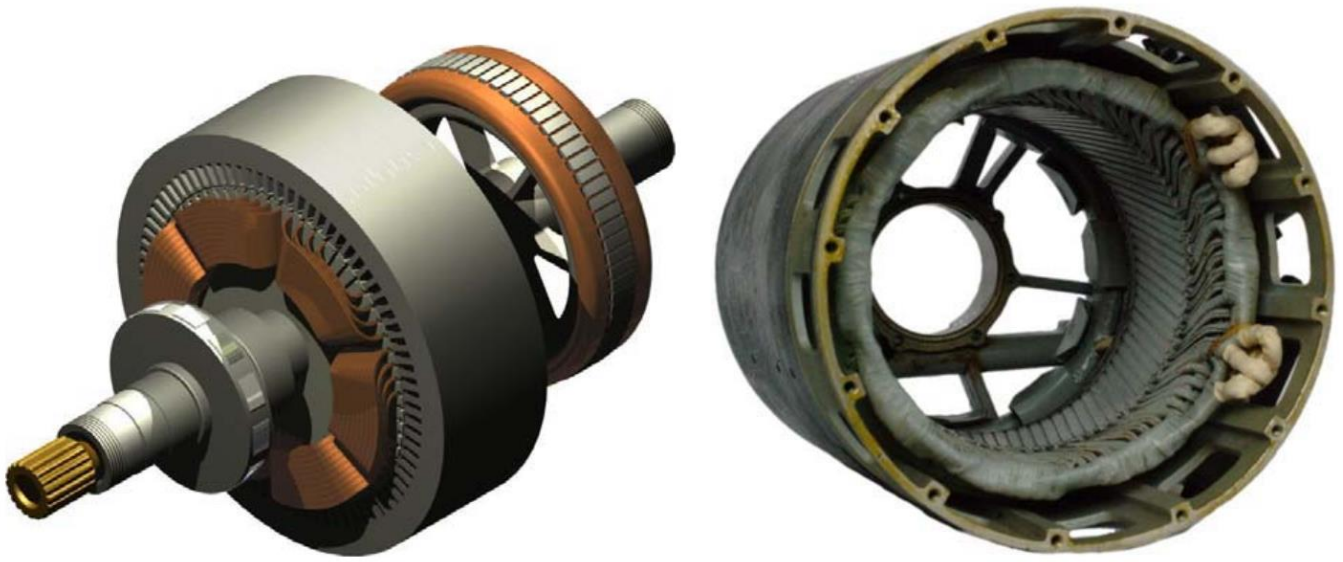
Na rysunku poniższym przedstawiono wykroje blach stojana i wirnika MS. Kształt żłobka stojana zależy od rodzaju użytych przewodów. Dla uzwojeń wykonanych z drutów o przekroju okrągłym stosuje się żobki o kształcie zaokrąglonym. Druty profilowane (o przekroju prostokątnym) łatwiej umieszczają w żłobkach prostokątnych



Wykroje blach rdzenia magnetycznego stojana i wirnika

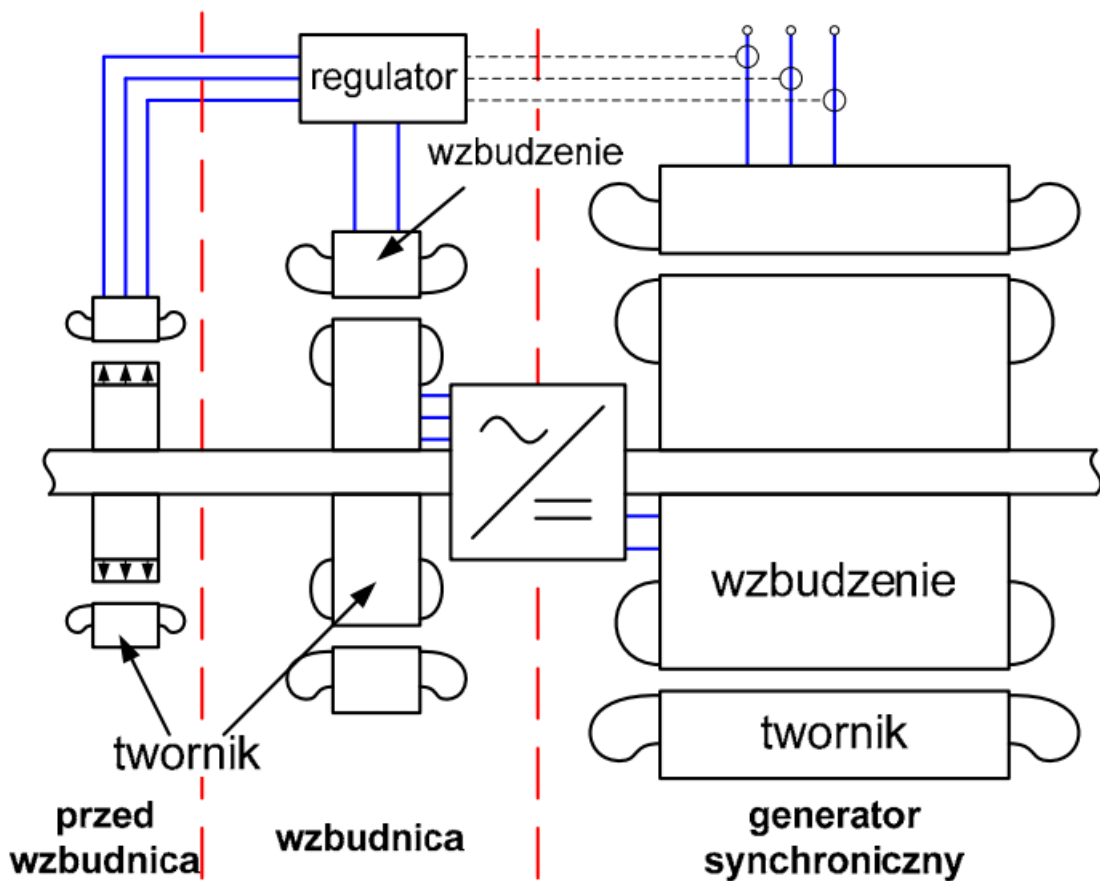


Wirnik nowoczesnego trójstopniowego generatora synchronicznego: a) na wspólnym wale znajdują się od lewej: wzbudzenie generatora z magnesami trwałymi, wzbudzenie głównego generatora, twornik wzbudnicy, b) twornik wzbudnicy z wirującym prostownikiem diodowym



Wirnik i stojan nowoczesnego trójstopniowego generatora synchronicznego

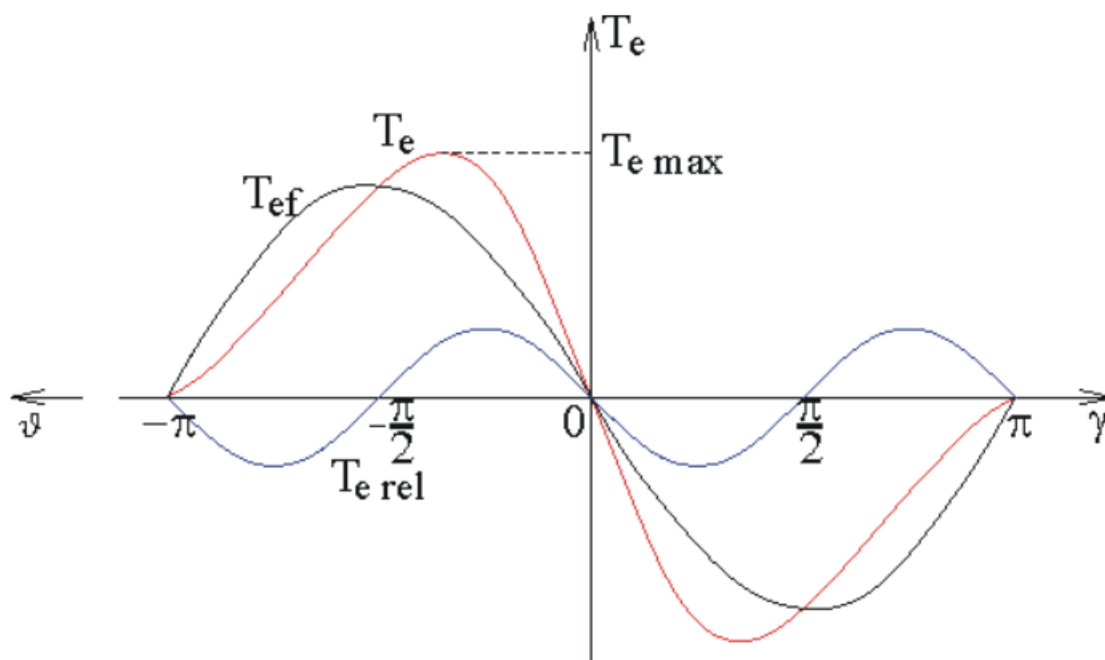
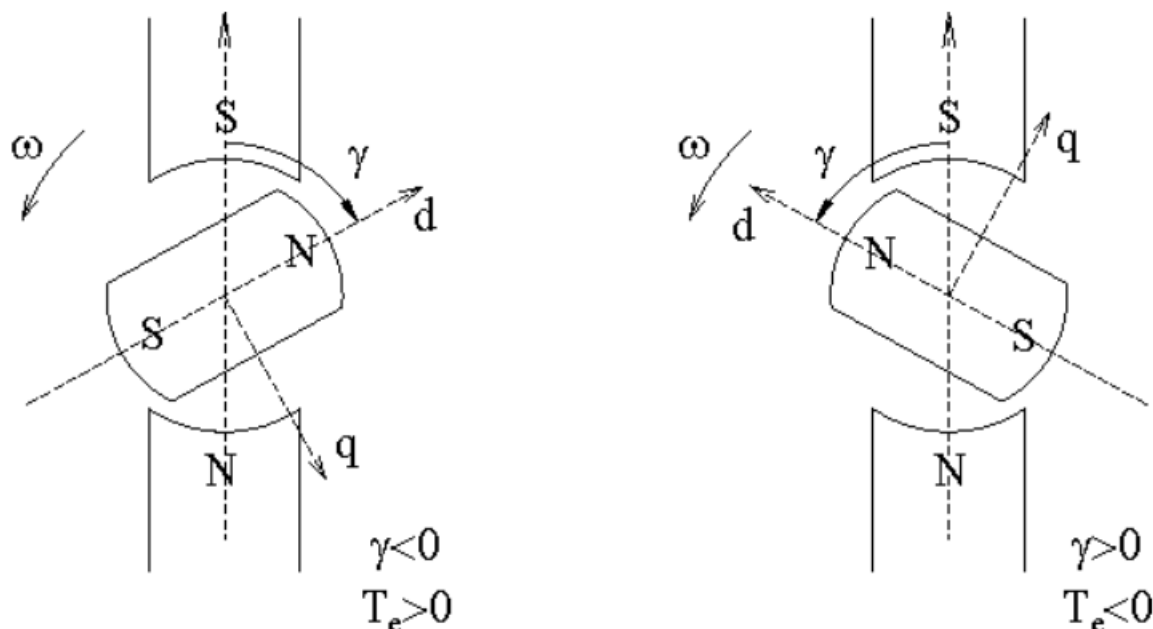
Uzwojenie wzbudzenia jest zasilane ze wzbudnicy poprzez wirujący prostownik diodowy. Wzbudnica to prądnicą synchroniczna odwrócona – uzwojenie wzbudzenia znajduje się na stojanie, a uzwojenie twornika na wirniku. Uzwojenie twornika wzbudnicy jest połączone bezpośrednio z wirującym prostownikiem. Uzwojenie wzbudzenia wzbudnicy zasilane jest poprzez regulator generatora (ang. generator control unit GCU) z prądnicą o magnesach trwałych



Schemat nowoczesnego trójstopniowe bezszczotkowe generatory synchroniczne

## PARAMETRY I CHARAKTERYSTYKI GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH

Przykładowo wypadkowe, dwubiegunowe pole magnetyczne twornika i dwubiegunowe pole magnetyczne wzbudzenia, nieruchome w stanie ustalonym względem siebie, można zastąpić dwoma układami biegunów N-S, układami wirującymi synchronicznie z prędkością  $\omega$ . Na rysunku tym kąt  $\gamma$  oznacza kąt między osią wypadkowego pola wirującego i osią biegunów magnetyczny, a dokładnie oznacza kąt fazowy między fazorem napięcia indukowanego  $U_{if}$  w uzwojeniu twornika przez pole wzbudzenia i fazorem napięcia stojana  $U_1$ .

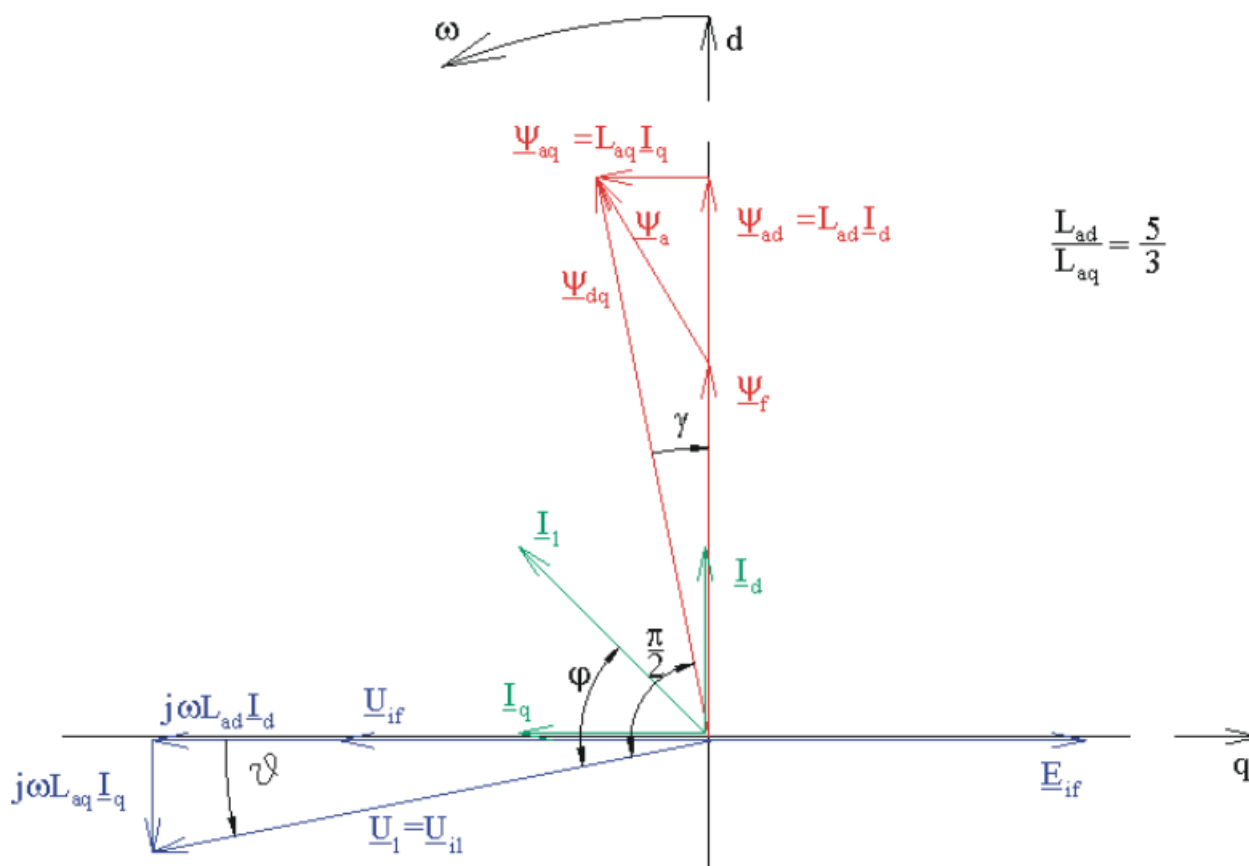


Charakterystyka kątowna statycznego momentu elektromagnetycznego maszyny synchronicznej o jawnobiegunowym wirniku.

$$T_e = \frac{p m}{\omega 2} \left( \frac{U_1 U_{if}}{X_{ad}} \sin \vartheta + \frac{X_{ad} - X_{aq}}{2 X_{ad} X_{aq}} U_1^2 \sin 2\vartheta \right)$$

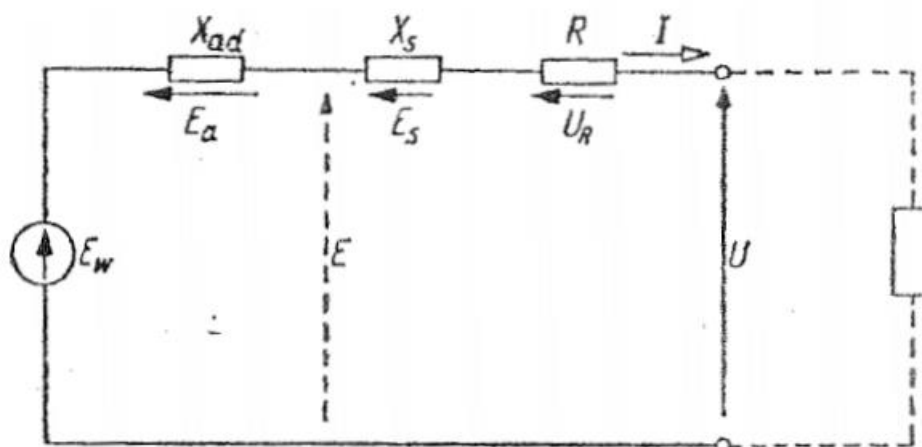
kąt  $\vartheta$  nazywa się **kątem obciążenia** i jest miarą przesunięcia fazowego między fazorem  $U_{if}$  napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika przez pole wzbudzenia, a fazorem napięcia zasilającego  $U_1$ .

Natomiast położenie wirnika określone jest przez kąt  $\gamma$ , mierzony od osi wypadkowego pola wirującego do osi podłużnej wirnika. W zakresie pracy silnikowej i przy pominięciu rezystancji i reaktancji rozproszenia pasma uzwojenia twornika, będzie:  $\vartheta = -\gamma$

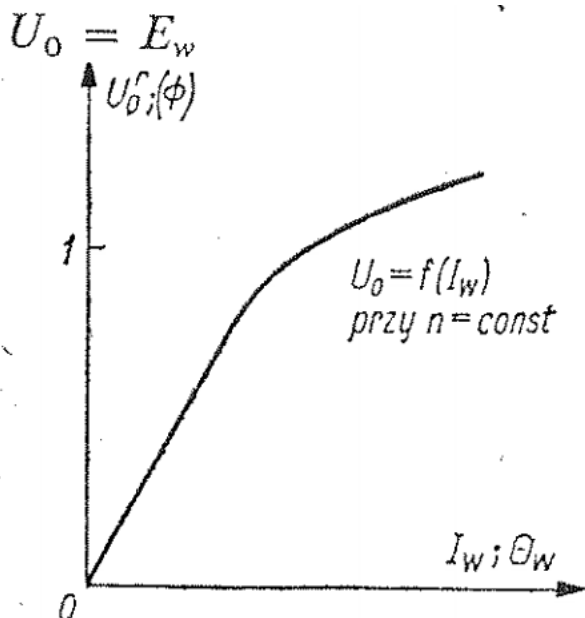


$$\frac{L_{ad}}{L_{aq}} = \frac{5}{3}$$

Schemat zastępczy



- $E_w$  — napięcie indukowane w uzwojeniu twornika przez strumień  $\Phi_w$ ;
- $X_{ad}$  — reaktancja oddziaływania twornika, odpowiadająca strumieniowi  $\Phi_a$ , który indukuje w uzwojeniu twornika napięcie  $E_a$ ;
- $X_s$  — reaktancja rozproszenia twornika, odpowiadająca strumieniowi  $\Phi_s$ , który indukuje w uzwojeniu twornika napięcie  $E_s$ ;
- $R$  — rezystancja uzwojenia twornika.



