


# HYDROENERGETYKA



## PRĄDNICE ELEKTRYCZNE

*Ryszard Myhan*  
WYKŁAD 5



# TYPY PRĄDNICY

- ▶▶ W małych elektrowniach wodnych są stosowane dwa rodzaje prądnic:
  - prądnice asynchroniczne (indukcyjne) trójfazowe prądu przemiennego;
  - prądnice synchroniczne prądu przemiennego.
- ▶▶ W zależności od kompozycji turbozespołu, oraz rodzaju i typu turbiny – prądnice mogą mieć wał poziomy, pionowy, a niekiedy też skośny.
- ▶▶ Wał prądnicy może być sprzężony bezpośrednio z wałem turbiny, bądź też za pośrednictwem przekładni zębatej lub pasowej.
- ▶▶ Sposób sprzężenia zależy od rodzaju turbiny i prądnicy, ich prędkości obrotowych, mocy i ułożyskowania.

# TYPY PRĄDNICY

- ▶▶ Prądnice synchroniczne instalowane w MEW, umożliwiają stabilną pracę elektrowni w sieci wydzielonej – w przypadku przerwania zasilania tej sieci z innych źródeł MEW może stanowić źródło rezerwowego zasilania wydzielonej grupy odbiorców.
- ▶▶ Prądnice asynchroniczne trójfazowe prądu przemiennego są stosowane w MEW, których zadaniem jest wyłącznie wykorzystywanie niezagospodarowanych cieków wodnych i które nie mają charakteru źródeł rezerwowego zasilania.
- ▶▶ Energia wytworzona przez prądnicę asynchroniczną jest oddawana do lokalnej sieci elektroenergetycznej zasilanej równolegle z innymi źródłami.

# WIELKOŚĆ I PARAMETRY PRĄDNICY

▶▶ Moc prądnicy w MEW jest zazwyczaj dobierana do maksymalnej mocy turbiny z uwzględnieniem typowego szeregu mocy na podstawie wzoru:

$$P_g = \frac{P_t \cdot \eta_g}{\cos \varphi}$$

gdzie:

$P_g$  – moc pozorna na zaciska generatora, kVA;

$P_t$  – moc na wale turbiny, kW;

$\eta_g$  – sprawność generatora;

$\cos \varphi$  - współczynnik mocy generatora.

# WIELKOŚĆ I PARAMETRY PRĄDNICY

- ▶▶ Prędkość obrotową generatora, w przypadku bezpośredniego sprzężenia z turbiną, dobiera się do obrotów turbiny.
- ▶▶ Małe generatory synchroniczne mają zwykle obroty znamionowe: 500, 600, 750, 1000 i 1500 obr/min.
- ▶▶ W zależności od typów, spadów i przęłyków turbin, prędkości te pozwalają na bezpośrednie sprzężenie prądnicy z turbiną – rozwiązanie takie jest rozwiązaniem optymalnym.
- ▶▶ Jeżeli znamionowa prędkość obrotów turbiny jest nieco mniejsza niż prędkość znamionowa generatora, to konieczne jest stosowanie przekładni podwyższającej.
- ▶▶ Przekładni obniżającej obroty nie stosuje się.

# WIELKOŚĆ I PARAMETRY PRĄDNICY

- ▶▶ Stosowanie przekładni zmniejsza sprawność turbozespołu, zwiększa jego koszt i poziom hałasu, poza tym stanowi dodatkowy element obniżający pewność pracy turbozespołu.
- ▶▶ W praktyce są stosowane różne typy przekładni.
- ▶▶ W przypadku turbozespołu o mniejszej mocy z wałem poziomym zaleca się stosowanie przekładni pasowych.
- ▶▶ Są one wykonywane z wielowarstwowych pasów płaskich i umożliwiają w jednym stopniu uzyskanie przełożenia nawet 1:6.

# WIELKOŚĆ I PARAMETRY PRĄDNICY

- ▶▶ Prądnice o mniejszych mocach dla MEW są konstruowane na napięcia znamionowe 380 V i 400 V, o większych mocach – na napięcia 3,15 kV i 6,3 kV.
- ▶▶ O wyborze napięcia znamionowego decydują przede wszystkim względy ekonomiczne, a następnie dostępność odpowiedniej aparatury, jej wytrzymałość termiczna i dynamiczna, jak również możliwość selektywnego zabezpieczenia układu.
- ▶▶ Prądnice asynchroniczne – gdy do tego celu wykorzystywane są typowe silniki asynchroniczne, mają zwykle napięcie znamionowe równe 380 V.
- ▶▶ Prądnice synchroniczne mniejszych mocy mają zwykle napięcie znamionowe równe 400 V.

