

Laboratorium

Odnawialnych Źródeł Energii



**Politechnika Krakowska**  
Wydział Inżynierii  
Elektrycznej i Komputerowej

# Układy generacji dla przepływowych niskospadowych małych elektrowni wodnych

**Dariusz Borkowski**

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej  
Politechnika Krakowska  
e-mail: [dariusz.borkowski@pk.edu.pl](mailto:dariusz.borkowski@pk.edu.pl)

**HYDROFORUM**  
2025 - Ryto,  
7-9.10.2025 r.





## Cel:

Porównanie układów generacji energii elektrycznej stosowanych w niskospadowych MEW z uwagi na całkowitą sprawność energetyczną z uwzględnieniem zmiennej prędkości obrotowej.

## Założenia:

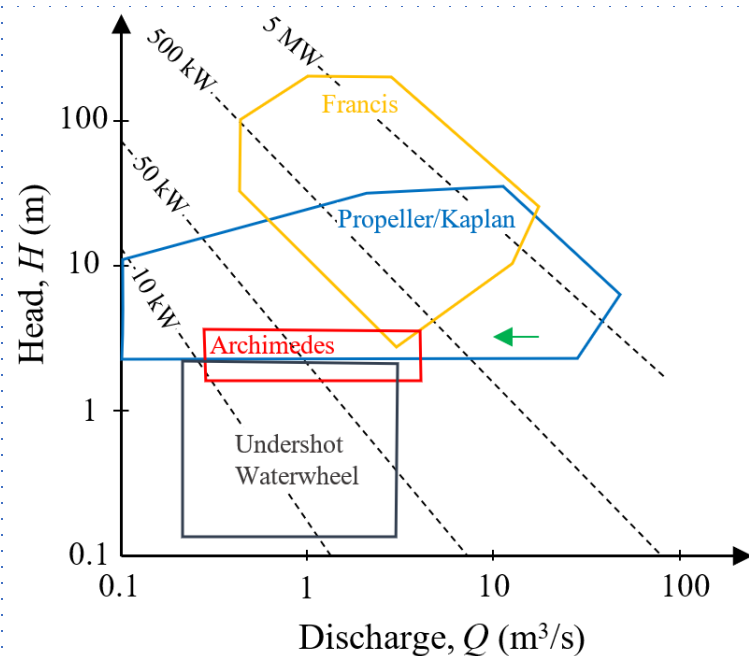
- stały spad  $H=\text{const}$ ,
- wartości odniesione do danych znamionowych tzw. pu,
- wartości sprawności wyrażone w funkcji mocy  $\eta(P)$ .

## Źródło danych:

- badania własne (pomiar, symulacje),
- literatura naukowa i branżowa.