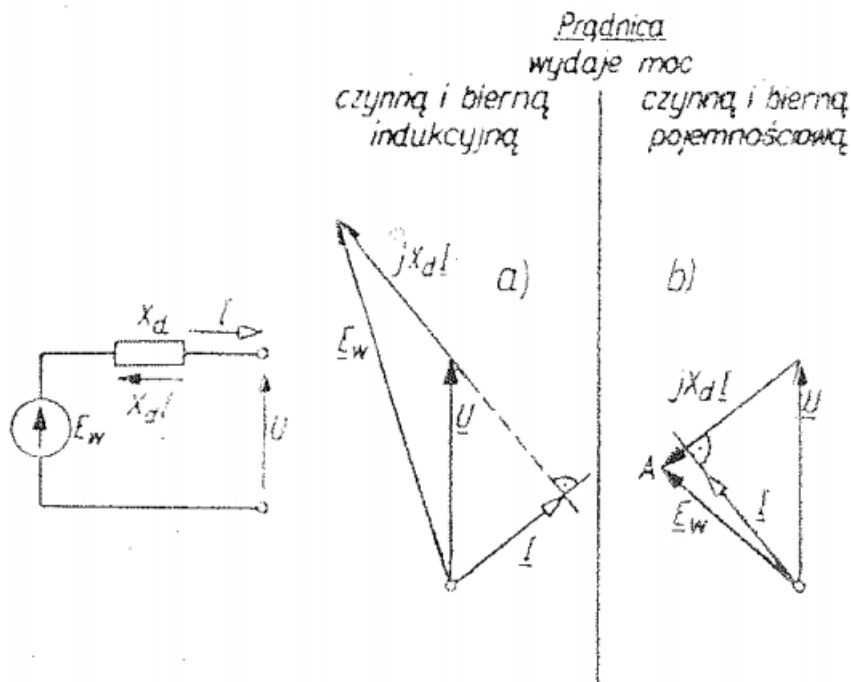
Charakterystyka biegu jałowego prądnicy

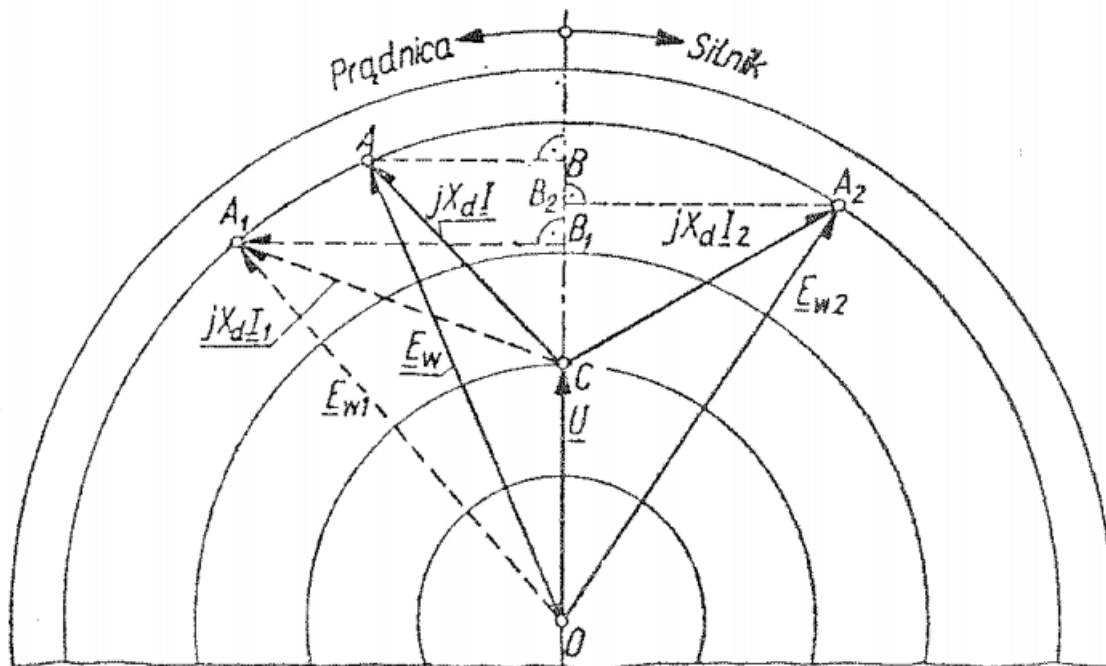
$$E_w = 4.44k_u z f \Phi$$

$$\underline{U} \approx \underline{E}_w - jX_d \underline{I}$$

Przy znamionowych warunkach

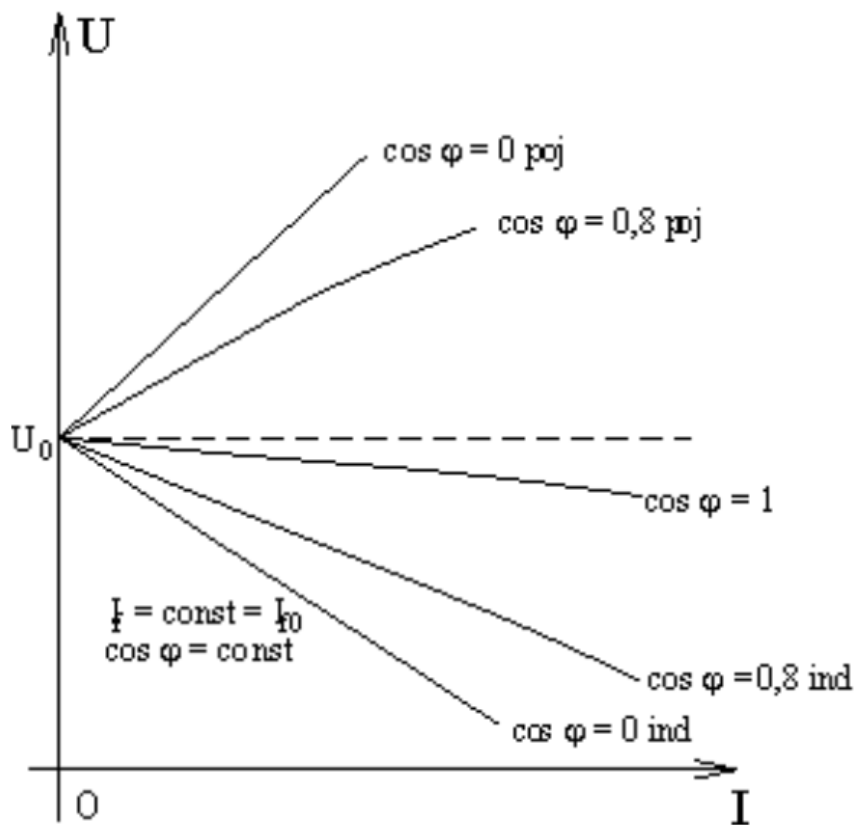
$$E_w^r \approx 2 \dots 2,5$$



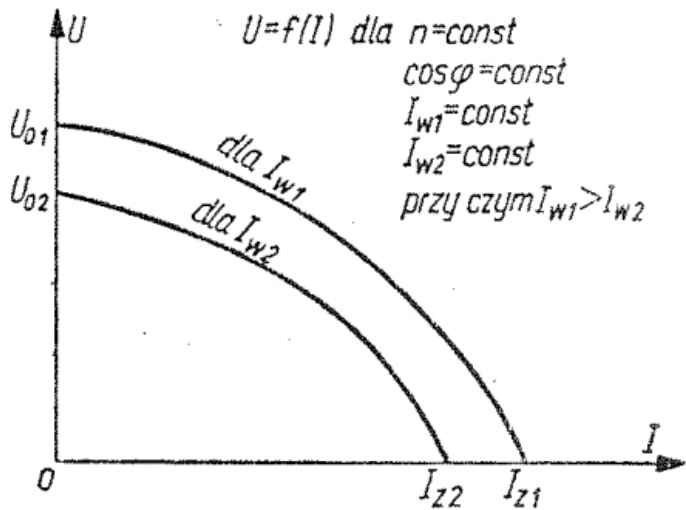


Praca maszyny przy  $U = \text{const}$ ,  $I_w = \text{const}$ ,  $P = \text{var}$

**Charakterystyki zewnętrzne – czyli zależność napięcia prądniczy od prądu obciążenia, przy stałym prądzie wzbudzenia i stałym współczynniku mocy**

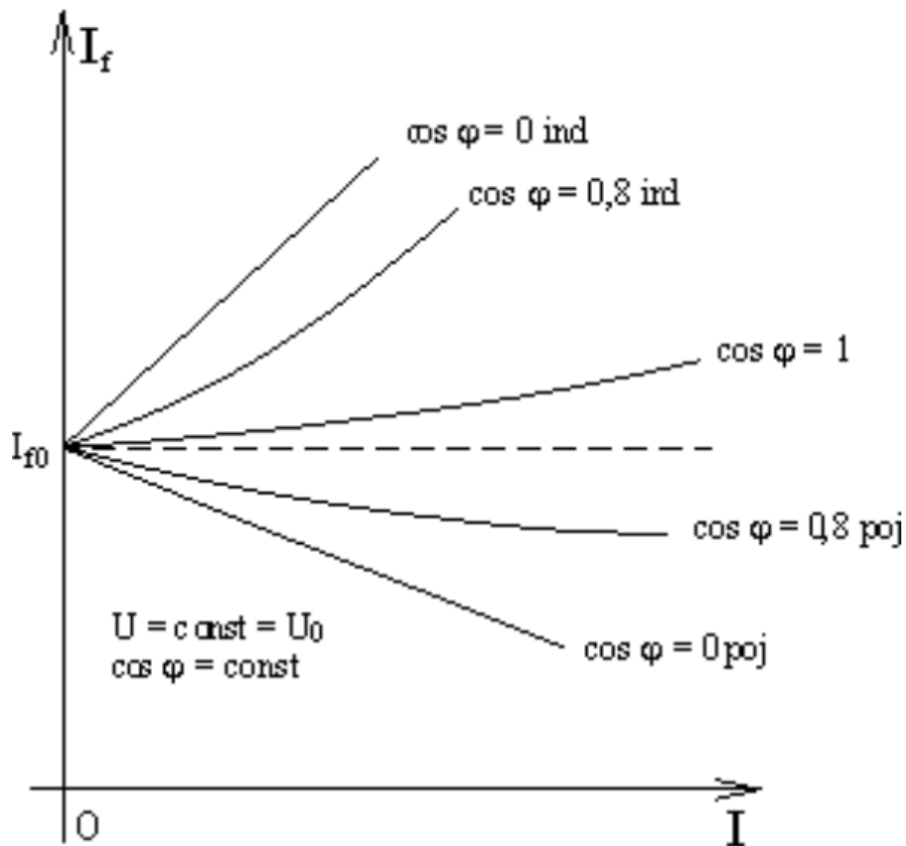


Charakterystyki zewnętrzne

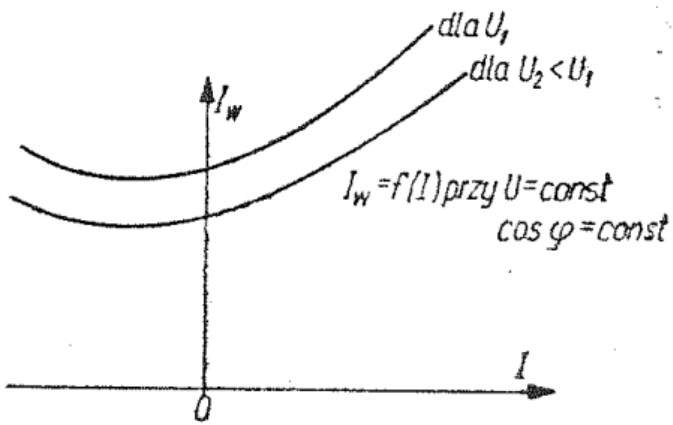


Charakterystyki zewnętrzne przy różnych prądach wzbudzenia ( $I_{w1} > I_{w2}$ )

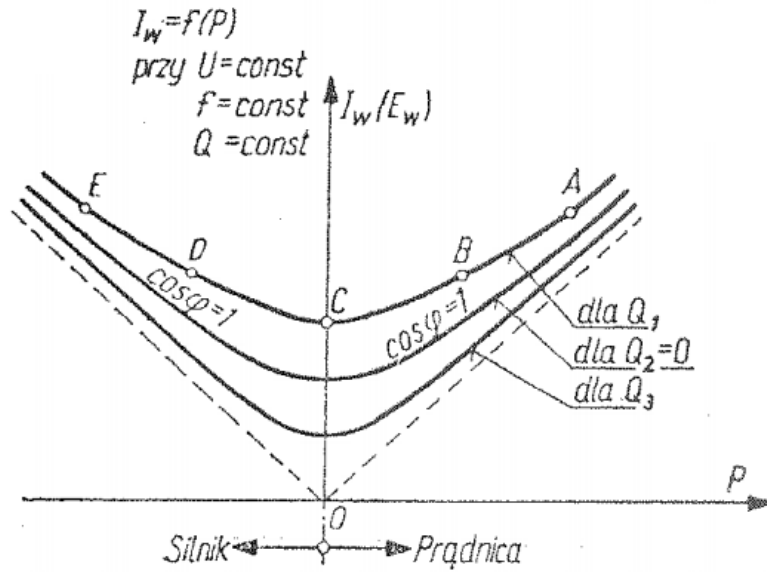
**Charakterystyki regulacyjne – czyli zależność prądu wzbudzenia od prądu obciążenia, przy stałym napięciu prądnicy i stałym współczynniku mocy.**



Charakterystyki regulacyjne

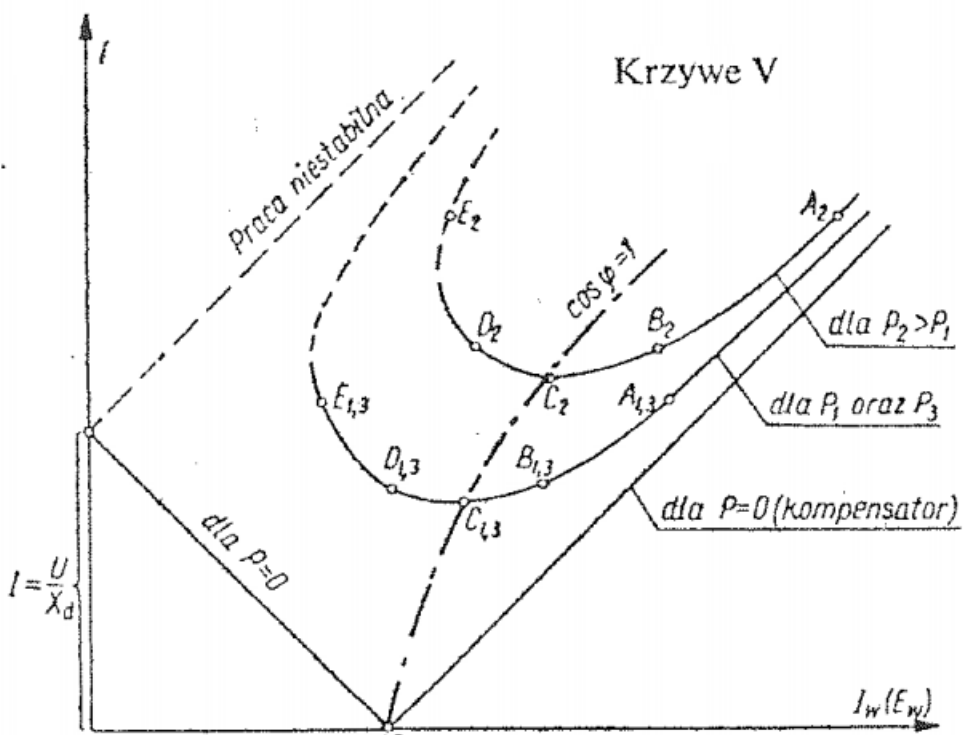


Charakterystyki regulacji przy różnych napięciach



Odmiana charakterystyki regulacji:  $I_w = f(P)$  przy  $U = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ ,  $Q = \text{const}$ : rodzina charakterystyk przy różnych wartościach mocy biernych ( $Q_1, Q_2, Q_3$ )

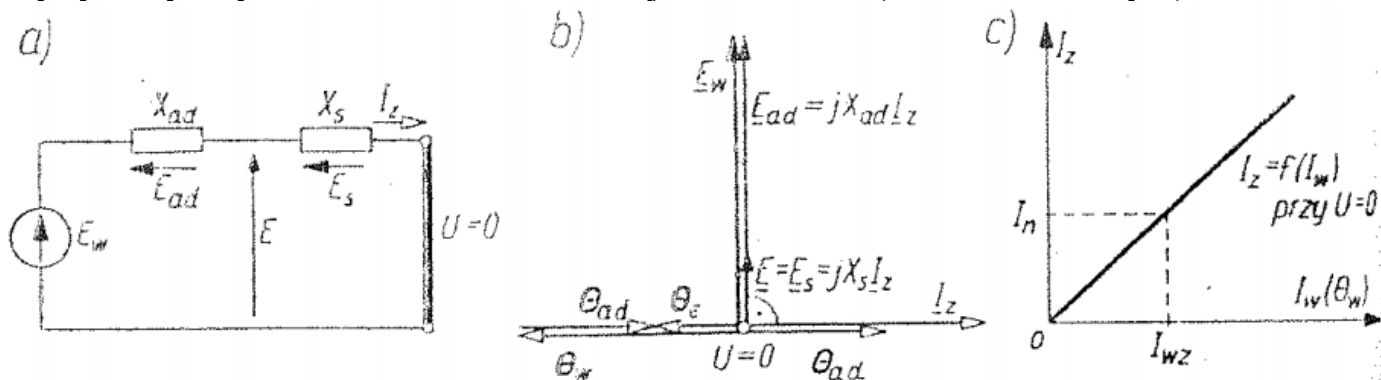
### Krzywe V





## Charakterystyka zwarcia

Charakterystyką zwarcia nazywamy zależność prądu twornika  $I$  od prądu wzbudzenia  $I_w$  przy symetrycznym zwarciu zacisków uzwojenia twornika (w stanie ustalonym).



$E_w$  w stanie zwarcia przy prądzie znamionowym jest w typowych maszynach rzędu 10... 15% napięcia znamionowego.

Stosunek zwarcia

$$k_w = \frac{I_{w0}}{I_{wz}}$$

$I_{w0}$  - prąd wzbudzenia potrzebny do uzyskania napięcia znamionowego przy biegu jałowym

$I_{wz}$  - prąd wzbudzenia, przy którym w stanie zwarcia płynie w uzwojeniu twornika prąd znamionowy.

Stosunek zwarcia przybiera wartości w granicach od 0,5 do 1, Stosunek zwarcia największych turbogeneratorów jest jeszcze mniejszy (np. 0,3).

## Diagram eksploatacyjny

Zasady poprawnej eksploatacji generatorów synchronicznych są omówione w **Ramowej Instrukcji Eksploatacji Generatorów Synchronicznych (RIEGS)**.

W rozdziale pierwszym przedstawiono zawartość RIEGS, zakres stosowania i zasady konstruowania wykresu granicznych obciążeń generatora.