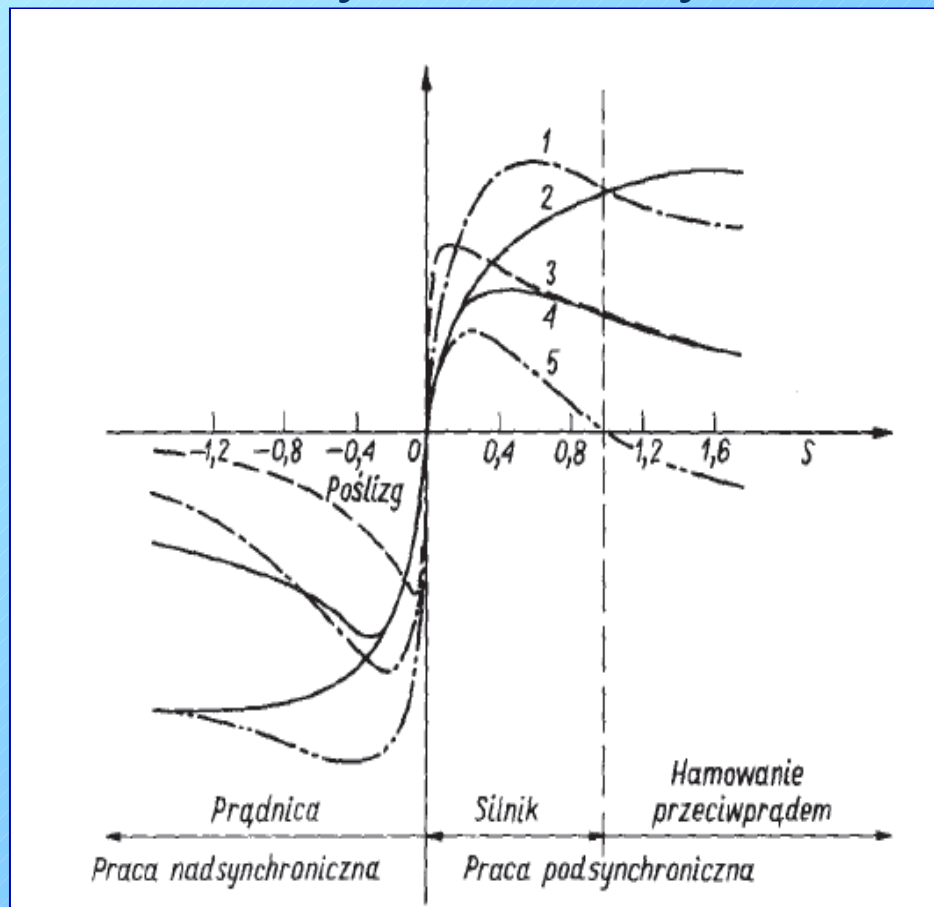
# PRĄDNICE ASYNCHRONICZNE (INDUKCYJNE)

- ▶▶ Generator asynchroniczny, pobierając prąd magnesujący z sieci, może oddawać moc czynną tylko przy równoległej pracy z siecią zasilaną przez generatory synchroniczne, a zatem **nie może pracować samotnie na sieć wydzieloną**.
- ▶▶ W przypadku zaniku napięcia w sieci, także napięcie generatora asynchronicznego zanika.
- ▶▶ Generator asynchroniczny stosuje się wyłącznie w małych elektrowniach wodnych ze względów natury ekonomicznej, gdyż mają one prostszą konstrukcję, są lżejsze i tańsze, a przede wszystkim nie wymagają regulacji napięcia i synchronizacji.