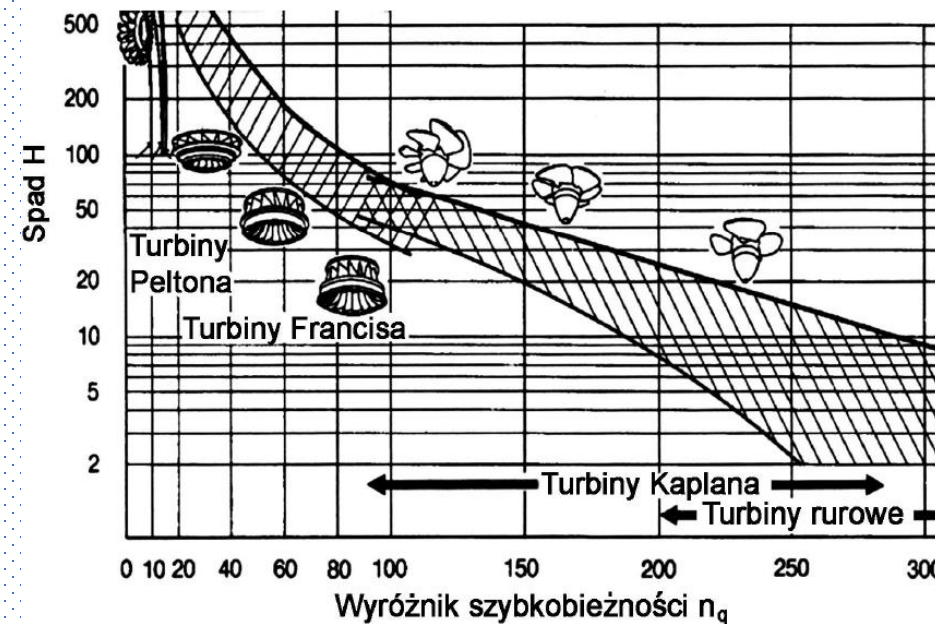


## Turbina wodna



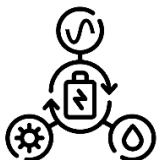
### Typowy zakres zastosowań turbin wodnych

Na podstawie: D. Zhou and Z. Deng, "Ultra-low-head hydroelectric technology: A review," *Renewable Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 23–30, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.086.

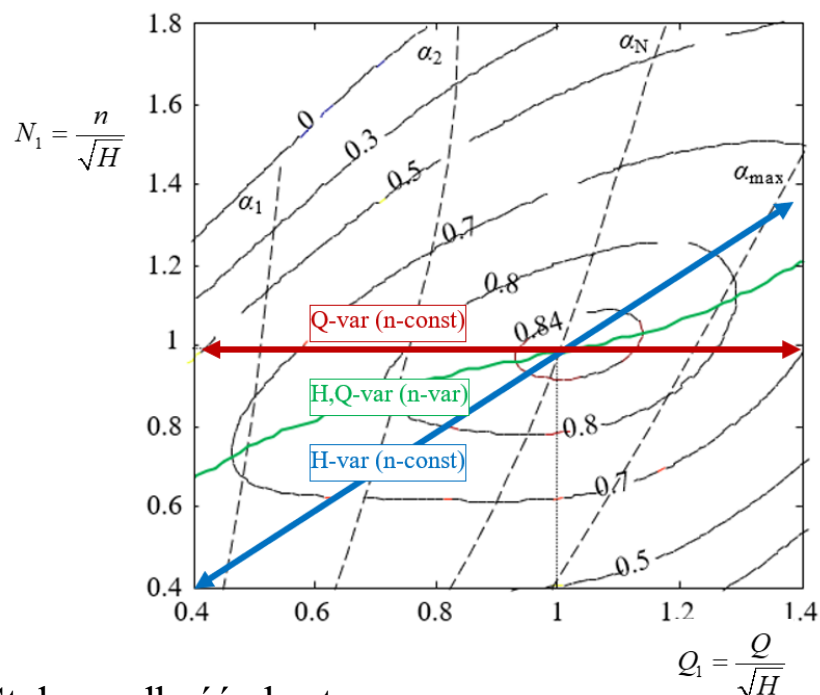


Rodzaje turbin hydraulicznych i związane nimi kształty ich wirników w zależności od spad  $H$  i kinematycznego wyróżnika szybkobieżności

(źródło: De Siervo F., De Leva F.: *Modern designing Francis turbines*, Water power & Dam Construction, August 1976.)