W rozdziale drugim omówiono problematykę dopuszczenia generatora do uruchomienia. Instrukcja wyróżnia tu cztery punkty.

- W punkcie 2.1 zdefiniowano warunki dopuszczenia generatora do uruchomienia. Podstawowym warunkiem jest zakończenie wszystkich prac montażowych na generatorze i układach pomocniczych, przy czym poprawność wykonania tych prac należy potwierdzić protokołami badań i prób pomontażowych.
- W punkcie 2.2 zestawiono wszystkie prace związane z przygotowaniem generatora do uruchomienia.
- Punkt 2.3 zawiera opis czynności i sposobu postępowania w czasie rozruchu i wzbudzenia generatora.
- Punkt 2.4 poświęcono próbom generatora prądem i napięciem pierwotnym oraz próbom układu synchronizacji.

Rozdział 3 obejmuje zagadnienia ruchowe. Jest to najobszerniejszy i zasadniczy rozdział RIEGS, który zawiera dziewięć punktów.

- W punkcie 3.1 omówiono problematykę dokumentacji ruchowo-eksploatacyjnej generatora. W punkcie 3.2 omówiono czynności związane z uruchomieniem generatora, zwiększaniem prędkości obrotowej wirnika i synchronizację.

- W punkcie 3.3 omówiono obsługę generatora w ruchu.
- Punkt 3.4 poświęcono parametrom znamionowym, parametrom pracy trwale dopuszczalnym i ich kontroli.
- W punkcie 3.5 opisano nienormalne stany pracy generatora, w tym jego przeciążenie.
- W punkcie 3.6 przedstawiono typowe przypadki awaryjne generatora i postępowanie obsługi.
- W punkcie 3.7 podano sygnały alarmowe, identyfikację zakłóceń i sposób postępowania.
- Punkt 3.8 zawiera opis czynności przy zatrzymaniu generatora.
- Punkt 3.9 dotyczy elektroenergetycznych zabezpieczeń generatora.

Rozdział 4 jest poświęcony diagnostyce i ocenie stanu technicznego generatora. Omówiono badania stojana i wirnika generatora na postoju oraz badania na obrotach, w sumie 24 próby i pomiary. Instrukcje przeprowadzenia badań i ocena wyników badań są zawarte w załącznikach i dodatkach.

Z badań off-line wykonywanych na postoju wyróżnia się:

- badanie napięciem stałym,
- badanie wyładowań niezupełnych,
- pomiar pojemności izolacji i współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$

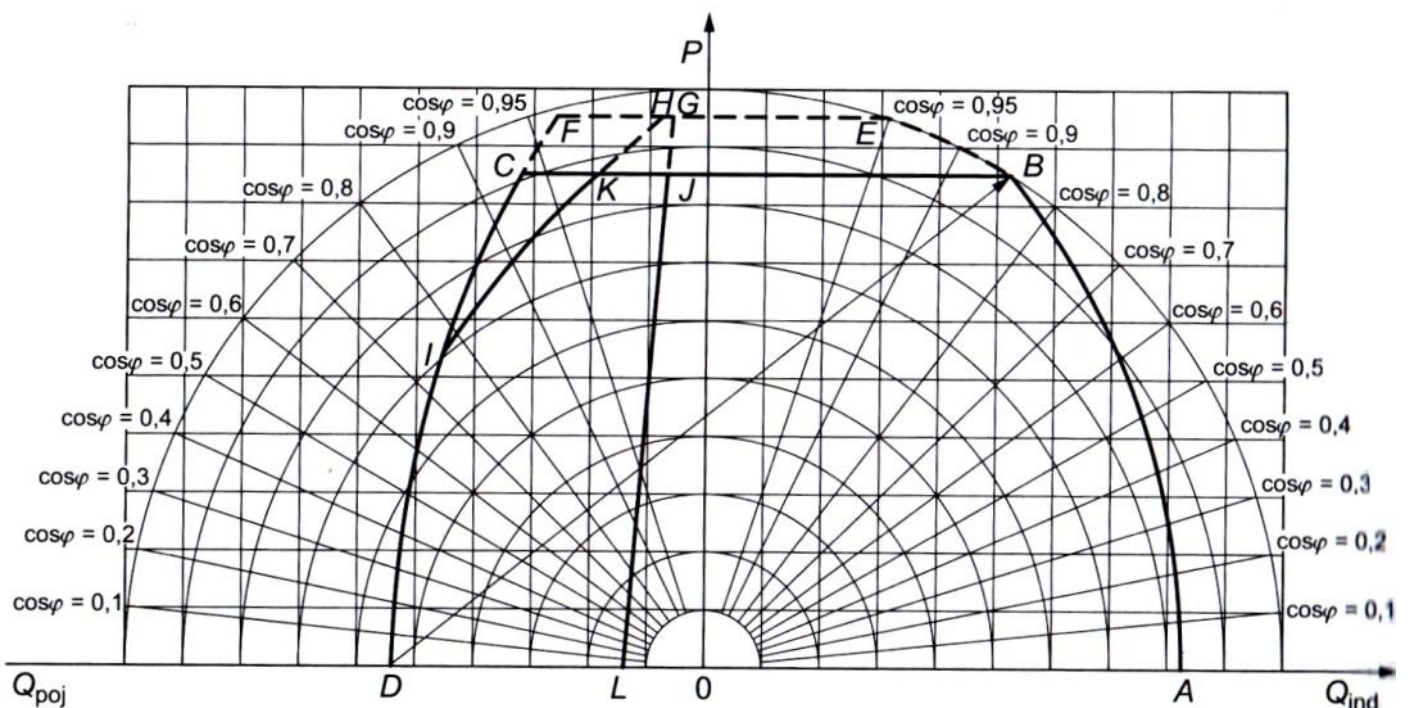
Z badań na obrotach wyróżniają się pomiary:

- charakterystyki biegu jałowego,
- charakterystyki 3-izowego zwarcia ustalonego,
- próba nagrzewania,
- pomiary wibroakustyczne.

Rozdział 5 jest poświęcony przeglądom i remontom generatora.

W rozdziale 6 omówiono problematykę bezpieczeństwa pracy oraz ochrony przeciwporażeniowej i przeciwpożarowej.

Rozdział 7 obejmuje dokumentację eksploatacyjną, zagadnienia ubezpieczeniowe, przepisy podstawowe, normy i dokumenty związane.



Punkt B na wykresie determinują parametry znamionowe maszyny synchronicznej. Okrąg o największym promieniu odpowiada znamionowej mocy pozornej maszyny  $S_N$ . Współrzędna punktu B: na osi rzędnych odpowiada znamionowej mocy czynnej  $P_N$ , a na osi odciętych odpowiada znamionowej mocy biernej  $Q_N$ .

Obciążenie maszyny synchronicznej jest dopuszczalne wewnątrz obszaru ograniczonego liniami pogrubionymi:

- linia AB jest determinowana przez znamionowy prąd wzbudzenia,
- odcinek BC ogranicza moc znamionową turbiny,
- odcinek EF odpowiada mocy maksymalnej turbiny,
- linia przerywana BEFC ogranicza dopuszczalne chwilowe przeciążenia,
- linia FCID ogranicza dopuszczalny zakres pracy przy niedowzbudzeniu (z sieci jest pobierana moc indukcyjna), przekroczenie tej linii powoduje wypadnięcie maszyny z synchronizmu, jest to linia graniczna stabilności pracy w stanie ustalonym
- linia 1KH jest determinowana dopuszczalną temperaturą elementów konstrukcyjnych stref czołowych generatora przy pracy z niedowzbudzeniem,
- linia LJG określa granicę stabilności dynamicznej, jest ona ustalana z pewnym marginesem bezpieczeństwa w stosunku do linii HKID.

Maszyna synchroniczna może pracować, w sposób ciągły, ze znamionową mocą pozorną tylko na łuku okręgu BE, jeśli umożliwia to układ mechaniczny.

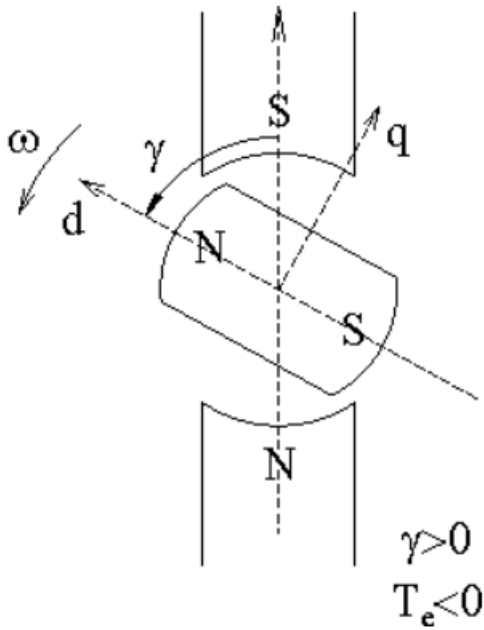
Podobny wykres obowiązuje dla pracy silnikowej maszyny synchronicznej.

Ramowa Instrukcja Eksploatacji Generatorów Synchronicznych jest podstawą do opracowania instrukcji stanowiskowych każdego z generatorów. Instrukcje stanowiskowe powinny uwzględniać istniejące lokalne ograniczenia, na przykład ograniczenia obciążenia wynikające z dopuszczalnej temperatury szczotek i pierścieni ślizgowych lub z powodu zmiany warunków chłodzenia. W instrukcjach stanowiskowych poziom dopuszczalnego obciążenia maszyny zaleca się wyznaczać doświadczalnie.

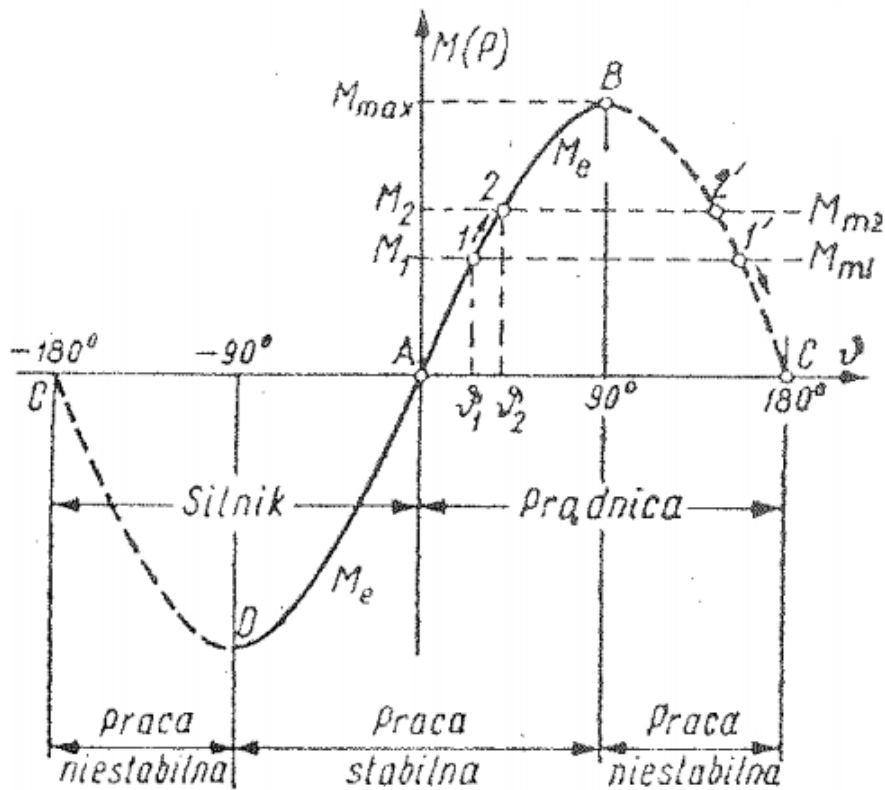
Maszyna synchroniczna, zarówno przy pracy silnikowej, jak i prądnicowej, z uwagi na przeciążalność momentem i stabilność pracy, powinna pracować przy przewzbudzeniu. Maszyna przewzbudzona generuje do sieci elektroenergetycznej, oprócz mocy czynnej, także moc bierną indukcyjną ( $Q_L > 0$ ). Przewzbudzenie daje gwarancję stabilnej pracy maszyny, jest to szczególnie istotne w silnikach synchronicznych, przy skokowych zmianach momentu obciążenia silnik nie wypada z synchronizmu.

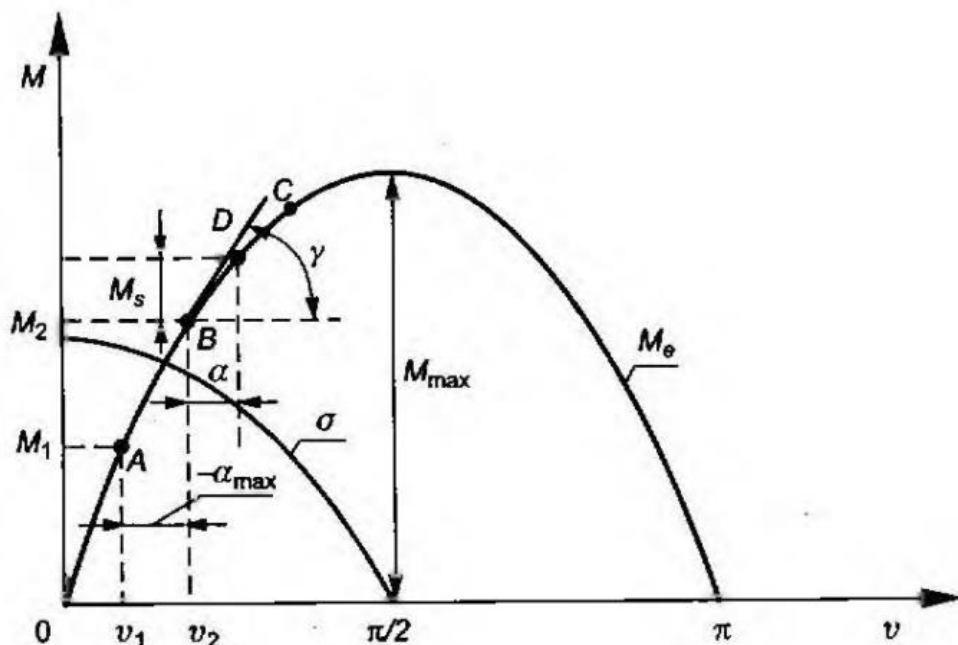
## Kołysania i stabilność pracy równoległej

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_t - M_e}{J}$$

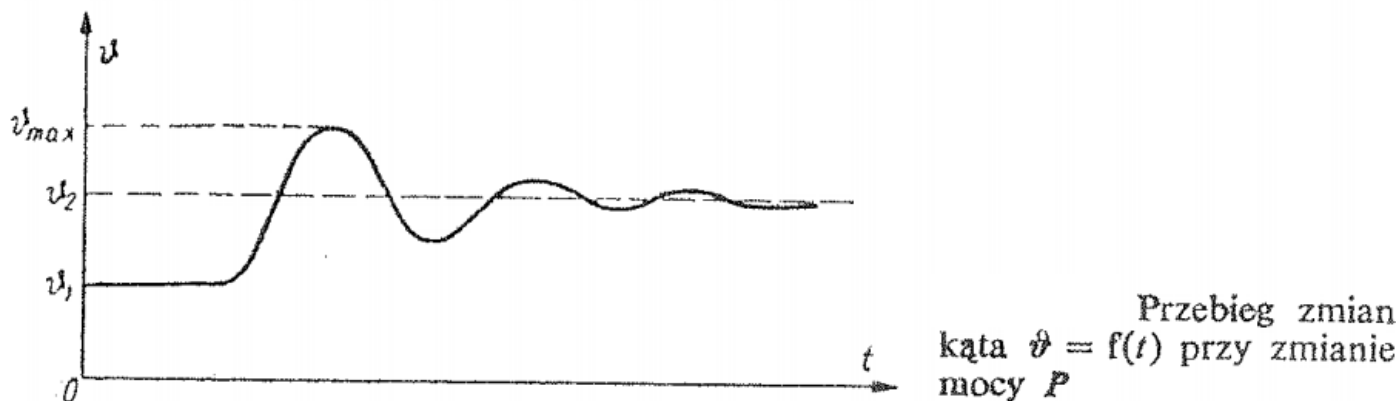


$$M_e = \frac{m}{2\pi n_1} \left[ \frac{UE_f}{X_d} \sin \vartheta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin 2\vartheta \right]$$





Moment elektromagnetyczny  $M_e$  i jednostkowy moment synchronizujący  $M_s$  generatora z cylindrycznym wirnikiem przy zadanej wartości wzbudzenia



W dowolnym punkcie D podczas oscylacji na wirnik wychylony o kąt  $\alpha$  od położenia równowagi działa moment  $M_s$  przeciwdziałający wychyleniu. Moment ten nazywamy *momentem synchronizującym*.

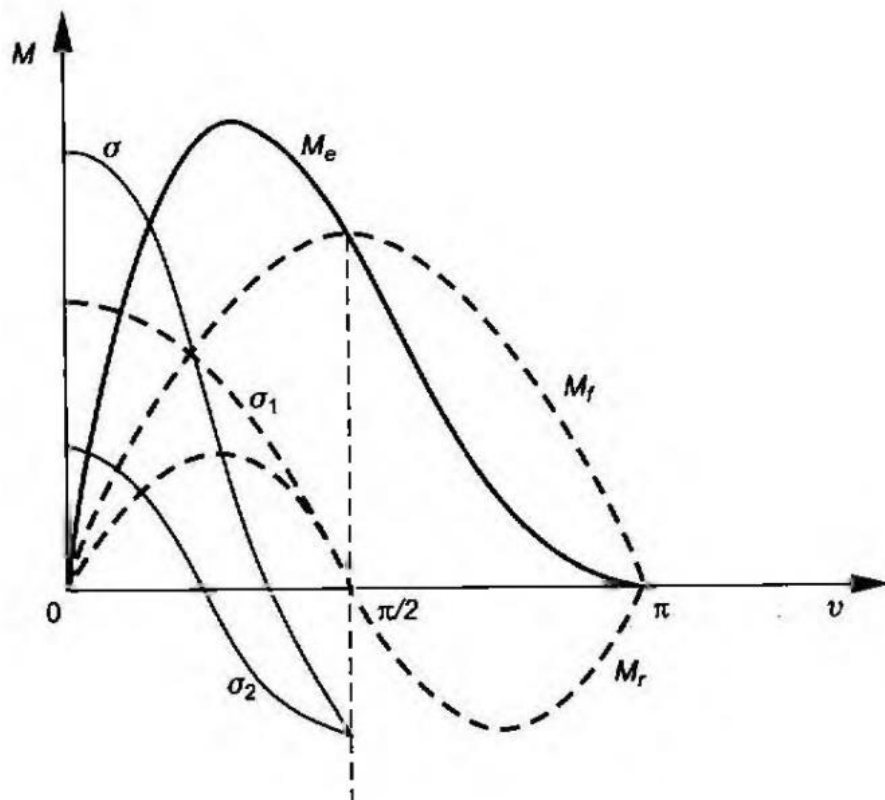
Dla generatora z biegunami utajonymi

$$M_s = \alpha \frac{dM_e}{d\vartheta} = \alpha \frac{m}{2\pi n_1} \frac{UE_f}{X_s} \cos \vartheta = \alpha \sigma$$

$$\sigma = \frac{m}{2\pi n_1} \frac{UE_f}{X_s} \cos \vartheta$$

Dla generatora z biegunami wydajnymi

$$\sigma = \frac{m}{2\pi n_1} \left[ \frac{UE_f}{X_d} \cos \vartheta + \frac{2U^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\vartheta \right]$$



Charakterystyka kątowna momentów składowych i wypadkowego momentu elektromagnetycznego generatora z wydatnymi biegunami wraz z odpowiadającymi im momentami synchronizującymi

Największy moment synchronizujący występuje dla kąta obciążenia  $v = 0$ , co oznacza, że przy biegu jałowym maszyna najsilniej utrzymuje się w synchronizmie. Dla kąta  $v = \pi/2$  moment  $a = 0$ , co oznacza, że przy obciążeniu momentem maksymalnym maszyna najslabiej utrzymuje się w synchronizmie. Znak momentu synchronizującego jest miarą stabilności statycznej maszyny synchronicznej. Dla  $a > 0$  (moment synchronizujący dodatni) - mamy zakres pracy stabilnej generatora;  $a < 0$  oznacza zakres pracy niestabilnej.