# PRĄDNICE ASYNCHRONICZNE

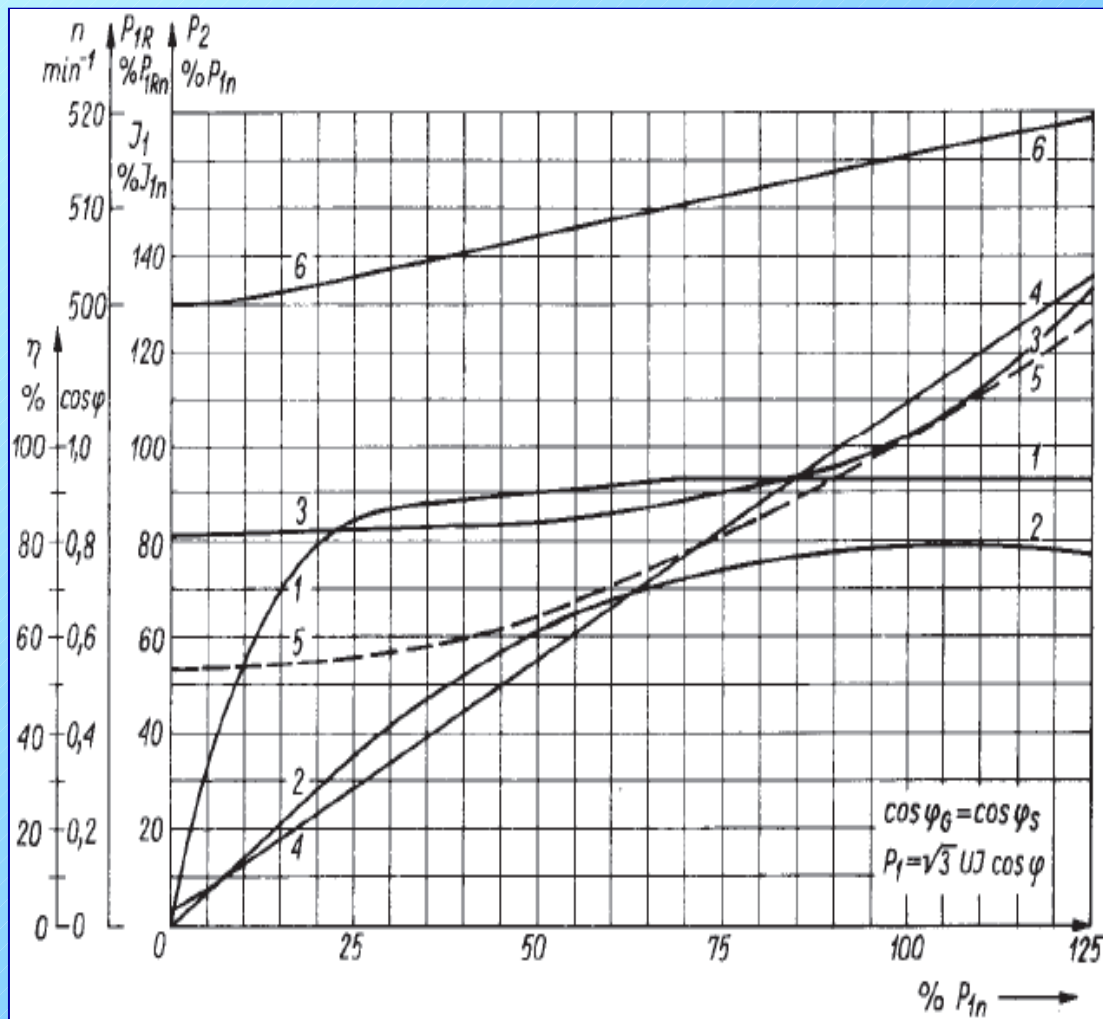
▶▶ Jeżeli silnik indukcyjny przyłączony do sieci jest obracany przez turbinę wodną to silnik stanie się generatorem asynchronicznym i oddaje do sieci moc czynną.



1. moc elektryczna;
2. prąd;
3. moment;
4.  $\cos \varphi$ ;
5. moc mechaniczna.

# PRĄDNICE ASYNCHRONICZNE

Charakterystyka obciążeniowa 12-biegunowej prądnicy asynchronicznej w funkcji mocy czynnej oddawanej do sieci przy  $U=380\text{ V}$ ,  $f=50\text{ Hz}$ .



- 1 – sprawność;
- 2 – współczynnik mocy;
- 3 – procentowa ( w stosunku do znamionowej mocy biernej) wartość mocy biernej pobieranej z sieci;
- 4 – procentowa w odniesieniu do znamionowej mocy oddawanej do sieci wartość mocy na wale prądnicy;
- 5 – procentowy w stosunku do wartości znamionowej prąd stojana;
- 6 – prędkość obrotowa prądnicy.

# PRĄDNICE ASYNCHRONICZNE – MOC CZYNNA

- ▶▶ Moc znamionowa przy pracy prądnicowej maszyny indukcyjnej jest większa od znamionowej mocy przy pracy silnikowej o wartość strat w systemie pracy silnikowej.
- ▶▶ Przy założeniu, że  $\cos \varphi$  w obu systemach pracy nie ulega zmianie, moc czynna pobierana lub oddawana do sieci energetycznej jest określana wzorem

$$P_{czG} = P_S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \mathbf{cos} \varphi \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}]$$

$P_S$  – pobierana moc znamionowa silnika;

$U$  – napięcie znamionowe sieci;

$I$  – prąd znamionowy silnika;

$\cos \varphi$  – znamionowy współczynnik mocy silnika.