## Turbina wodna

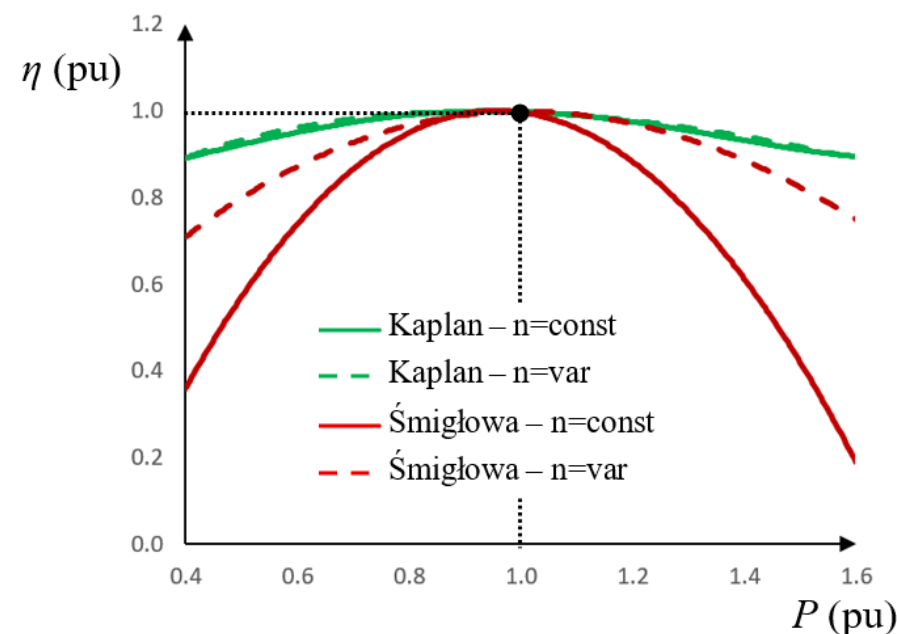


### Stała prędkość obrotowa:

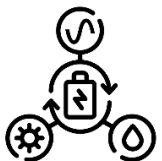
- jednoczesne zmiany  $Q$  i  $H$  powodują przesuwanie się punktu pracy po całej charakterystyce turbiny (**wymuszona praca w całym obszarze przez warunki hydrologiczne**)

### Zmienna prędkość obrotowa:

- umożliwia wybranie krzywej pracy na charakterystyce w zależności od zmiany  $Q$ , np. tak aby zmaksymalizować sprawność turbiny (hydrozespołu) oraz dodatkowo ominąć obszary z kavitacją

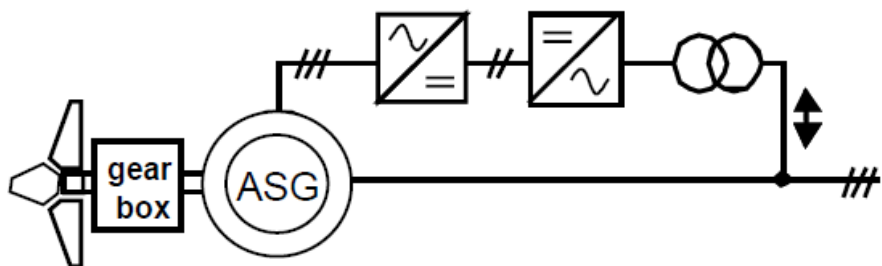
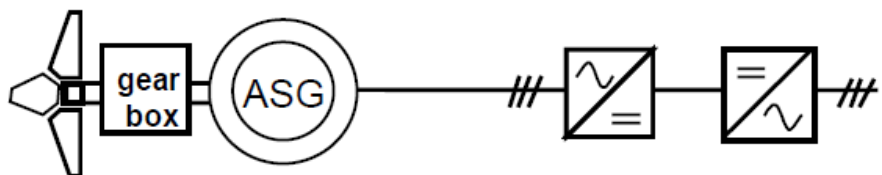
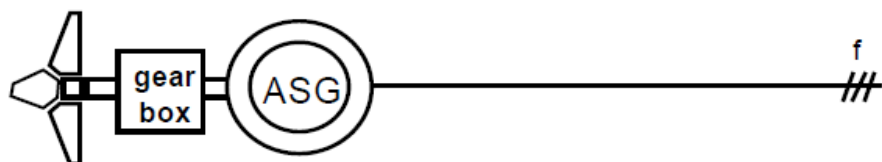


Porównanie przykładowych charakterystyk sprawności turbiny śmigłowej i Kaplana (Zał.  $H$ =const)