### Kołysania generatora synchronicznego

Moment elektromagnetyczny przy stałym wzbudzeniu zależy tylko od kąta obciążenia. W warunkach nierównowagi kąt obciążenia równa się  $(v + \alpha)$ . Wówczas, przy założeniu stanu quasi-ustalonego, moment elektromagnetyczny w rozważanej chwili wyraża się zależnością (maszyna z cylindrycznym wirnikiem)

$$M_e = \frac{m}{2\pi n_1} \frac{UE_f}{X_d} \sin(\vartheta + \alpha) = \frac{m}{2\pi n_1} \frac{UE_f}{X_d} (\sin \vartheta \cos \alpha + \cos \vartheta \sin \alpha)$$

$$M_e \approx \frac{m}{2\pi n_1} \frac{UE_f}{X_d} \sin \vartheta + \alpha \frac{m}{2\pi n_1} \frac{UE_f}{X_d} \cos \vartheta = M_{eu} + a\sigma$$

gdzie:  $M_{eu}$  - moment elektromagnetyczny w warunkach ustalonych,  $a\sigma$  - moment synchronizujący

Moment dynamiczny działający na wirnik generatora w stanie nierównowagi opisuje ogólna zależność

$$M_d = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Zatem przyrost w czasie mechanicznej prędkości kątowej wynosi

$$\Delta\Omega = \frac{1}{p} \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$$

Stąd otrzymujemy przyspieszenie kątowe

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

$$M_d = \frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

Podczas kołysań wirnika względem punktu równowagi występuje zjawisko tłumienia mechanicznego (powodowane np. tarcie w łożyskach) i elektromagnetycznego. Tłumienie elektromagnetyczne wynika stąd, że pręty uzwojenia tłumiącego wirnika przecinają pole magnetyczne stojana. W prętach powstają prądy, które oddziałując z polem magnetycznym stojana dają moment tłumiący  $M_t$ . Moment ten powstaje w sposób identyczny jak w maszynie indukcyjnej, a zatem jest proporcjonalny do poślizgu wynikającego z powolnych oscylacji wirnika. Dlatego jest on również nazywany momentem asynchronicznym. W klatce tłumiącej (a także w masywnych elementach biegunów) jest indukowana SEM proporcjonalna do prędkości kątowej wirnika względem pola wirującego

$$e_t = k_1 \frac{d\alpha}{dt}$$

Prąd w klatce

$$i_t = \frac{k_1}{R_t} \frac{d\alpha}{dt}$$

Moment tłumiący powstaje na skutek oddziaływania strumienia twornika i prądu w klatce

$$M_t = k_t \frac{d\alpha}{dt}$$

Ostatni składnik wymieniony wyżej w bilansie momentów dla stanu elektrodynamicznego generatora przy małym poślizgu, *moment strat*  $M_o$  jest momentem wynikającym ze strat mechanicznych powodowanych tarcie w łożyskach oraz tarcie wentylacyjnym. Zakładamy, że moment ten pozostaje stały zarówno w warunkach pracy ustalonej, jak i w warunkach oscylacji wirnika.

W warunkach stanu elektrodynamicznego nieustalonego na wał generatora z jednej strony działa moment napędowy mechaniczny, a z drugiej wszystkie pozostałe momenty

$$M_m = M_o + M_{eu} + \sigma\alpha + k_t \frac{d\alpha}{dt} + \frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2}$$

W warunkach ustalonych obowiązuje zależność

$$M_m = M_o + M_{eu}$$

Zatem stan oscylacji elektromagnetycznych wirnika generatora wynika z zerowego bilansu momentów, opisanego równaniem różniczkowym w postaci

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + k_t \frac{d\alpha}{dt} + \sigma\alpha = 0$$

Rozpatrzmy wstępnie *przypadek teoretyczny przy pominięciu obwodów tłumiących maszyny*, tzn. zakładając  $k_t = 0$ .

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \sigma\alpha = 0$$

Rozwiązanie ogólne tego równania

$$\alpha = C_1 \sin \gamma t + C_2 \cos \gamma t$$

gdzie:  $C_1$   $C_2$  - stałe wynikające z warunków początkowych zjawiska,  $\gamma$  - pulsacja drgań nietłumionych równa urojonej części pierwiastka równania charakterystycznego rozważanego równania.

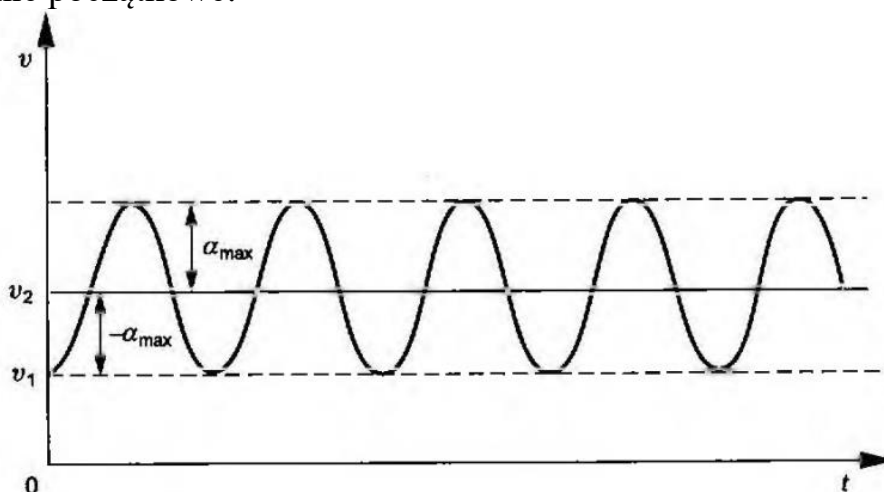
Pulsacja drgań nietłumionych jest określona wzorem

$$\gamma = \sqrt{\frac{p\sigma}{J}}$$

Zatem ostateczne rozwiązanie równania różniczkowego ma postać

$$\alpha = -\alpha_{\max} \cos \gamma t$$

$\alpha_{\max}$  - wychylenie początkowe.



Częstotliwość oscylacji własnych nietłumionych  $\nu_o$

$$\nu_o = \frac{1}{2\pi} \gamma = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p\sigma}{J}}$$

Stała czasowa przyspieszenia lub inaczej stała czasowa mechaniczna  $T_j$  zespołu wirującego generatora i turbiny



$$T_J = \frac{J\Omega_1^2}{P_N} = \frac{J(2\pi n_1)^2}{P_N} = \frac{J\omega_1^2}{p^2 P_N}$$

Określa ona czas, w ciągu którego zespół maszynowy nieobciążony, będący wcześniej w spoczynku, osiąga pod działaniem momentu mechanicznego o wartości  $M_N$  prędkość synchroniczną

Jeżeli do wyrażenia na częstotliwość oscylacji własnych nietłumionych podstawić obowiązujące dla generatora cylindrycznego zależności

$$v_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_1}{T_J} \frac{I_f}{I_{fk}}}$$

Zatem częstotliwość oscylacji nietłumionych zależy od wartości stałej czasowej mechanicznej i od wzbudzenia generatora. Przyjmując przykładowo dla turbozespołu współpracującego z turbiną parową wartość stałej czasowej 10 s oraz  $f = 50$  Hz, otrzymujemy dla obciążenia znamionowego generatora, przy którym  $I_f \sim 1,5 I_{fk}$  wartość równą

$$v_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50}{10} \cdot 1,5} = 1,1 \text{ Hz}$$

Podobnie dla biegu jałowego (przy przyjęciu  $I_{f0} \sim 0,7 I_{fk}$ ) otrzymamy  $v_o = 0,75$  Hz. Można zatem stwierdzić, że przy przechodzeniu generatora od stanu biegu jałowego do stanu obciążenia znamionowego następuje wzrost częstotliwości oscylacji własnych o około 40%. Zwykle częstotliwość oscylacji własnych nietłumionych generatora jest zawarta w granicach (0,5+1,5) Hz.

Rozpatrzmy teraz *przypadek rzeczywistych kołysań własnych generatora przy uwzględnieniu obwodów tłumiących* w wirniku. Rozwiązanie równania opisującego ruch wirnika ma wówczas postać

$$\alpha = C_3 e^{r_1 t} + C_4 e^{r_2 t}$$

gdzie:  $C_3, C_4$  - stałe wynikające z warunków początkowych zjawiska;  $r_1, r_2$  - pierwiastki równania charakterystycznego rozwiązane równania różniczkowego w postaci

$$\frac{Jr^2}{p} + k_t r + \sigma = 0$$

W rozwiązaniu równania charakterystycznego mogą zachodzić trzy przypadki

a)  $k_t^2 - \frac{4J\sigma}{p} < 0$ , wtedy występują dwa pierwiastki zespolone;

b)  $k_t^2 - \frac{4J\sigma}{p} > 0$ , wówczas otrzymujemy dwa pierwiastki rzeczywiste;

c)  $k_t^2 - \frac{4J\sigma}{p} = 0$ , co daje jedno rozwiązanie (dwa pierwiastki o takiej samej wartości).

*Przypadek a*

$$\alpha = \left( \frac{k_t \alpha_{\max}}{\sqrt{4 \frac{J\sigma}{p} - k_t^2}} \sin bt - \alpha_{\max} \cos bt \right) e^{\frac{k_t}{2J} t}$$

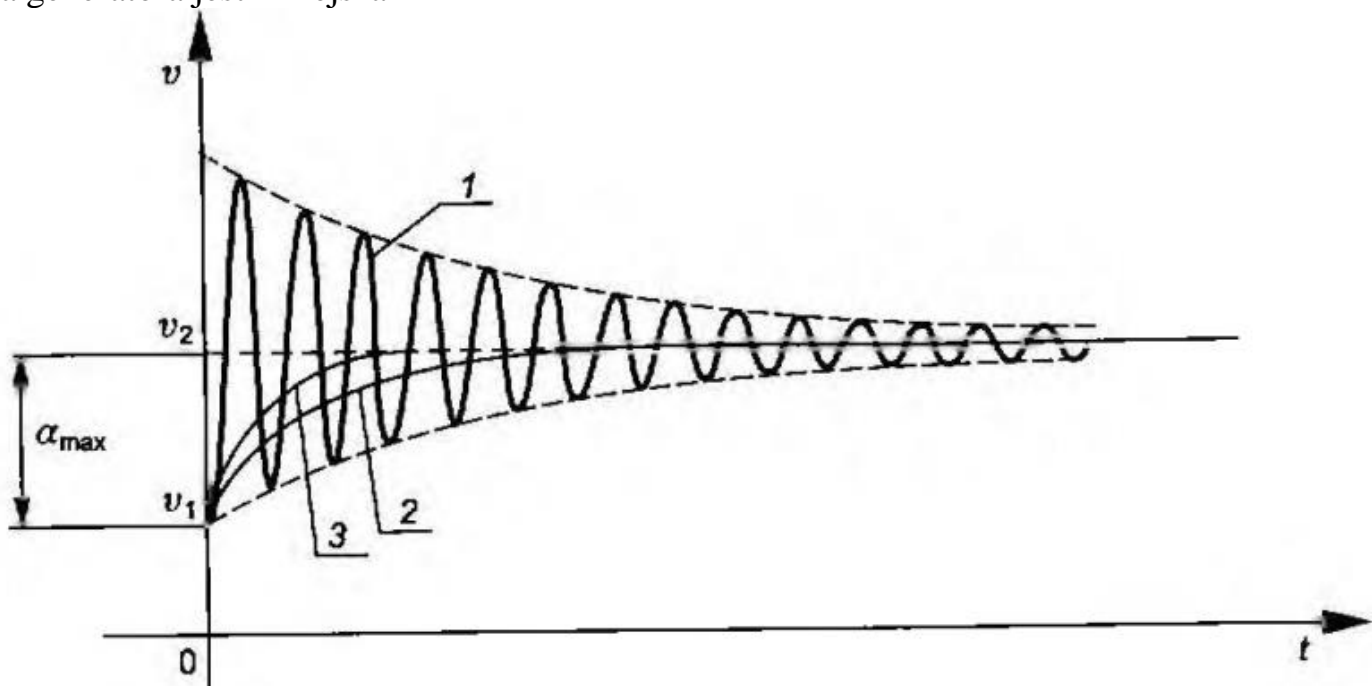
Jest to zależność opisująca ruch harmoniczny o zmniejszającej się amplitudzie według funkcji wykładniczej, czyli tzw. ruch oscylacyjny tłumiony - rys. krzywa 1. Zanikanie oscylacji zależy od stałej tłumienia  $k_t$  oraz momentu bezwładności. Pulsacja oscylacji tłumionych jako urojona część pierwiastka równania charakterystycznego jest równa

$$b = \frac{p \sqrt{4 \frac{J\sigma}{p} - k_t^2}}{2J}$$

Częstotliwość oscylacji tłumionych

$$\nu = \frac{1}{2\pi} b = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p\sigma}{J} - \left(\frac{k_t p}{2J}\right)^2}$$

Porównując to wyrażenie z wyrażeniem na częstotliwość oscylacji nietłumionych, można stwierdzić, że przy występowaniu obwodów tłumiących częstotliwość oscylacji wirnika generatora jest mniejsza



Przypadki b i c nie występują w rzeczywistych rozwiązaniach konstrukcyjnych generatorów. To oznacza, że przy zmianie obciążenia występują oscylacje tłumione wirnika o częstotliwości w granicach (0,7-2) Hz.

### ***Kołysania wymuszone***

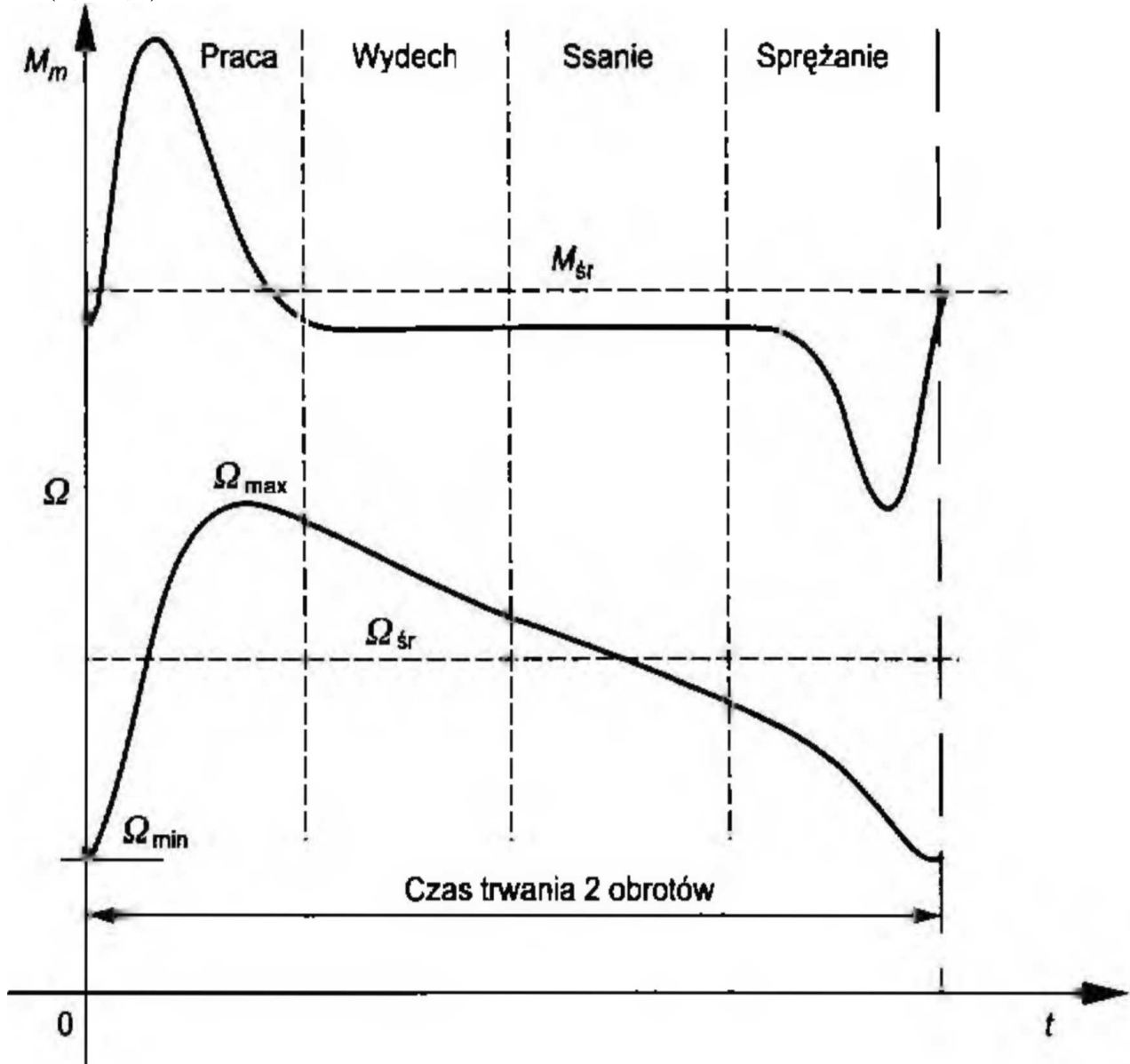
Kołysania wymuszone w pracy prądnicy synchronicznej występują wówczas, gdy jej silnikiem napędowym jest maszyna o nierównomiernym momencie, np. spalinowy silnik tłokowy. W takim przypadku nierównomierny w czasie, lecz okresowozmienne przebieg momentu mechanicznego  $M_m$

$$M_m = M_{\dot{s}r} + \sum M_{v_{\max}} \cos(v\omega_1 t - \varphi_v) = M_{\dot{s}r} + \Delta M$$

W tym przypadku nawet w warunkach pracy ustalonej wimik generatora wykonuje oscylacje wokół położenia równowagi, czyli wokół kąta obciążenia  $\nu_{\dot{s}r}$  któremu odpowiada  $M_{\dot{s}r}$ . Stopniem nierównomierności prędkości obrotowej wału generatora nazywamy stosunek

$$\delta^* = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Omega_{\dot{s}r}} \cdot 100\%$$

Ta nierównomierność prędkości obrotowej w normalnie spotykanych maszynach wynosi (0,4-0,7)%.



Moment mechaniczny silnika spalinowego czterosuwowego  
( $\Omega$  - kątowa prędkość mechaniczna wału)

Częstotliwość drgań wymuszonych wirnika generatora zależy od typu silnika napędowego oraz od prędkości obrotowej wału.