# PRĄDNICE ASYNCHRONICZNE - MOC BIERNA

- ▶▶ O ile kierunki przepływu mocy czynnych zależą od systemu pracy maszyny indukcyjnej, to kierunki przepływu mocy biernych dla obu systemów nie ulegają zmianie – moc bierna w obu systemach jest dostarczana z zewnątrz.
- ▶▶ Moc pobieraną z zewnątrz przez maszynę indukcyjną określa wyrażenie

$$P_b = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot 10^{-3} \quad [\text{kVA}]$$

Podłączenie prądnicy asynchronicznej do sieci i generowanie przez nią mocy czynnej wpływa na zmniejszenie strat przepływu i poprawę napięć w sieci, co w warunkach krajowych rekompensuje pobór mocy biernej z sieci i eliminuje potrzebę stosowania baterii kondensatorów statycznych w celu poprawy  $\cos \varphi$ .

Tym niemniej w rozwiązaniach zagranicznych MEW z prądnicami asynchronicznymi na napięciu 400 V są stosowane baterie kondensatorów.

# DOBÓR GENERATORA ASYNCHRONICZNEGO

▶▶ W katalogach silników podaje się moc w kilowatach na wale silnika i współczynnik sprawności.

▶▶ Moc takiego generatora oblicza się z zależności:

$$P_g = \frac{P_{sil}}{\eta}$$

▶▶ W katalogach podaje się również prędkość obrotową znamionowa.

▶▶ Odejmując tę prędkość od prędkości obrotowej synchronicznej, znajduje się poślizg silnika.

▶▶ Dodając poślizg do prędkości obrotowej synchronicznej, oblicza się prędkość obrotową generatora przy częstotliwości 50 Hz i przy mocy znamionowej.

# DOBÓR GENERATORA - przykład

## Przykład.

Silnik indukcyjny o parametrach:

$$P = 88 \text{ kW},$$

$$n = 485 \text{ obr/min},$$

$$U = 380 \text{ V},$$

$$\eta = 0,88,$$

pracujący jako generator będzie miał:

- *moc znamionową równą*

$$P_g = \frac{P_{sil}}{\eta} = \frac{88}{0,88} = 100 \text{ kW}$$

- *prędkość obrotową znamionową*

$$n = 500 + (500 - 485) = 515 \text{ obr/min}$$

# DOBÓR GENERATORA - ograniczenia

- ▶▶ **Konstrukcje typowych silników asynchronicznych gwarantują wytrzymałość mechaniczną ich wirników na podwyższona prędkość obrotową jedynie 1,2 razy większą niż prędkości znamionowej.**
- ▶▶ **Dlatego przed zainstalowaniem silnika jako generatora asynchronicznego należy bezwzględnie uzyskać od producenta gwarancję na wytrzymałość mechaniczną przy zwiększonej, rozbiegowej prędkości obrotowej w czasie minimum 2 minut.**

# DOBÓR GENERATORA - ograniczenia

- ▶▶ W przypadku konieczności stosowania przekładni pasowej podwyższającej – w prądnicach serii  $f$  o wielkościach mechanicznych od 132 do 280 (5,5 – 55 kW) mogą być stosowane koła pasowe osadzone bezpośrednio na czopach napędowych wałów **pod warunkiem, że nie zostaną przekroczone dopuszczalne obciążenia poprzeczne.**
- ▶▶ W przypadku przekroczenia tych wartości, koło pasowe o mniejszej średnicy powinno mieć własne ułożyskowanie w specjalnych stojakach łożyskowych, a połączenie czopa napędowego prądnicy i przystawki łożyskowej koła pasowego przekładni powinno być wykonane za pomocą **sprzęgła podatnego.**



# DOBÓR GENERATORA - ograniczenia

Dopuszczalne obciążenia poprzeczne  $F_r$  i podłużne  $F_o$  czopa końcowego wału indukcyjnych silników klatkowych serii f (wg danych Instytutu Elektrotechniki)