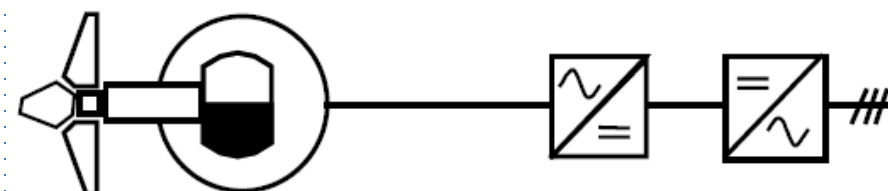
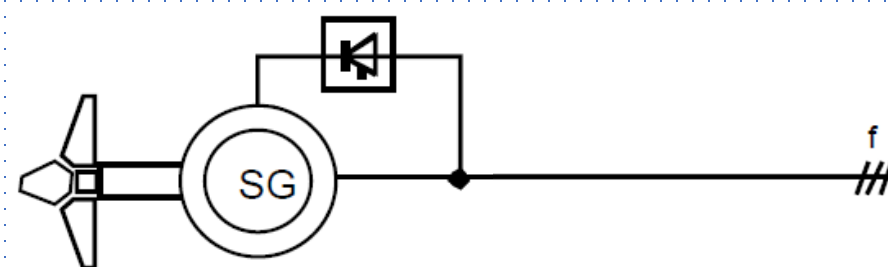


## Układy przetwarzania energii mechanicznej turbiny na elektryczną

Generator asynchroniczny (indukcyjny)



Generator synchroniczny





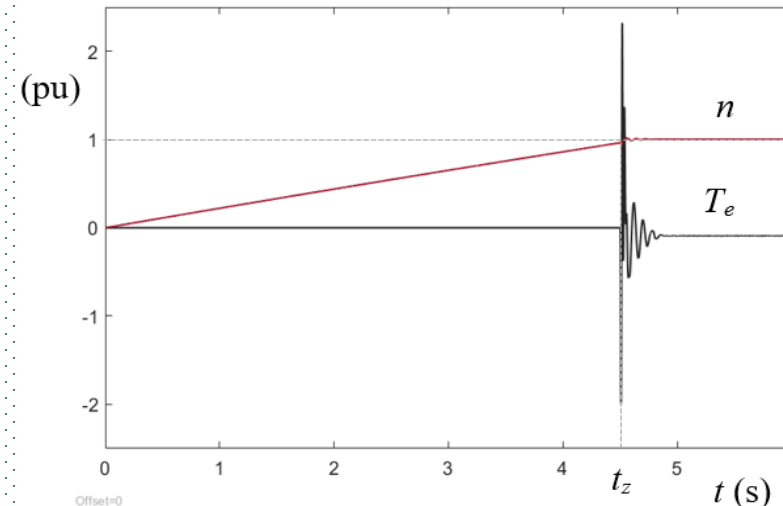
## Generatory Elektryczne

### Generator asynchroniczny (indukcyjny):

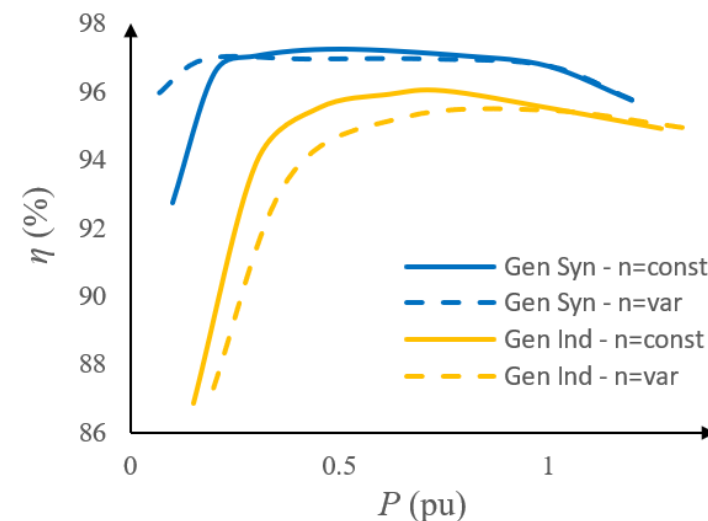
- niski koszt, duża dostępność oraz niezawodność,
- brak napięcia na zaciskach obracającego się generatora przy braku połączenia z siecią;
- brak możliwości regulacji mocy biernej i konieczność kompensacji poprzez zewnętrzne układy;
- występowanie dużych wartości szybkozmiennych momentów elektromagnetycznych na wale generatora podczas procesu podłączenia do sieci elektroenergetycznej