Podczas współpracy takiego zespołu z siecią sztywną (energetyczną) może wystąpić zjawisko rezonansu pomiędzy drganiami własnymi i wymuszonymi, co może doprowadzić do mechanicznego uszkodzenia zespołu. Aby uniknąć rezonansu, należy tak dobrać moment bezwładności zespołu wirującego (np. poprzez dodatkowe koła zamachowe), aby

częstotliwość drgań własnych różniła się od częstotliwości drgań wymuszonych co najmniej o 20%. Jest to tzw. *margines bezpieczeństwa rezonansowego układu*.

### Stany nieustalone i niesymetryczne. Zwarcia generatorów

Zwarcia zewnętrzne w bezpośredniej bliskości zacisków liniowych generatora, a także zwarcia w systemie elektroenergetycznym stanowią najczęstszy przypadek stanów awaryjnych będący zagrożeniem dla wszystkich elementów tego systemu. Z punktu widzenia współpracy generatora z systemem elektroenergetycznym rozróżnia się *zwarcia bliskie* (występujące między generatorem a transformatorem blokowym i bezpośrednio poza transformatorem blokowym) oraz *zwarcia odległe*.

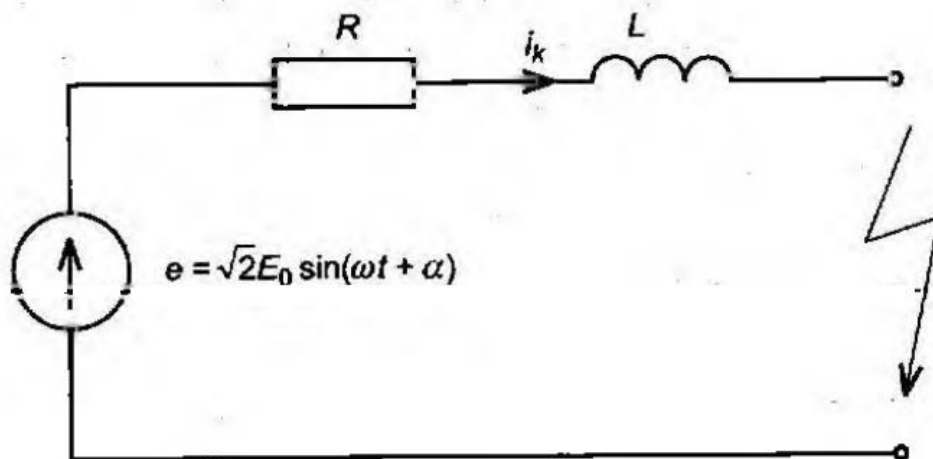
Stan symetrycznego zwarcia ustalonego generatora, zwany także *zwarcie normalnym* lub *pomiarowym*, uzyskuje się przez bezpośrednie zwarcie zacisków twornika maszyny niewzbudzonej. Następnie, regulując prąd wzbudzenia, można uzyskać żadaną wartość prądu zwarcia ustalonego w uzwojeniach twornika. Prąd zwarcia ustalonego w uzwojeniu fazowym twornika (przy pominięciu jego rezystancji) wyraża się zależnością

$$i_k = \frac{E_0}{X_{\sigma s} + X_{ad}}$$

Charakterystyczną cechą tego zwarcia jest rozmagnesowujące oddziaływanie twornika. W wyniku tego prąd zwarcia ustalonego jest stosunkowo niewielki i wynosi przy wzbudzeniu znamionowym (1,5-5-2,5)  $I_N$ . Reaktancja  $X_{ad}$  jest odzwierciedleniem stanu magnetycznego w osi d maszyny przy rozmagnesowującym działaniu ustalonego przepływu twornika.

Odmiernym stanem jest stan *zwarcia udarowego*. Stan ten uzyskuje się przez zwarcie zacisków maszyny normalnie wzbudzonej. Przy zwarcie jednoczesnym trzech zacisków mówimy o zwarcie trójfazowym lub zwarcie symetrycznym; przy zwarcie innej liczby zacisków mówimy o zwarciach niesymetrycznych (zwarcie dwu- i jednofazowe).

Stan zwarcia udarowego charakteryzuje się wzrostem prądu we wszystkich uzwojeniach maszyny: twornika, wzbudzającym i tłumiącym.



Stan nieustalony w takim obwodzie jest opisany równaniem różniczkowym

$$e = Ri_k + L \frac{di_k}{dt} \qquad \sqrt{2}E_0 \sin(\omega t + \alpha) = Ri_k + L \frac{di_k}{dt}$$

Rozwiązanie tego równania różniczkowego

$$i_k = \sqrt{2}I_k \sin(\omega t + \alpha + \varphi_k) + Ce^{-\frac{R}{L}t}$$

$$I_k = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{\omega L}{R}$$

Stała C jest wyznaczana z warunków początkowych zjawiska. Jeżeli przed zwarcie**m** był stan bezprądowy, to

$$\sqrt{2}I_k \sin(\alpha - \varphi_k) + C = 0, \quad C = -\sqrt{2}I_k \sin(\alpha - \varphi_k)$$

Ostatecznie rozwiązanie równania określającego przebieg prądu zwarcio**wego**

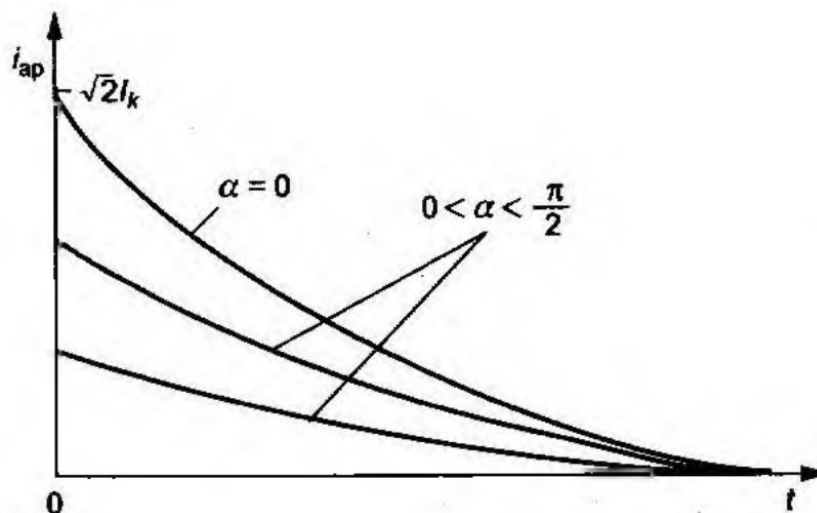
$$i_k = \sqrt{2}I_k \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sqrt{2}I_k \sin(\alpha - \varphi_k)e^{-\frac{R}{L}t}$$

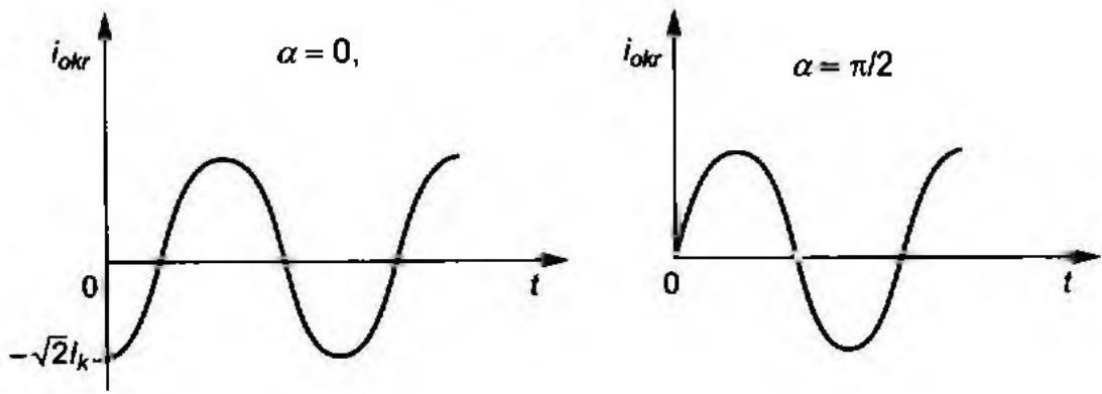
$$i_k = i_{\text{okr}} + i_{\text{ap}}$$

Wartość składowej aperiodycznej zależy od chwili, w której następuje zwarcie (od wartości kąta fazowego  $\alpha$ ). Jeżeli przyjąć, że  $R \ll \omega L$ , to  $\varphi_k = \pi/2$ . Wartość początkowa składowej aperiodycznej będzie przyjmowała następujące wartości

$$\text{dla } \alpha = 0 \quad (i_{\text{ap}})_{t=0} = -\sqrt{2}I_k \sin\left(0 - \frac{\pi}{2}\right) = +\sqrt{2}I_k = (I_{\text{ap}})_{\text{max}}$$

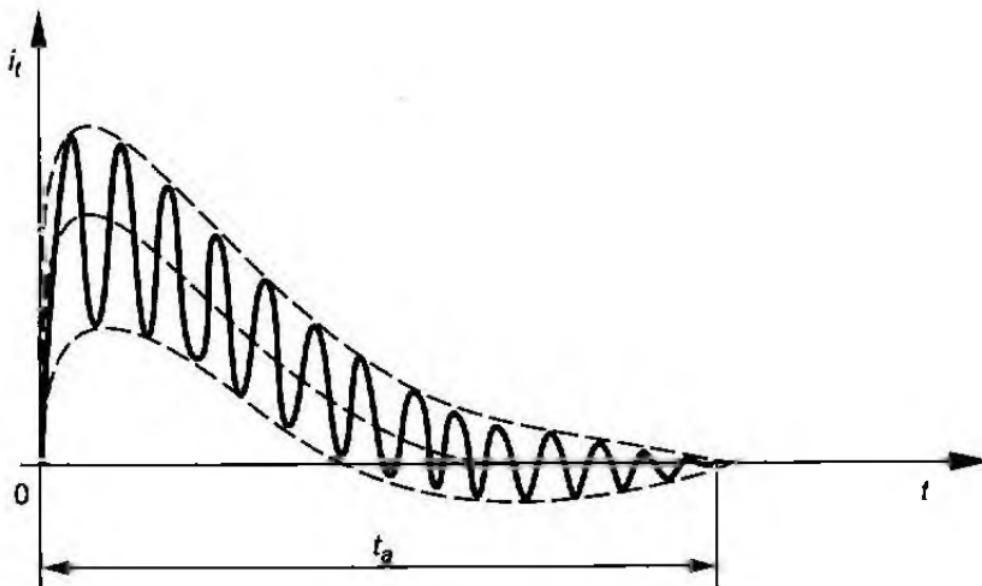
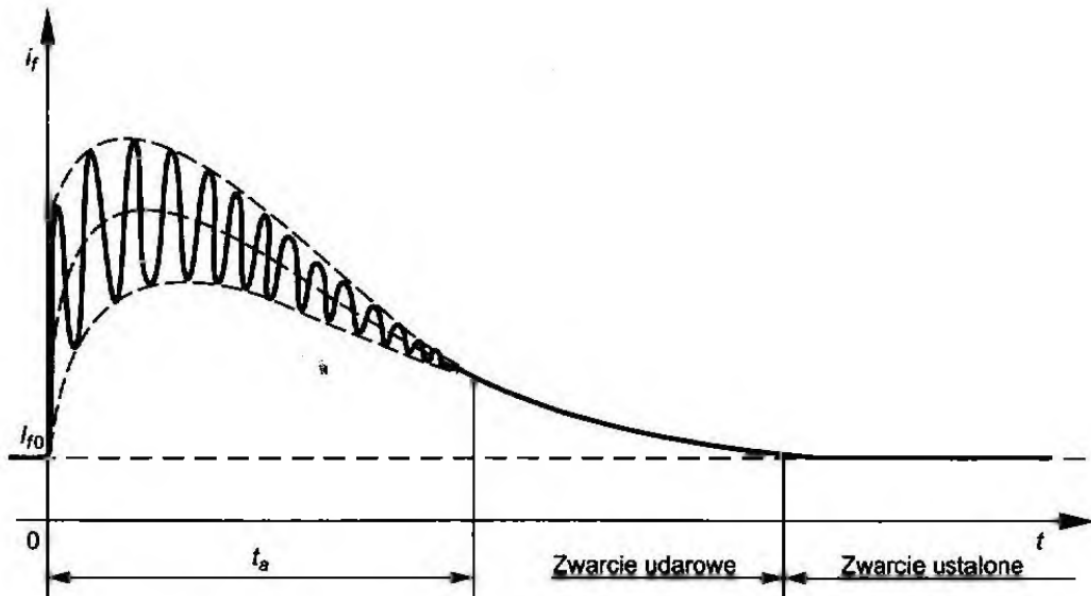
$$\text{dla } \alpha = \frac{\pi}{2} \quad (i_{\text{ap}})_{t=0} = 0$$





Przebieg składowej okresowej (periodycznej)

Prąd aperiodyczny w każdym z uzwojeń fazowych wytwarza własny strumień magnetyczny *nieruchomy* w przestrzeni, związany z poszczególnymi uzwojeniami fazowymi. Strumień ten maleje w czasie według funkcji wykładniczej, tak jak maleje prąd aperiodyczny. Nieruchomy w przestrzeni strumień aperiodyczny będzie wpływał na przebiegi prądowe w uzwojeniach wirnika generatora.



Prądy w uzwojeniach wzbudzenia i wirnika

### *Składowe prądu aperiodycznego*

Stan magnetyczny maszyny na początku zwarcia, kiedy występują prądy w uzwojeniach tłumiących, nazywamy *stanem podprześciowym*. Jest on charakteryzowany reaktancją podprześciową podłużną generatora

$$X_d'' = X_{\sigma s} + X_{ad}''$$

$$X_d'' = X_{\sigma s} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}''} + \frac{1}{X_f} + \frac{1}{X_t}}$$

Prąd, jaki występuje w tym. stanie w obwodzie twornika przy pominięciu rezystancji, wyraża się zależnością

$$I_d'' = \frac{E_0}{X_d''}$$

gdzie  $E_0$  - siła elektromotoryczna na zaciskach maszyny przed zwarcie udarowym

Gdy zanikną prądy w uzwojeniu tłumiącym, zmienia się jeszcze prąd w uzwojeniu wzbudzające. Taki stan magnetyczny maszyny nazywamy stanem przejściowym (ang. transient). Stan przejściowy powstanie także w pierwszej chwili zwarcia w maszynie, która nie ma obwodów tłumiących. Taki stan magnetyczny maszyny jest charakteryzowany reaktancją przejściową podłużną

$$X_d' = X_{\sigma s} + X_{ad}'$$

$$X_d' = X_{\sigma s} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}'} + \frac{1}{X_f}}$$

Prąd, jaki występuje wówczas w obwodzie twornika przy pominięciu rezystancji, wyraża się zależnością

$$I_d' = \frac{E_0}{X_d'}$$

Gdy zanikną dodatkowe prądy w uzwojeniu wzbudzającym powstaje stan magnetyczny odpowiadający stanowi zwarcia ustalonego. Taki stan magnetyczny maszyny jest charakteryzowany reaktancją synchroniczną podłużną  $X_d$

$$X_d = X_{\sigma s} + X_{ad}$$

W tym stanie prąd występujący w obwodzie twornika przy pominięciu rezystancji jest określony zależnością

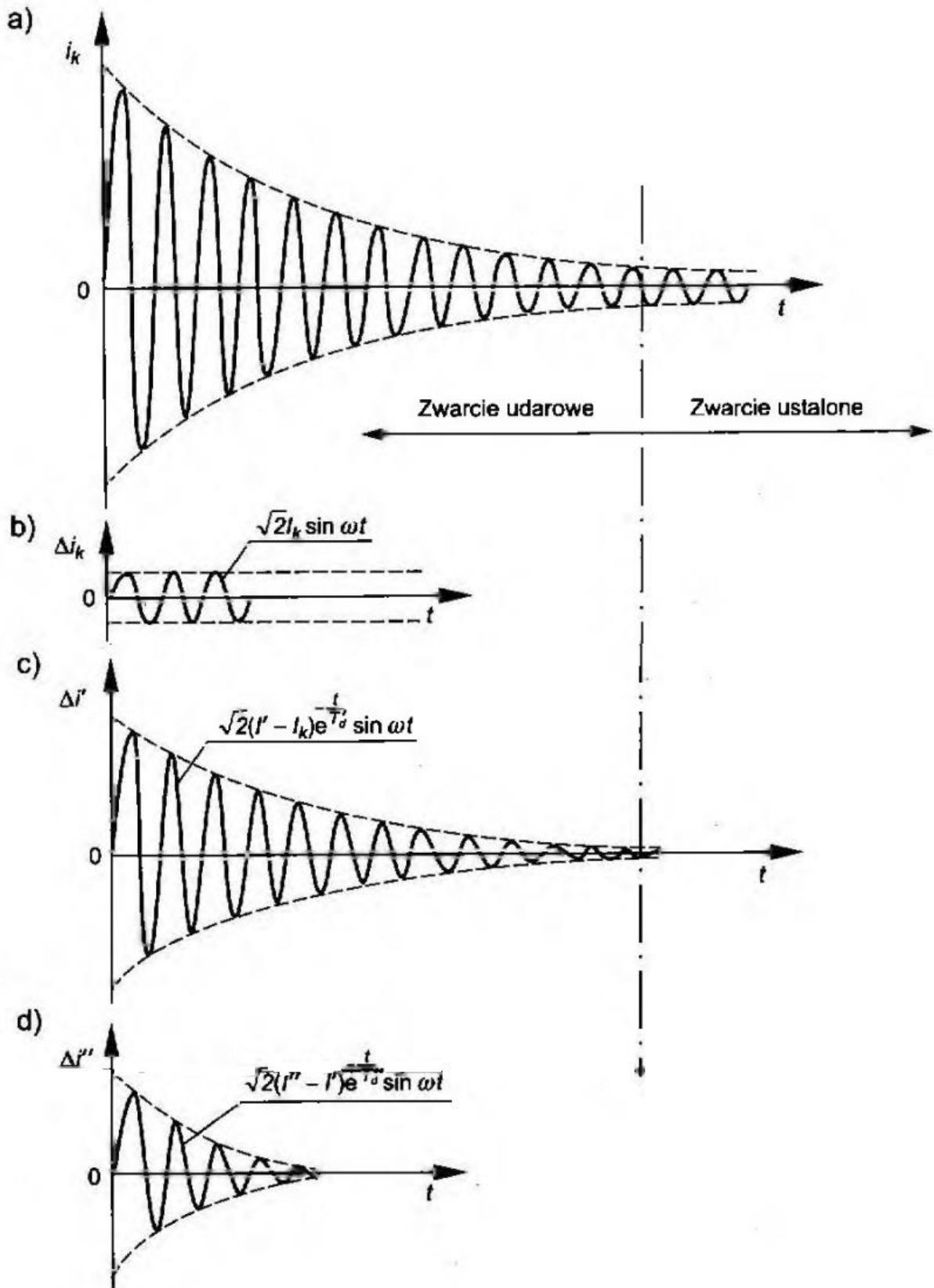
$$I_k = \frac{E_0}{X_d}$$

Wybrane parametry turbogeneratorów cylindrycznych

$P_N$	$x'_d$	$x'_d$	$x_d$	$T'_d$	$T'_d$	$T_a$
MW	–	–	–	s	s	s
2	0,15	0,26	1,62	0,06	0,05	0,08
6	0,13	0,19	1,72	0,09	0,07	0,16
30	0,15	0,24	2,34	0,13	1,05	0,20
50	0,15	0,22	2,02	0,16	1,30	0,26
120	0,15	0,21	1,84	0,20	1,80	0,20
200	0,19	0,27	1,88	0,12	0,92	0,31
360	0,22	0,23	2,43	0,11	0,89	0,37
500	0,26	0,35	2,55	0,17	1,36	0,36