Wielkość mechaniczna	$F_r$ [N]		$F_o$ [N]	
	2p=6	2p=8	2p=6	2p=8
<b>132</b>	<b>2000</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>160</b>	<b>1700</b>	<b>1800</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>180</b>	<b>1900</b>	<b>2200</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>200*</b>	<b>2000</b>	<b>2300</b>	<b>1300</b>	<b>1500</b>
<b>200**</b>	<b>5000</b>	<b>5500</b>	<b>1300</b>	<b>1500</b>
<b>225*</b>	<b>2100</b>	<b>2500</b>	<b>1400</b>	<b>1700</b>
<b>225**</b>	<b>5600</b>	<b>6300</b>	<b>1400</b>	<b>1700</b>
<b>250*</b>	<b>2400</b>	<b>2800</b>	<b>1300</b>	<b>1600</b>
<b>250**</b>	<b>7000</b>	<b>7700</b>	<b>1300</b>	<b>1600</b>
<b>280*</b>	<b>3300</b>	<b>3600</b>	<b>1800</b>	<b>2000</b>
<b>280**</b>	<b>9000</b>	<b>9800</b>	<b>1800</b>	<b>2000</b>

\*) – strona napędu i przeciwna: łożyska kulkowe;

\*\*\*) – strona napędu: łożysko walcowe, strona przeciwna: łożysko kulkowe.

# PRĄDNICE (GENERATORY) SYNCHRONICZNE

- ▶▶ Generator synchroniczny (prądnicą synchroniczną) to taki generator, którego prędkość obrotowa jest w synchronizacji z częstotliwością sieci energetycznej wyrażoną wzorem:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad \text{Hz}$$

gdzie:

$f$  – częstotliwość,

$n$  – prędkość obrotowa, obr/min,

$p$  – liczba par biegunów.

# PRĄDNICE (GENERATORY) SYNCHRONICZNE

- ▶▶ Prędkość obrotową generatora synchronicznego przy  $f = 50$  Hz można wyznaczyć ze wzoru:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad \text{obr/min}$$

- ▶▶ Silniki napędowe połączone bezpośrednio z generatorem mogą pracować tylko z takimi prędkościami obrotowymi znamionowymi, jakie otrzymuje się z powyższego wzoru przy  $p$  równym liczbie całkowitej.
- ▶▶ Prędkości obrotowe generatorów napędzanych turbinami wodnymi są zawarte w przedziale 50 – 1500 obr/min (wyjątkowo spotyka się niższe).

# PRĄDNICE (GENERATORY) SYNCHRONICZNE

- ▶▶ Generator synchroniczny potrzebuje do wzbudzenia obcego źródła prądu stałego, które zasila uzwojenie biegunów i wytwarza strumień magnetyczny wirnika.
- ▶▶ Do najczęściej stosowanych układów wzbudzania należą:
  - układ wzbudzania ze wzbudnicą prądu stałego,
  - prostownik krzemowy,
  - bezszczotkowy układ wzbudzania (wzbudnica prądu przemiennego z wirującymi diodami).
- ▶▶ Im większa liczba par biegunów a zatem mniejsza prędkość obrotowa, potrzebna jest większa moc wzbudzenia - Jest to zasadnicza przyczyna mniejszej sprawności generatorów wolnoobrotowych.

# PRĄDNICE (GENERATORY) SYNCHRONICZNE

- ▶▶ Moc generatorów dobiera się zazwyczaj w zależności od maksymalnej mocy turbiny z uwzględnieniem typowego szeregu mocy.
- ▶▶ Moc generatora ograniczona jest jego ogrzewaniem się ponad temperaturę otoczenia, a nagrzewanie przy stałym napięciu zależy od wartości prądu.
- ▶▶ Moc generatora podaje się w jednostkach mocy pozornej – kVA – jest to moc odnosząca się do przebiegów elektrycznych sinusoidalnych zmiennych, określona iloczynem wartości skutecznej prądu przez wartość skuteczną siły elektromotorycznej lub napięcia.

# PRĄDNICE (GENERATORY) SYNCHRONICZNE

- ▶▶ Moc pozorna znamionowa generatora pomnożona przez współczynnik mocy ( $\cos\varphi$ ) daje czynną moc znamionową generatora w kW.
- ▶▶ Generator może oddawać swoją pełną moc pozorną tylko przy  $\cos\varphi$  równym lub większym od  $\cos\varphi$  znamionowego.
- ▶▶ Generatory pracując pod obciążeniem odpowiadającym wsp. mocy  $\cos\varphi$  mniejszym od znamionowego, nagrzewałyby się powyżej temperatury dopuszczalnej.