## Przebieg prądu zwarciovego dla $\alpha = 90$



Składowa ustalonego prądu zwarciovego ma amplitudę stałą w czasie, a jej przebieg jest określony zależnością

$$\Delta i_k = \sqrt{2} I_k \sin \omega t = \sqrt{2} \frac{E_0}{X_d} \sin \omega t$$

Składowa przejściowa prądu zwarciovego, której występowanie jest uwarunkowane prądem dodatkowym w uzwojeniu wzbudzającym, jest przebiegiem sinusoidalnym o

amplitudzie zmniejszającej się w czasie według funkcji wykładniczej i wyraża się zależnością

$$\Delta i' = \sqrt{2}(I' - I_k)e^{-\frac{t}{T_d'}} \sin \omega t = \sqrt{2}E_0 \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} \sin \omega t$$

$$T_d' = \frac{L_f}{R_f}$$

Składowa podprześciowa prądu zwarciovego jest warunkowana występowaniem dodatkowego prądu w uzwojeniu tłumiącym. Jej przebieg jest sinusoidalny o amplitudzie

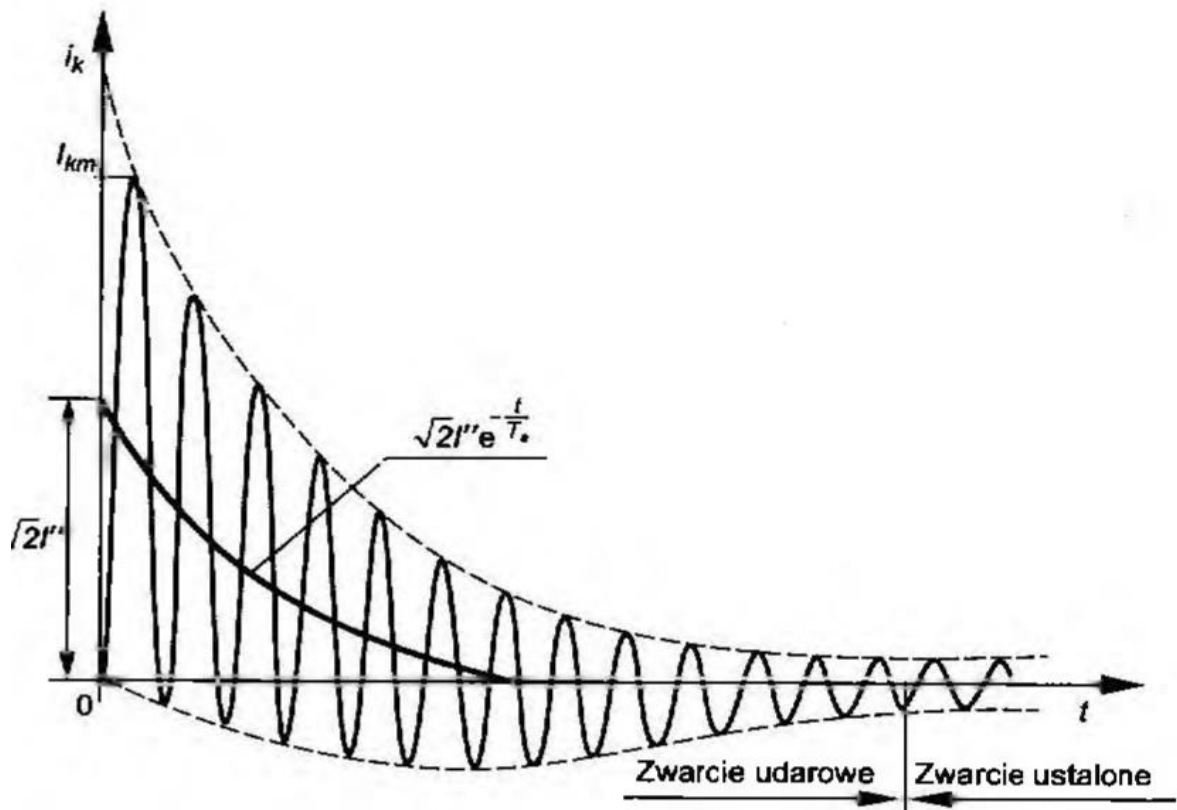
$$\Delta i'' = \sqrt{2}(I'' - I')e^{-\frac{t}{T_d''}} \sin \omega t = \sqrt{2}E_0 \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \sin \omega t$$

$$T_d'' = \frac{L_t}{R_t}$$

Całkowity prąd zwarciovowy jest sumą wszystkich trzech składowych

$$i_k = \sqrt{2}[(I'' - I')e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I' - I_k)e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_k] \sin \omega t$$

**Przebieg prądu zwarcia udarowego generatora dla  $a = 0$  (maksymalna wartość składowej aperiodycznej)**



W przypadkach pośrednich, gdy  $0 < \alpha < \pi/2$ , różnica w przebiegach prądów zwarciovych wynikać będzie z różnej wartości składowej aperiodycznej prądu, której początkowa wartość zawierać się będzie w granicach od zera do  $\sqrt{2}I''$ . Zatem dla zwarcia symetrycznego w dowolnej chwili

$$i_k = \sqrt{2}[(I'' - I')e^{-\frac{t}{T_d}} + (I' - I_k)e^{-\frac{t}{T_d}} + I_k] \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sqrt{2}I'' \sin(\alpha - \varphi_k)e^{-\frac{t}{T_d}}$$

$$I'' = \frac{E_0}{X_d''}, I' = \frac{E_0}{X_d'}, I_k = \frac{E_0}{X_d}$$

Wartość skuteczna prądu zwarciovego

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

Wartość skuteczną składowej okresowej

$$I_{\text{okr}}(t) = (I'' - I')e^{-\frac{t}{T_d}} + (I' - I_k)e^{-\frac{t}{T_d}} + I_k$$

Wartość skuteczna prądu aperiodycznego

$$I_{\text{ap}}(t) = \sqrt{2}I'' \sin(\alpha - \varphi_k)e^{-\frac{t}{T_d}}$$

Wartość skuteczna całkowitego prądu zwarciovego po czasie  $t$  od chwili zwarcia jest równa

$$\begin{aligned} I_k(t) &= \sqrt{I_{\text{okr}}^2(t) + I_{\text{ap}}^2(t)} = \\ &= \sqrt{[(I'' - I')e^{-\frac{t}{T_d}} + (I' - I_k)e^{-\frac{t}{T_d}} + I_k]^2 + [\sqrt{2}I'' \sin(\alpha - \varphi_k)e^{-\frac{t}{T_d}}]^2} \end{aligned}$$

Obecność maksymalnej składowej aperiodycznej w prądzie zwarciovym zwiększa jego wartość skuteczną o 73%.

*Udarowym prądem zwarciovym* nazywamy wartość szczytową prądu w czasie pierwszego okresu po zwarciu, wówczas gdy występuje maksymalna wartość prądu aperiodycznego.

Dla częstotliwości znamionowej generatora  $f_N = 50$  Hz wartość szczytowa prądu występuje po czasie  $t \sim 0,001$  s. Wyrażenie na prąd zwarciovym przy założeniu, że  $\varphi_k = \pi/2$  i  $\alpha = 0$ , przy normalnie spotykanych wartościach stałych czasowych

$$I_{km} \approx \sqrt{2}I'' \left( e^{-\frac{0,01}{T_d}} - e^{-\frac{0,01}{T_d}} \right) = k_u \sqrt{2}I''$$

$k_u$  - współczynnika udaru, który dla maszyn normalnej konstrukcji przyjmuje wartość w granicach  $k_u = (1,7 - 1,9)$ . Biorąc wartość pośrednią  $k_u = 1,8$ , można przedstawić przybliżony zapis wyrażenia na udarowy prąd zwarciovym w postaci

$$I_{km} \approx 1,8\sqrt{2} \frac{E_0}{X_d''}$$

Wartość tego prądu decyduje o siłach dynamicznych występujących pomiędzy poszczególnymi prętami uzwojenia twornika generatora. Siły występujące podczas zwarcia udarowego mogą też doprowadzić do odkształceń połączeń czołowych uzwojeń lub uszkodzenia układu izolacyjnego maszyny.

Dąży się do ograniczenia wartości udarowego prądu zwarciovego; zaleca się takie wykonanie maszyny synchronicznej, aby przy symetrycznym zwarciu udarowym na jej

zaciskach podczas pracy przy napięciu znamionowym wartość udarowego prądu zwarciovego nie przekroczyła 15-krotnej amplitudy prądu znamionowego lub 21-krotnej wartości skutecznej prądu znamionowego. Oznacza to, że musi być spełniony warunek

$$1,8\sqrt{2} \frac{E_0}{X_d''} \leq 15\sqrt{2}I_N$$

lub

$$\frac{I_N X_d''}{U_N} = x_d'' \leq \frac{1,05 \cdot 1,8}{15} = 0,125$$

Wyrażenie to określa minimalną wartość reaktancji podprześciowej podłużnej maszyny. W generatorach dużej mocy ten warunek jest zwykle spełniony w sposób naturalny. W maszynach mniejszej mocy zachodzi czasem potrzeba dokonania specjalnych zabiegów konstrukcyjnych zmierzających do powiększenia reaktancji.

Ze względu na znaczne siły dynamiczne, jakie występują pomiędzy poszczególnymi elementami uzwojeń podczas zwarcia udarowego, w maszynach nowego typu, wyłącznie na życzenie zamawiającego, przeprowadzana jest próba zwarcia udarowego. Celem próby jest sprawdzenie wytrzymałości dynamicznej konstrukcji generatora. Próbę przeprowadza się przy zwarciu udarowym trójfazowym ze stanu biegu jałowego i przy wzbudzeniu odpowiadającym napięciu znamionowemu (chyba że uzgodniono inaczej). Wynik próby uważa się za dodatni, jeżeli podczas zwarcia nie nastąpiły trwałe odkształcenia połączeń czołowych uzwojeń oraz gdy wykonana po tej próbie próba wytrzymałości elektrycznej izolacji dała wynik pozytywny. Podczas próby dokonuje się rejestracji przebiegów prądów zwarciovych w uzwojeniach stojana i wirnika. Przebiegi te mogą być podstawą do wyznaczenia reaktancji stanu nieustalonego i a także stałych czasowych.

### Zwarcie generatora ze stanu obciążenia

Prąd zwarciovowy w chwili początkowej

$$\underline{E}_w = \underline{U} + j\underline{I}X_{\infty} \approx \underline{U} + j\underline{I}X_d''$$

Stąd wartość zespolona składowej okresowej prądu podprześciowego w pierwszej chwili zwarcia wyraża się zależnością

$$\underline{I}'' = -j \frac{\underline{E}_f''}{X_d''} = -j \frac{\underline{U} + j\underline{I}X_d''}{X_d''} = -j \frac{\underline{U}}{X_d''} + \underline{I}$$

Dla stanu przejściowego możemy napisać analogicznie

$$\underline{I}' = -j \frac{\underline{U} + j\underline{I}X_d'}{X_d'} = -j \frac{\underline{U}}{X_d'} + \underline{I}$$

Dla stanu ustalonego

$$\underline{I}_k = -j \frac{\underline{U} + j\underline{I}X_d}{X_d} = -j \frac{\underline{U}}{X_d} + \underline{I}$$

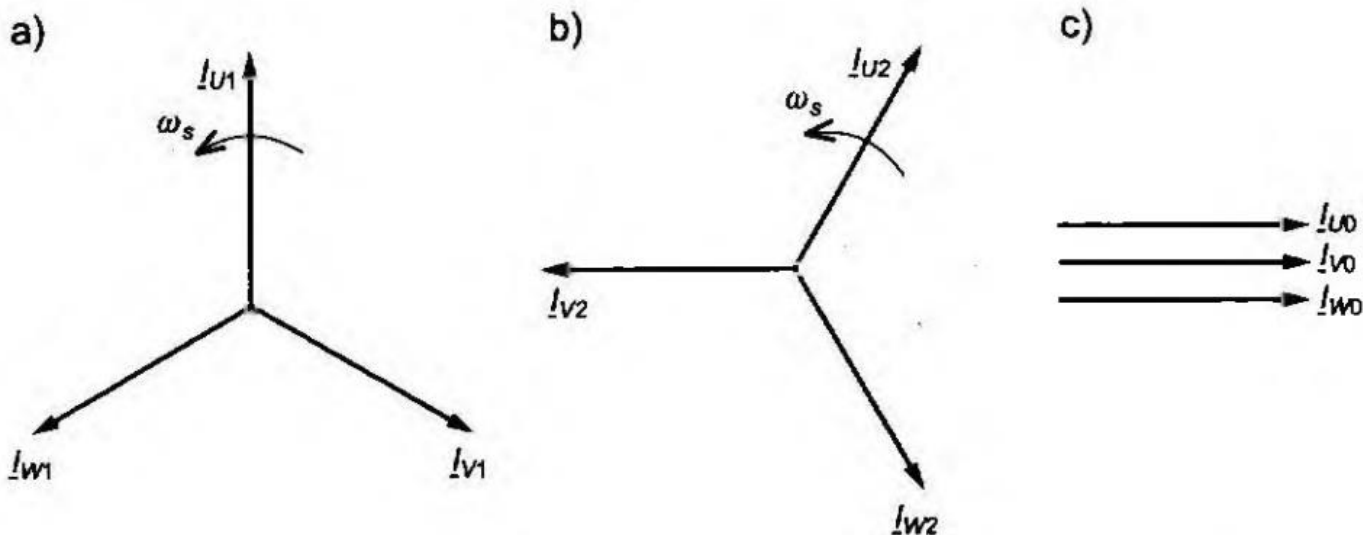
Z podanych zależności wynika, że składowa okresowa prądu zwarciovego w tworniku dla stanu obciążenia jest wynikiem nałożenia dwóch przebiegów: prądu zwarciovego, jaki

wystąpiłby przy zwarceniu dla stanu biegu jałowego dla SEM  $E_q=U$  oraz danego prądu obciążenia.

## Zwarcia niesymetryczne generatora

### Stan obciążenia niesymetrycznego

W analizie stanów niesymetrycznych powszechnie jest stosowana metoda składowych symetrycznych, Metoda ta polega na rozłożeniu m-fazowego układu niesymetrycznego prądów (lub napięć) na  $m$  składowych symetrycznych. W układach trójfazowych układ niesymetryczny jest zastępowany trzema układami symetrycznymi



Układ prądów kolejności: a) zgodnej, b) przeciwnej, c) zerowej

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{U1} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_U + a\underline{I}_V + a^2\underline{I}_W) \\ \underline{I}_{U2} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_U + a^2\underline{I}_V + a\underline{I}_W) \\ \underline{I}_{U0} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_U + \underline{I}_V + \underline{I}_W) \end{aligned} \right\} \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

W celu uproszczenia zapisu można oznaczyć w fazie  $U$

$$\underline{I}_{U1} = \underline{I}_1, \quad \underline{I}_{U2} = \underline{I}_2, \quad \underline{I}_{U0} = \underline{I}_0$$

składowe prądów w pozostałych fazach

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{V1} &= a^2\underline{I}_1, & \underline{I}_{V2} &= a\underline{I}_2, & \underline{I}_{V0} &= \underline{I}_0 \\ \underline{I}_{W1} &= a\underline{I}_1, & \underline{I}_{W2} &= a^2\underline{I}_2, & \underline{I}_{W0} &= \underline{I}_0 \end{aligned} \right\}$$

Wtedy poszczególne niesymetryczne wartości prądów fazowych wynoszą

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_U &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_V &= \mathbf{a}^2 \underline{I}_1 + \mathbf{a} \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_W &= \mathbf{a} \underline{I}_1 + \mathbf{a}^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \end{aligned} \right\}$$

Składowym zgodnym, przeciwnym i zerowym prądów odpowiadają impedancje dla składowej zgodnej przeciwnej i zerowej z których każda składa się z odpowiedniej reaktancji i rezystancji. Reaktancje stanu ustalonego w osi podłużnej i poprzecznej generatora oraz a także reaktancje stanu nieustalonego są reaktancjami dla składowej zgodnej.

Układ symetryczny zgodny wytwarza strumień wirujący zgodnie z wirnikiem, nieprzecinający jego uzwojeń.

Układ przeciwny prądów wywołuje pole wirujące z prędkością synchroniczną, ale w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania wirnika. Tym samym w jego uzwojeniach indukują się siły elektromotoryczne o częstotliwości  $2f_s$ .

Układ zerowy prądów tworzy prądy równe co do wartości i będące w fazie we wszystkich trzech uzwojeniach stojana. Przepływy fazowe od tych prądów są względem siebie przestrzennie przesunięte o kąt  $2\pi/3$ . Przepływ wypadkowy układu zerowego jest więc równy zeru, czyli układ ten nie wywołuje strumienia przechodzącego do przestrzeni zajętej przez wirnik, a jedynie odpowiednie strumienie rozproszenia skojarzone z uzwojeniami faz stojana. Dla układu zerowego obojętny jest stan ruchowy wirnika. W przypadku skojarzenia uzwojeń stojana w gwiazdę z nieuziemiającym punktem zerowym składowe zerowe prądów nie płyną (ze względu na brak zamkniętego obwodu dla tych prądów).

Składowe zerowe prądu nie wywołują zjawisk elektromagnetycznych w wirniku, nie wywołują więc dodatkowego momentu i dodatkowych strat mocy.