# PRĄDNICE (GENERATORY) SYNCHRONICZNE

▶▶ Wymiary generatora normalnej budowy, jego moc i prędkość obrotowa są związane następującą zależnością:

$$\frac{D^2 \cdot l \cdot n}{P} = C \approx 2 \cdot 10^5$$

gdzie:

$D$  – średnica wewnętrzna żelaza czynnego stojana, cm;

$l$  - długość żelaza czynnego, cm;

$n$  – prędkość obrotowa, obr/min.;

$P$  – moc generatora, kVA;

$C$  – stała.

# PRĄDNICE (GENERATORY) SYNCHRONICZNE

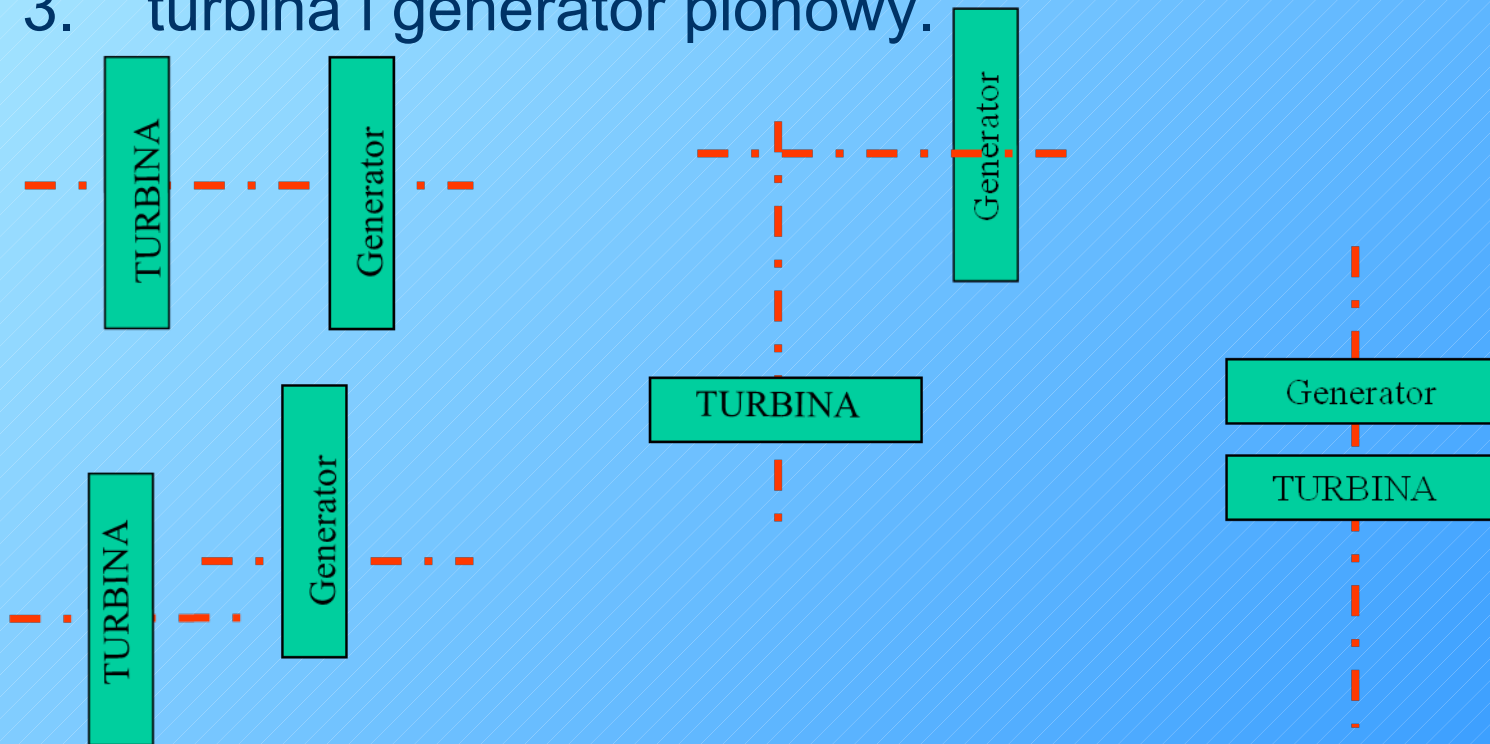
- ▶▶ Konstruktor, korzystając z powyższego wzoru może zmienić stosunek  $D//$  generatora o danej prędkości obrotowej zależnie od wymagań stawianych generatorowi.
- ▶▶ Na przykład stosunek ten bywa zwiększany, gdy warunki regulacji turbozespołu wymagają zwiększenia momentu zamachowego  $GD^2$ , lub też zmniejszany np. w generatorach turbozespołów gruszkowatych, w których generator powinien mieć możliwie małą średnicę.