Szczególną uwagę należy zwrócić na zjawiska wywoływane składowymi przeciwnymi prądów. Chodzi tu zarówno o momenty wywoływane tymi prądami jak i dodatkowe straty mocy i nagrzewanie się. *Decydującymi są zjawiska w wirniku, a nie w stojanie, ponieważ składowe kolejności przeciwnej indukują w uzwojeniach wirnika prądy o częstotliwości podwójnej.*

Kierunek wirowania strumienia nie ma jednak wpływu na rozkład strumienia rozproszenia stojana. W związku z tym można przyjąć, że dodatkowe straty mocy w prętach uzwojenia stojana od składowych przeciwnych prądu i od składowych zgodnych są jednakowe. Dlatego wartość rezystancji uzwojenia fazowego twornika jest dla składowej przeciwnej taka sama jak dla składowej zgodnej. Natomiast w wirniku strumień kolejności przeciwnej wywołuje straty mocy, które nie występują przy składowych zgodnych. Dlatego wartość rezystancji  $R_2$  jest większa od wartości rezystancji  $R_1$ . W analizach przybliżonych można założyć  $R_2 \gg R_1$ . Reaktancja dla składowej przeciwnej

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2}$$

Wartości względne reaktancji i rezystancji dla składowej przeciwnej typowych generatorów

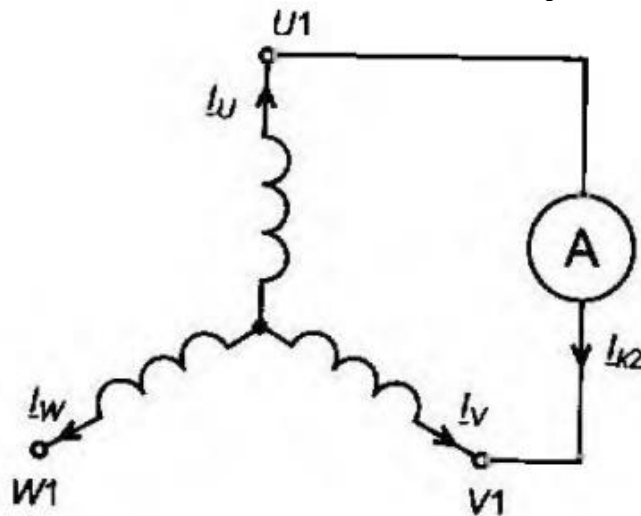
Reaktancja Rezystancja	Turbogeneratory cylindryczne	Generatory z wydatnymi biegunami	
		z uzwojeniem tłumiącym	bez uzwojenia tłumiącego
$x_2$	$\sim 1,22 x'_d$	$\sim 1,05 x'_d$	$0,5(x'_d + x_q)$
	0,12÷0,30	0,15÷0,35	0,30÷0,80
$r_2$	0,02÷0,04	0,01÷0,02	0,02÷0,07

Impedancja dla składowej zerowej wyraża się wzorem  $Z_0 = R_0 + jX_0$

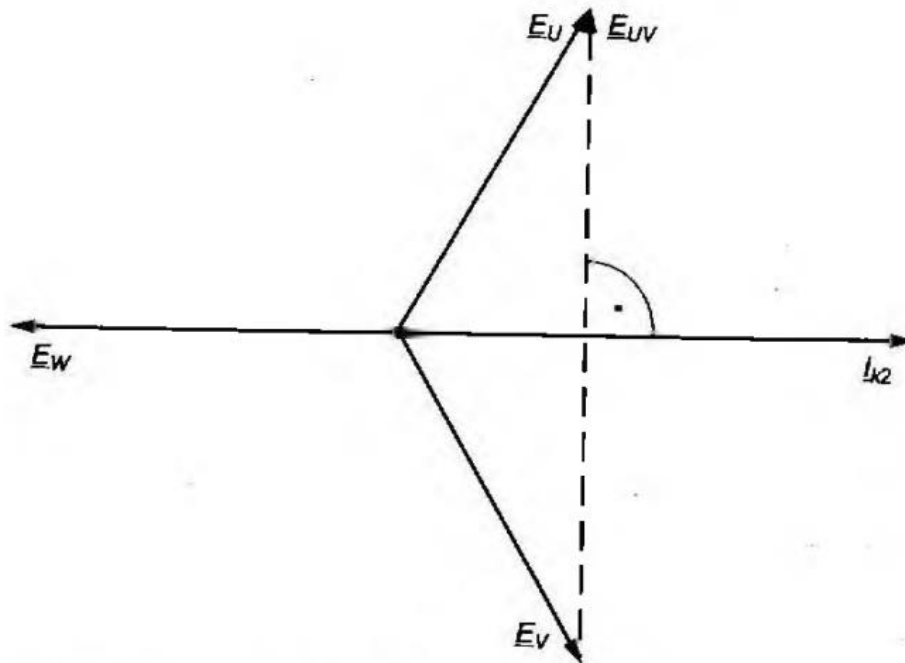
Układ prądów kolejności zerowej, im, jest układem prądów o jednakowej fazie we wszystkich trzech uzwojeniach stojana. Ze względu na przesunięcie uzwojeń na obwodzie twornika o kąt  $2\pi/3$  wypadkowy strumień skojarzony wytworzony przez prądy kolejności zerowej jest równy zero.

Jedynym wypadkowym strumieniem pozostaje strumień rozproszenia. Dlatego w pierwszym przybliżeniu można założyć  $X_0 \approx X_{\sigma s}$ . Względna wartość tej reaktancji zawiera się zwykle w granicach 0,03-0,10. Wartości rezystancji najczęściej nie oblicza się, lecz wyznacza przez pomiar równocześnie z wyznaczeniem reaktancji  $X_0$ .

### Zwarcie dwufazowe ustalone dla stanu jałowego



Schemat zwarcia dwufazowego generatora



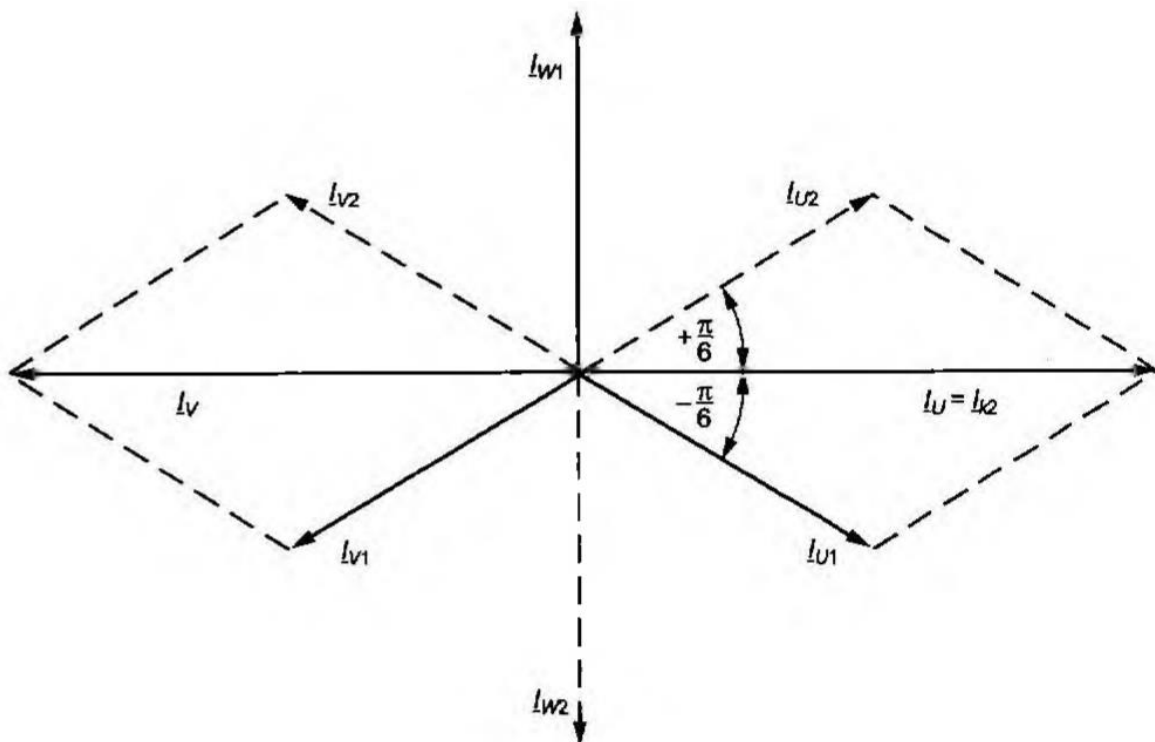
Prąd zwarcia dwufazowego

Dla założonego zwarcia zacisków liniowych dodatkowe warunki dla zwarcia dwufazowego można opisać zależnościami

$$\underline{I}_U = -\underline{I}_V, \quad \underline{I}_W = 0$$

$$\underline{U}_U = \underline{U}_V, \quad \underline{U}_{UV} = 0$$

Posługując się metodą składowych symetrycznych, można w rozważanym przypadku wyznaczyć prądy kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej. Wzajemne położenie wektorów prądów kolejności zgodnej i przeciwnej oraz wynikowy prąd zwarcia jest pokazany na rysunku



Wzajemne położenie wektorów prądów kolejności zgodnej i przeciwnej przy zwarcia dwufazowym



$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{U1} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_U + a\underline{I}_V + a^2\underline{I}_W) = \frac{1}{3}\underline{I}_U(1-a) = \frac{\underline{I}_U}{\sqrt{3}}e^{-j\frac{\pi}{6}} \\ \underline{I}_{U2} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_U + a^2\underline{I}_V + a\underline{I}_W) = \frac{1}{3}\underline{I}_U(1-a^2) = \frac{\underline{I}_U}{\sqrt{3}}e^{+j\frac{\pi}{6}} \\ \underline{I}_{U0} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_U + \underline{I}_V + \underline{I}_W) = 0, \quad \underline{I}_{V0} = 0, \quad \underline{I}_{W0} = 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\underline{I}_0 = 0 \text{ oraz } \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 0.$$

Prądy poszczególnych kolejności wywołują indukcyjne straty napięcia na odpowiednich reaktancjach (ze znakiem ujemnym). Z każdym z uzwojeń fazowych są związane następujące siły elektromotoryczne:

- od strumienia magniesnicy  $E_U, E_V, E_W$

- SEM równoważące straty napięcia od prądów kolejności zgodnej

$$\underline{E}_{U1} = -j\underline{I}_{U1}X_1, \quad \underline{E}_{V1} = -j\underline{I}_{V1}X_1, \quad \underline{E}_{W1} = -j\underline{I}_{W1}X_1$$

- SEM równoważące straty napięcia od prądów kolejności przeciwnej

$$\underline{E}_{U2} = -j\underline{I}_{U2}X_2, \quad \underline{E}_{V2} = -j\underline{I}_{V2}X_2, \quad \underline{E}_{W2} = -j\underline{I}_{W2}X_2$$

- SEM równoważące straty napięcia od prądów kolejności zerowej

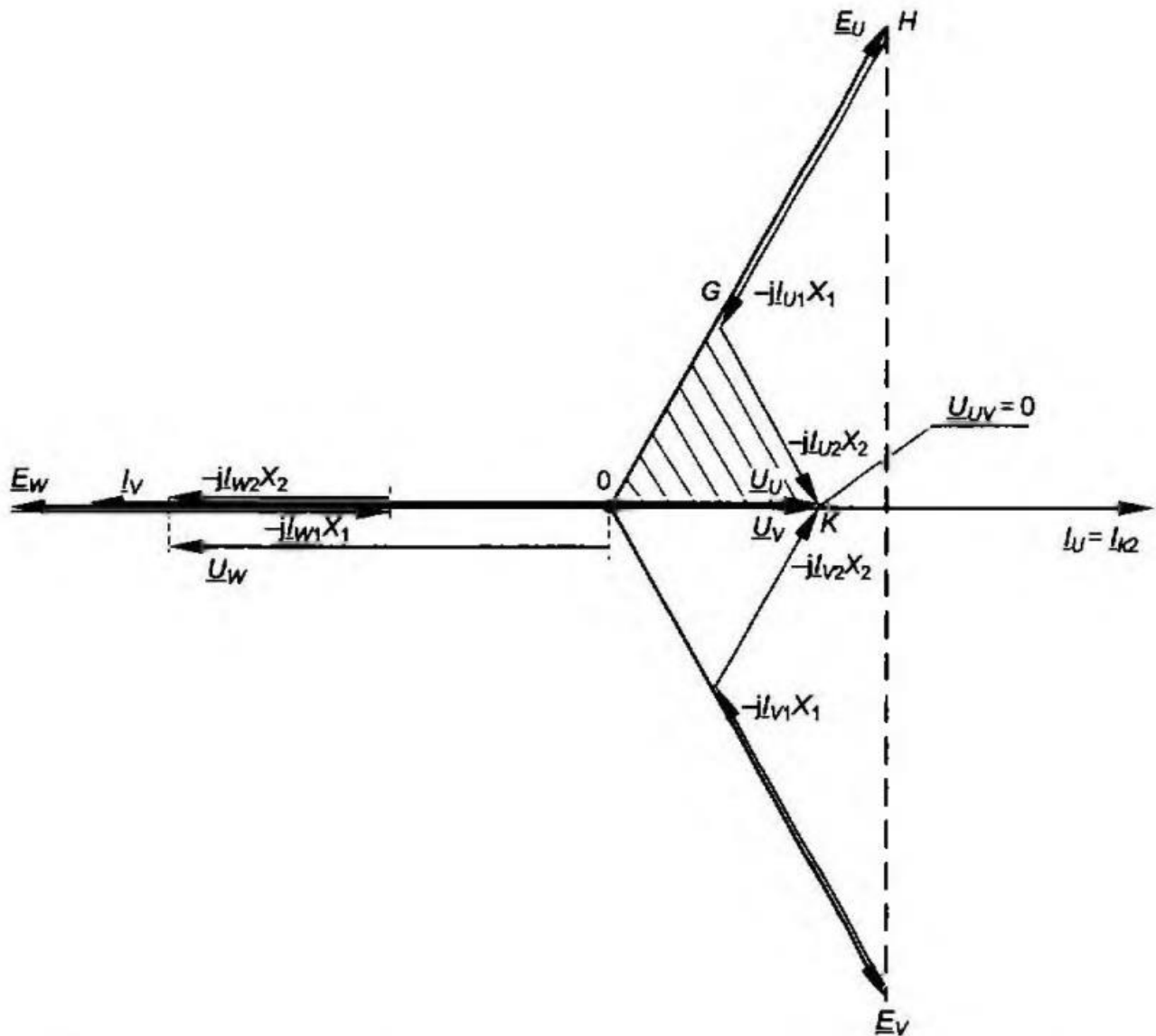
$$\underline{E}_{U0} = -j\underline{I}_{U0}X_0, \quad \underline{E}_{V0} = -j\underline{I}_{V0}X_0, \quad \underline{E}_{W0} = -j\underline{I}_{W0}X_0$$

Na tej podstawie dla każdego uzwojenia fazowego można sformułować równania wyznaczające napięcia kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej. Przy braku sił elektromotorycznych kolejności przeciwnej i zerowej mamy

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{U1} &= \underline{E}_U - j\underline{I}_{U1}X_1, & \underline{U}_{V1} &= \underline{E}_V - j\underline{I}_{V1}X_1, & \underline{U}_{W1} &= \underline{E}_W - j\underline{I}_{W1}X_1 \\ \underline{U}_{U2} &= 0 - j\underline{I}_{U2}X_2, & \underline{U}_{V2} &= 0 - j\underline{I}_{V2}X_2, & \underline{U}_{W2} &= 0 - j\underline{I}_{W2}X_2 \\ \underline{U}_{U0} &= 0 - j\underline{I}_{U0}X_0 = 0, & \underline{U}_{V0} &= 0 - j\underline{I}_{V0}X_0 = 0, & \underline{U}_{W0} &= 0 - j\underline{I}_{W0}X_0 = 0 \end{aligned} \right\}$$

Rzeczywiste napięcia podczas zwarcia dwufazowego generatora na poszczególnych uzwojeniach fazowych będą sumą napięć wszystkich składowych

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_U &= \underline{U}_{U1} + \underline{U}_{U2} + \underline{U}_{U0} = \underline{E}_U - j\underline{I}_{U1}X_1 - j\underline{I}_{U2}X_2 \\ \underline{U}_V &= \underline{U}_{V1} + \underline{U}_{V2} + \underline{U}_{V0} = \underline{E}_V - j\underline{I}_{V1}X_1 - j\underline{I}_{V2}X_2 \\ \underline{U}_W &= \underline{U}_{W1} + \underline{U}_{W2} + \underline{U}_{W0} = \underline{E}_W - j\underline{I}_{W1}X_1 - j\underline{I}_{W2}X_2 \end{aligned} \right\}$$



Wykres wskazowy napięć i prądów maszyny synchronicznej podczas zwarcia dwufazowego (założono  $R = 0$ )

Wartość skuteczna prądu w uzwojeniach zwartych faz

$$I_U = I_V \frac{\sqrt{3}E_A}{X_1 + X_2}$$

Dla dowolnego przypadku zwarcia dwufazowego ze stanu biegu jałowego ustalony prąd

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}E_0}{X_1 + X_2}$$

W stanie przejściowym zwarcia udarowego  $X'_1 = X'_d$  prąd przejściowy

$$I'_2 = \frac{\sqrt{3}E_0}{X'_d + X_2}$$

W stanie podprzejściowym zwarcia udarowego  $X''_1 = X''_d$  prąd podprzejściowy

$$I_2'' = \frac{\sqrt{3}E_0}{X_d'' + X_2}$$

Prąd zwarcia udarowego dwufazowego dla stanu biegu jałowego może być opisany zależnością analogiczną do wyrażenia na prąd zwarcia trójfazowego symetrycznego

$$i_{k2} = \sqrt{2}[(I_2'' - I_2')e^{-\frac{t}{T_{d2}''}} + (I_2' - I_{k2})e^{-\frac{t}{T_{d2}'}} + I_{k2}] \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sqrt{2}I_2'' \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{t}{T_{a2}'}}$$

gdzie

$$I_2'' = \frac{\sqrt{3}E_0}{X_d'' + X_2}, \quad I_2' = \frac{\sqrt{3}E_0}{X_d' + X_2}, \quad I_{k2} = \frac{\sqrt{3}E_0}{X_d + X_2}$$

$$T_{d2}'' = \frac{X_d'' + X_2}{X_d'' + X_2} T_{do}'' \quad T_{d2}' = \frac{X_d' + X_2}{X_d' + X_2} T_{do}' \quad T_{a2} = \frac{X_2}{\omega_s R_s}$$

### Straty i sprawność generatorów synchronicznych

W prądniczy rozróżnia się:

- straty jałowe,
- straty obciążenia,
- straty wzbudzenia.

Na straty jałowe składają się straty mechaniczne związane z pokonaniem momentów oporów tarcia w łożyskach wirnika, z wentylacją, z oddziaływaniem dynamicznym żelaza stojana oraz straty w rdzeniu związane z magnesowaniem żelaza stojana, proporcjonalne do kwadratu indukcji, jaka występuje w żelazie stojana.

Straty obciążenia (w miedzi twornika) zależą od kwadratu wartości prądu płynącego w uzwojeniu stojana.

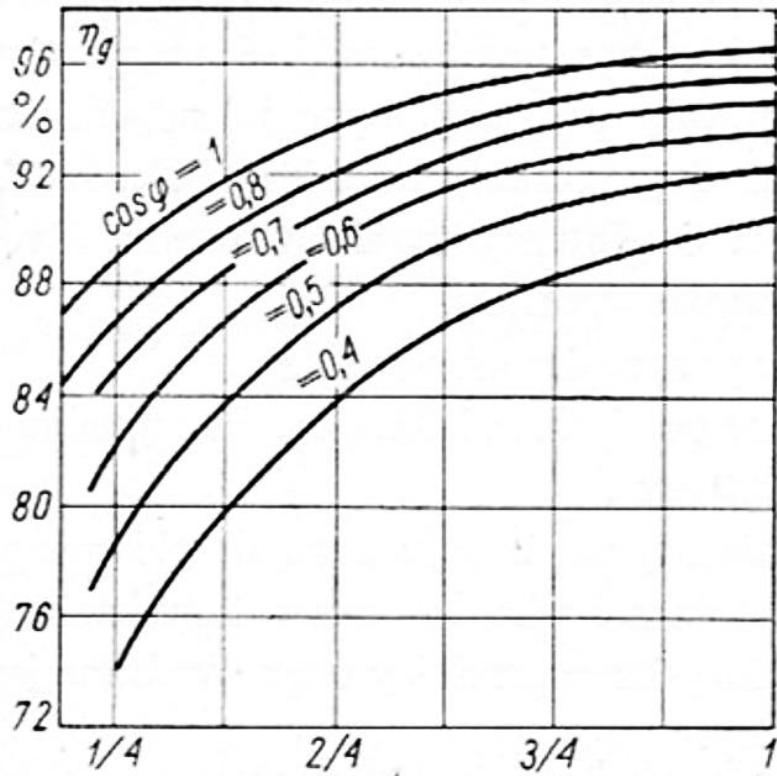
Straty wzbudzenia są sumą strat występujących w uzwojeniu wzbudzenia (równych iloczynowi kwadratu prądu wzbudzenia przez opór uzwojenia wzbudzenia) oraz strat mocy w doprowadzeniach i na oporze regulacyjnym.

Sprawność prądniczy można wyrazić w postaci wzoru

$$\eta_g = \frac{P_g}{P_{st}} = \frac{P_g}{P_g + \sum \Delta P} = \frac{P_g}{P_g + \Delta P_m + \Delta P_z + \Delta P_{el} + \Delta P_w}$$

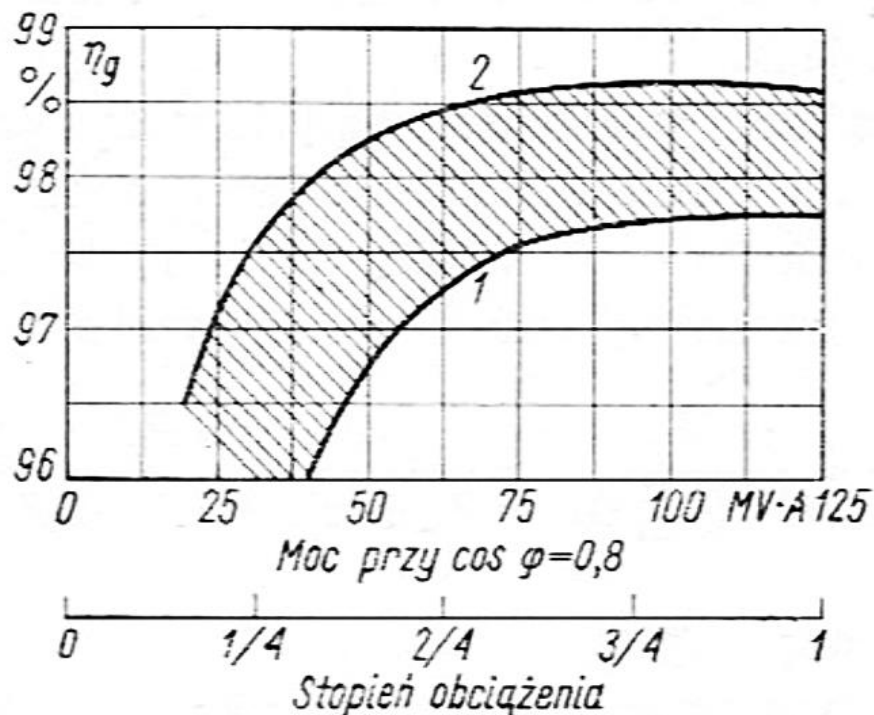
przy czym:

- $\eta_g$  — sprawność prądniczy;
- $P_g$  — moc oddawana przez prądnicę, w kW;
- $P_{st}$  — moc doprowadzona do prądniczy, w kW;
- $\sum \Delta P$  — suma strat mocy, w kW;
- $\Delta P_m$  — straty mechaniczne, w kW;
- $\Delta P_z$  — straty w żelazie, w kW;
- $\Delta P_{el}$  — straty obciążeniowe, w kW;
- $\Delta P_w$  — straty wzbudzenia, w kW.



Sprawność prądnicy synchronicznej o mocy 5 MV - A w zależności od obciążenia przy różnych wartościach  $\cos \varphi$

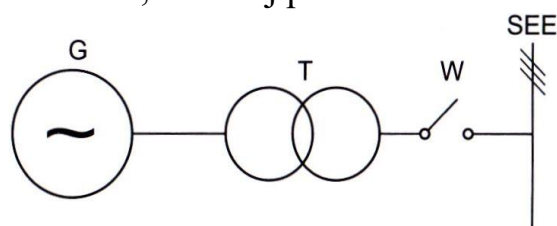
Prądnice synchroniczne dużej mocy pracujące w systemie elektroenergetycznym mają nieco odmienną charakterystykę sprawności, a mianowicie największą sprawność osiągają przy obciążeniu wynoszącym około 75 % obciążenia znamionowego, przy czym przebieg krzywej jest bardziej płaski. Przebieg krzywej sprawności dla prądnicy synchronicznej o mocy 125 MVA pokazano na rys.



Sprawność prądnicy synchronicznej 125 MVA w zależności od obciążenia  
1 — chłodzenie powietrzne; 2 — chłodzenie wodorowe

## Charakterystyczne zaburzenia i stany awaryjne

Generatory synchroniczne są włączone do systemu elektroenergetycznego poprzez transformator blokowy. W blokach elektroenergetycznych standardowo wyłącznik blokowy W znajduje się za transformatorem T, rzadziej przed transformatorem.



Schemat bloku elektroenergetycznego: G - generator synchroniczny, T - transformator, W - wyłącznik, SEE - system elektroenergetyczny

Rodzaje zaburzeń w pracy generatorów synchronicznych są wymienione w Ramowej Instrukcji Eksploatacji Generatorów Synchronicznych. Instrukcja ta identyfikuje wszystkie zaburzenia w pracy generatora, przed którymi jest zabezpieczany generator. Są to zabezpieczenia przed:

- zwarcie uzwojeń stojana: międzyfazowym oraz doziemnym, a także w przewodach łączących z szynami zbiorczymi oraz w sieci zewnętrznej,
- przeciążeniem uzwojeń stojana oraz wirnika,
- nadmiernym przewzbudzeniem i utratą wzbudzenia,
- wzrostem napięcia stojana,
- niesymetrycznym obciążeniem,
- wyłączeniem urządzenia napędowego,
- utratą synchronizmu wzbudzonego generatora,
- zwarcie w transformatorze blokowym lub linii kablowej

Stany zaburzeniowe występujące w eksploatacji, przed którymi maszyny synchroniczne nie są zabezpieczone, a które wzbudzają kołysanie prędkości obrotowej, są to:

- skokowa zmiana momentu mechanicznego,
- skokowa zmiana napięcia wzbudzenia,
- skokowa zmiana napięcia sieci elektroenergetycznej, na przykład spowodowana przez wyłączenie lub załączenie dużego odbiornika mocy biernej.

Wymienione zaburzenia wzbudzają kołysanie prędkości obrotowej

$$\omega_m(t) = \omega_{1m} + \Delta\omega_m e^{-t/T_{et}} \sin \Omega t$$

Kołysanie prędkości obrotowej i jej powolne zanikanie można obserwować na amperomierzach prądu twornika. Jeśli amplituda jest zbyt duża, to maszyna synchroniczna może wypaść z synchronizmu. Przy wypadnięciu wirnika z synchronizmu prędkość mechaniczna wirowania strumienia wzbudzenia jest inna niż prędkość wirowania smm twornika. Maszyna utraci stabilność.

Praca asynchroniczna w czasie krótkim, na przykład przy utracie jednego obrotu i ponownym wejściu maszyny w synchronizm, nie skutkuje awarią maszyny. Jednak dłuższa

praca asynchroniczna, na przykład utrata kilku obrotów, powinna być przerwana poprzez odłączenie zarówno generatora, jak i silnika z sieci elektroenergetycznej.

Generatory synchroniczne, współpracujące z siecią przesyłową lub rozdzielczą, powinny być wyposażone także w zabezpieczenie zapewniające wyłączenie z sieci w następujących przypadkach:

- utraty stabilności (praca asynchroniczna),
- spadku częstotliwości poniżej 47.5 Hz,
- spadku napięcia na zaciskach górnego napięcia transformatora blokowego poniżej 80% wartości znamionowej,
- zwarcia w sieci trwającego powyżej 150 ms.

Wymienione zabezpieczenia oddziałują na wyłącznik blokowy W, powodując wyłączenie bloku elektroenergetycznego. Po wyłączeniu generatora, lecz także silnika synchronicznego, napięcie na uzwojeniu twornika wzrasta z elektromagnetyczną stałą czasową uzwojenia wzbudzenia  $T_f$ . Jeśli maszyna pracowała przy wzbudzeniu znamionowym, to napięcie biegu jałowego wzrośnie do wartości determinowanej przez charakterystykę biegu jałowego.

Napięcie to stwarza zagrożenie dla izolacji zwojowej maszyny, szczególnie przy często powtarzających się wyłączeniach, gdyż izolacja zwojowa jest standardowo badana przy napięciu  $1.3 U_N$ . W maszynach pracujących kilkanaście bądź więcej lat izolacja starzeje się i jej wytrzymałość dielektryczna obniża się. Przy kolejnych wyłączeniach maszyny może wystąpić zwarcie zwojowe.

### Uszkodzenia eksploatacyjne

Objawy uszkodzenia	Możliwe przyczyny	Możliwe sposoby wykrywania i usuwania usterek
1. Nadmierny wzrost temperatury maszyny	1.1. maszyna nadmiernie obciążona 1.2. kierunek wirowania niewłaściwy względem konstrukcyjnie zamierzonego 1.3. zanieczyszczone kanały wentylacyjne 1.4. zanieczyszczone filtry powietrzne	sprawdzić wskazania przyrządów i zmniejszyć obciążenie  sprawdzić z oznaczeniami i doprowadzić do zgodności  dokonać przeglądu i oczyścić
2. Przegrzanie rdzenia twornika	2.1. praca przy podwyższonym napięciu 2.2. prędkość kątowna zbyt mała przy obciążeniu znamionowym 2.3. zwarcia między blachami 2.4. zniszczone (wypalone, nadtopione lub zgniecione) zęby stali czynnej	sprawdzić wskazania przyrządów i dokonać odpowiednich zmian  sprawdzić podczas remontu
3. Przegrzanie uzwojenia wzbudzającego	3.1. zbyt duży prąd wzbudzenia 3.2. zwarcia międzyzwojowe lub uziemienie w dwóch miejscach uzwojenia wzbudzającego	sprawdzić wskazania przyrządów i zmniejszyć obciążenie bierne u odbiorców  zwykle występują wówczas również drgania maszyny, sprawdzić izolację i uzwojenie, wyremontować

4. Miejscowe przegrzanie maszyny z utajonymi biegunami	4.1. występowanie prądów pasożytniczych 4.2. nieprawidłowo umieszczone połączenia czołowe uzwojeń stojana 4.3. niesymetryczne obciążenie lub zwarcie	błąd konstrukcyjny lub technologiczny sprawdzić wskazania przyrządów i ewentualnie wyłączyć odbiory
5. Brak napięcia przy biegu jałowym	5.1. uszkodzenie wzbudnicy 5.2. uszkodzenie regulatora wzbudzenia 5.3. przerwy lub niedostateczny styk w obwodzie wzbudzenia	sprawdzić magnetyzm szczątkowy wzbudnicy, położenie szczotek, kierunek wirowania, zwarcia lub przerwy sprawdzić prawidłowość styków, występowanie przerw sprawdzić: połączenia międzybiegu nowe, połączenia z pierścieniami ślizgowymi, aparat szczotkowy, zanieczyszczenia pierścieni ślizgowych
6. Zbyt duże napięcie przy biegu jałowym	6.1. źle połączony układ regulacji wzbudzenia 6.2. uszkodzenie regulatora wzbudzenia 6.3. uszkodzenie wzbudnicy	najczęściej skrzyżowanie przewodów fazowych doprowadzonych do regulatora (po remoncie)  jak w 5.2.  jak w 5.1.
7. Występowanie nietypowych napięć	7.1. przerwa w jednej lub dwóch fazach uzwojenia stojana 7.2. nieprawidłowo połączone zezwoje każdej fazy stojana 7.3. nieprawidłowo połączone cewki uzwojenia wzbudzającego 7.4. jak 3.2. 7.5. nieprawidłowo połączone zezwoje jednej z faz 7.6. zły styk w obwodzie wzbudzenia	jedno z napięć fazowych równe zero, sprawdzić przyczynę według dodatkowych objawów i dokonać naprawy  za niskie napięcie biegu jałowego niejednakowe napięcia międzyprzewodowe  wahania napięcia
8. Drgania maszyny	8.1. niewyważony wirnik lub sprzęgło 8.2. uszkodzenie mocowania uzwojenia wzbudzającego 8.3. uszkodzenie w uszczelnieniach łożysk 8.4. wyboczenie wału 8.5. zbyt znaczne luzy w łożyskach 8.6. zła konstrukcja stojaków łożyskowych 8.7. jak 3.2.	gdy drgania występują przy pierwszym uruchomieniu lub po remoncie  wystąpiło przesunięcie uzwojenia, zniekształcenie wskutek zwarcia lub obciążenia niesymetrycznego  najczęściej wskutek zbyt długiego postoju turbogeneratora  mogą wystąpić wskutek prądów wałowych

## **Diagnostyka i ocena stanu technicznego generatora**

Diagnostyka ta obejmuje:

- badanie stojana na postoju, w tym badanie uzwojeń i badanie rdzenia,
- badanie uzwojenia wirnika na postoju,
- badania stojana i wirnika podczas wirowania.

### *Diagnostyka uzwojenia i rdzenia stojana generatora*

Badanie uzwojeń stojana obejmuje pomiary rezystancji uzwojenia i właściwości układu izolacyjnego.

Pomiar rezystancji uzwojenia ma na celu sprawdzenie, czy rezystancja nie wzrosła. Wzrost rezystancji świadczyłby, że w uzwojeniu, prawdopodobnie w miejscach połączenia prętów, są przegrzane punkty, które grożą awarią generatora. Poleca się pomiar rezystancji metodą techniczną. Należy pamiętać, że na poprawny wynik pomiaru w pierwszej kolejności

wpływa zakres pomiarowy mierników prądu i napięcia. Zakresy powinny być tak dobrane, aby odczyty wskazań wartości liczbowych były powyżej 0,8 zakresu skali. W mniejszym stopniu o dokładności pomiaru decyduje klasa pomiarowa mierników. Polecana jest klasa 0,2, lecz dopuszczalna jest także klasa 0,5.

Badania diagnostyczne izolacji są bardziej złożone i obejmują kilka prób:

- badanie izolacji głównej napięciem stałym,
- pomiary napięciem przemiennym: pojemności C i  $\text{tg}\delta$ ,
- badanie wyładowań niezupełnych,

Wymienione próby przeprowadza się na generatorze odłączonym od sieci elektroenergetycznej. Instrukcje wykonania wymienionych badań są podane w załącznikach i dodatkach RIEGS.

Ponadto w generatorach, w których uzwojenia są chłodzone bezpośrednio destylatem bądź wodorem, jeśli w czasie eksploatacji stwierdzono nieszczelność, to przeprowadza się pomiar szczelności uzwojeń. Instrukcja przeprowadzenia wymienionych badań jest podana w załącznikach RIEGS.

Przy generalnych przeglądach generatorów przeprowadza się także badania diagnostyczne rdzenia magnetycznego stojana. Ramowa Instrukcja Eksploatacji Generatorów Synchronicznych poleca badanie poprawności izolacji między blachami i badanie zwartości pakietu blach.

#### *Awaryjność i diagnostyka uzwojenia wirnika*

Uzwojenie wzbudzenia generatorów synchronicznych jest poddawane działaniu różnych sił: odśrodkowych, elektrodynamicznych promieniowych działających w kierunku dna żłobka, elektrodynamicznych działających między prętami i sił termicznych generowanych przez temperaturę prętów.

W czasie wieloletniej eksploatacji naprężenia i drgania generowane przez wymienione siły narażają izolację na uszkodzenie, które skutkuje zwarciami do żelaza wirnika i zwarciami zwojowymi.

Zwarcia zwojowe w uzwojeniu wzbudzenia powodują, że beczka żelaza wirnika nierówno się nagrzewa, i ulega *odkształceniu termicznemu (niewywaga termiczną wirników turbogeneratorów)*, co wywołuje *drgania generatora*. Jeśli generator zimny po uruchomieniu ma niski poziom drgań, a gdy się nagrzeje poziom drgań wzrasta, to jest duże prawdopodobieństwo, że w uzwojeniu wzbudzenia są zwarcia zwojowe.

Drugim czynnikiem generującym drgania mogą być wydłużenia prętów uzwojenia wzbudzenia spowodowane wzrostem temperatury. Pręty bardziej nagrzane wydłużają się bardziej, powoduje to zakłócenie stanu wyważenia dynamicznego wirnika.

Najprostszą i najskuteczniejszą metodą diagnozowania niewywagi termicznej wirnika jest pomiar drgań i jego rozkład na harmoniczne. Częstotliwości  $f$  i  $2f$  charakterystyczne dla niewywagi termicznej wirnika. Dla turbogeneratorów przyjmuje się długotrwale dopuszczalną wartość skuteczną (RMS) prędkości drgań, w zakresie częstotliwości od 10 Hz do 1000 Hz, równą 4,5 mm/s. Nie dopuszcza się turbozespołu do pracy ciągłej przy



prędkości drgań przekraczających wartość 7,1 mm/s. Przy prędkości drgań wynoszącej 11,0 mm/s turbozespół powinien zostać wyłączony z eksploatacji przez system zabezpieczeń.

Maksymalne wychylenie punktu materialnego od położenia równowagi nazywamy amplitudą drgań. Częstotliwością drgań nazywamy wielkość określającą liczbę pełnych drgań zachodzących w czasie jednej sekundy. Wyrażamy ją w cyklach na sekundę [1/s] lub w hercach [Hz]. Prędkość drgań równa jest drodze, jaką przebywa punkt drgający w jednostce czasu i określamy ją w [mm/s].

RIEGS przewiduje badania diagnostyczne uzwojenia wirnika poprzez pomiary:

- rezystancji uzwojenia,
- izolacji głównej napięciem stałym,
- rozkładu indukcji na beczie przy zasilaniu wirnika napięciem przemiennym,
- prądu i mocy pobieranej przez uzwojenie wirnika zasilane napięciem przemiennym.

Instrukcje przeprowadzenia tych pomiarów są podane w załącznikach RIEGS.

### *Diagnostyka pierścieni ślizgowych i szczotek*

Uzwojenie wzbudzenia maszyn synchronicznych są wyprowadzone na pierścienie ślizgowe. Uzwojenie jest zasilane prądem stałym poprzez szczotki i pierścienie tworzące tzw. zestyk ślizgowy. Poprawnie pracujący zestyk ślizgowy powinien charakteryzować się:

- małym spadkiem napięcia,
- małym współczynnikiem tarcia,
- dużą trwałością, to jest małą ścieralnością pierścieni i szczotek,
- pracą beziskrową,
- niskim poziomem hałasu,
- łatwym dostępem do wymiany zużytych szczotek.

Ujemne pierścienie ślizgowe zużywają się (korodują) więcej od pierścieni dodatnich. Zaleca się co pewien czas (przynajmniej raz w roku) zmieniać biegunowość napięcia na pierścieniach. Dla maszyn pracujących jest to operacja trudna, generator może wypaść z synchronizmu. Generator należy doprowadzić do stanu jałowego ( $P = 0$ ) i powoli zmniejszać prąd wzbudzenia do zera, zmienić biegunowość napięcia wzbudzenia i powoli zwiększać prąd wzbudzenia. Można także wyłączyć generator z systemu elektroenergetycznego, zmienić biegunowość napięcia wzbudzenia i generator synchronizować z systemem elektroenergetycznym. W RIEGS [8.5] zaleca się zmieniać biegunowość pierścieni co trzy miesiące.

### *Klatka tłumiąca*

- tłumią kołysania generatorów
- zapewnia rozruch asynchroniczny silników synchronicznych

Uzwojenie klatkowe - pręty umieszczone w nabiegownikach i zwarte na czołach pierścieniami, identycznie jak w silnikach indukcyjnych. Wariant drugi – wykorzystanie stalowych nabiegowników, zwartych pierścieniami miedzianymi, przez które płynie prąd (wykorzystuje się w nowych silnikach synchronicznych).

Problemy podobne jak w silnikach indukcyjnych.