# PRZEKŁADNIE

- W elektrowniach wodnych można spotkać następujące trzy wzajemne układy osi turbiny i generatora:

1. turbina i generator o osi poziomej,
2. turbina pionowa, generator poziomy,
3. turbina i generator pionowy.



# PRZEKŁADNIE

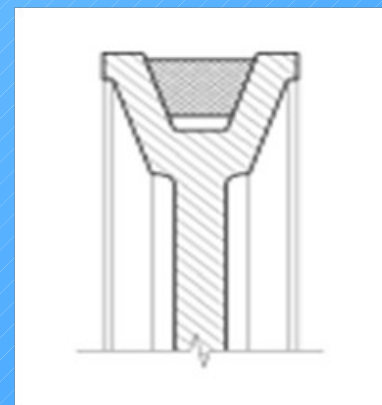
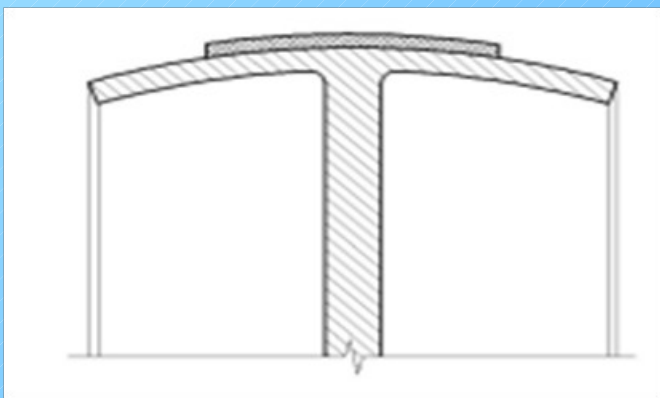
- W celu zwiększenia obrotów generatora w porównaniu z obrotami turbiny stosuje się **przekładnie**.
- W małych elektrowniach stosowane są wtedy prądnice (generatory) o obrotach 500, 600 i 750 obr/min (rzadziej 1000 lub 1500 obr/min).
- W turbozespołach wodnych stosowane są przekładnie:
  - **zębate** – w całym zakresie mocy turbozespołów małych elektrowni (< 5MW);
  - **pasowe z pasami płaskimi** – do ok. 1,5 MW;
  - **pasowe klinowe** – do ok. 0,5 MW przenoszonej mocy.

# PRZEKŁADNIE ZĘBATE

- Główną zaletą przekładni zębatej jest zwarta konstrukcja turbozespołu, niezależnie od wzajemnego usytuowania turbiny i generatora.
- Przy doborze przekładni do turbozespołu wodnego należy uwzględnić trzy czynniki decydujące o jej trwałości:
  - wytrzymałość zębów z uwagi na przenoszone momenty,
  - ścieranie się zębów,
  - nagrzewanie się przekładni na wskutek tarcia (zęby i łożyska).

# PRZEKŁADNIE PASOWE

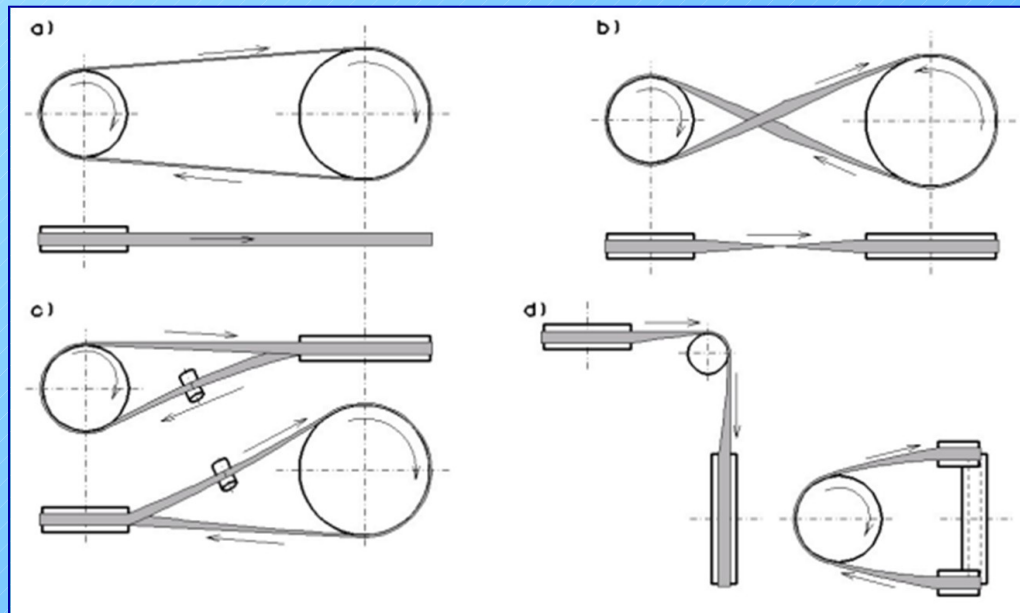
- Przekładnie pasowe przenoszą moc dzięki sile tarcia między powierzchniami kół i współpracującym z nimi pasem.
- Koła pasowe mogą być osadzone bezpośrednio na wałach turbiny i generatora lub przez zastosowanie dodatkowego łożyskowania (wówczas koła pasowe łączone z wałami za pomocą sprzęgieł sztywnych).
- Pasy pędne mogą być płaskie lub klinowe:



# PRZEKŁADNIE PASOWE

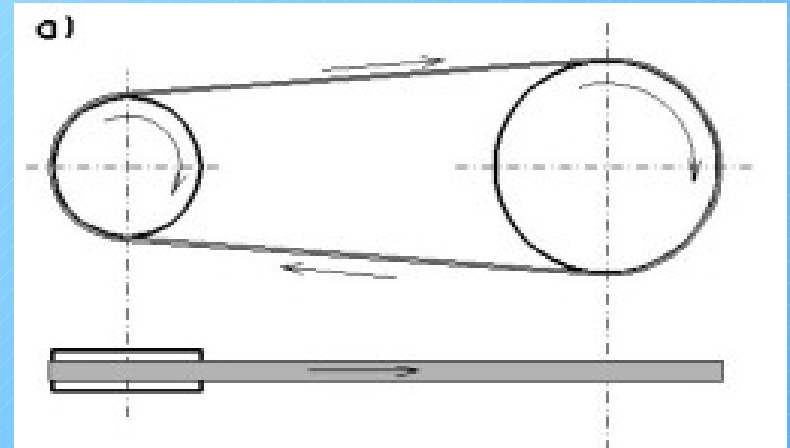
- Zaletami przekładni pasowych są: cichobieżność i wysoka sprawność

- płaskich  $\geq 99\%$ ,
- klinowych  $\geq 98\%$ .



- Do wad należy zaliczyć potrzebę zapewnienia większej przestrzeni niż w wypadku przekładni zębatej oraz konieczność regulacji odległości między kołami pasowy lub stosowanie napinacza.

# PRZEKŁADNIE PASOWE – PRZYKŁAD OBLICZEŃ



- Wymagane przełożenie

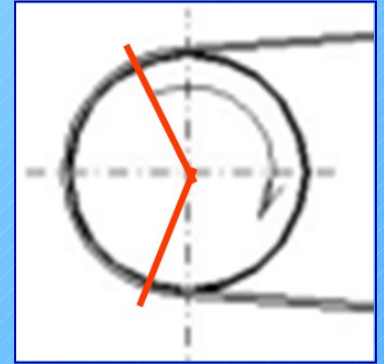
$$i = \frac{n_t}{n_g} = \frac{360}{500} = 0,72 \quad [i] = \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right] = [1]$$

- Średnica koła napędzanego (generatora)

$$d_g = i \cdot d_t = 0,72 \cdot 640 = 461 \quad [d_g] = [\text{mm}]$$

# PRZEKŁADNIE PASOWE – PRZYKŁAD OBLICZEŃ

- Kąt opasania małego koła (turbiny)



$$\beta = 180 - \frac{60 \cdot (d_t - d_g)}{e} = 180 - \frac{60 \cdot (640 - 461)}{2000} = 174^\circ 26'$$

- Prędkość obrotowa koła dużego (prędkość przesuwania się pasa)

$$v_t = \pi \cdot d_t \cdot n_t = \pi \cdot 640 \cdot 10^3 \frac{360}{60} = 12,1 \quad [v_t] = \left[ 1 \cdot \text{mm} \cdot 10^3 \cdot \frac{1/\text{min}}{\text{s/min}} \right] = [\text{m/s}]$$

- Siła uciągu przenoszona przez pas

$$F = \frac{N}{v_t} = \frac{100 \cdot 10^3}{12,1} = 8290 \quad [F] = \left[ \frac{\text{kW} \cdot 10^3}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} \right] = \left[ \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}} \right] = [\text{N}]$$