### Generator synchroniczny:

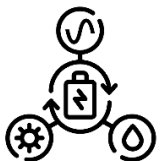
- wysokie sprawności znamionowe (97.5%), utrzymywanie wysokiej sprawności w szerokim zakresie zmian mocy
- możliwość uzyskania niskich znamionowych prędkości obrotowych w maszynach z magnesami trwałymi (eliminacja przekładni mechanicznej)
- wysoki koszt zakupu
- napięcie na zaciskach obracającego się generatora przy braku połączenia z siecią



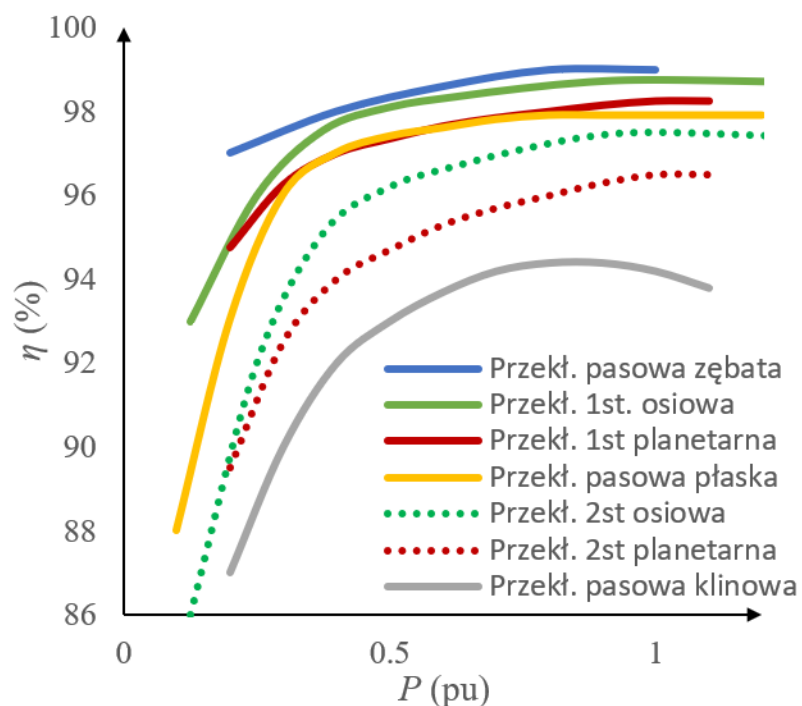
Rys.2 Proces podłączenia generatora indukcyjnego klatkowego 110 kW do sieci elektroenergetycznej



Rys.3 Krzywe sprawności generatorów indukcyjnych oraz synchronicznych dla mocy powyżej 100 kW

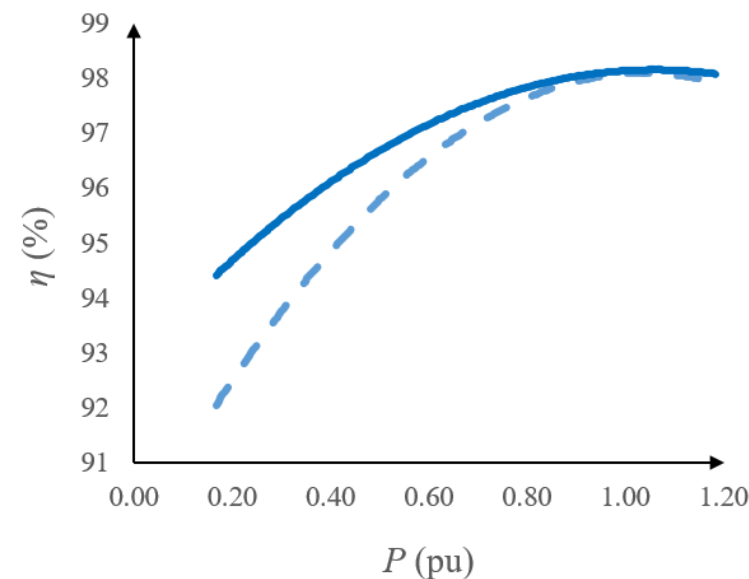


## Przekładnia mechaniczna

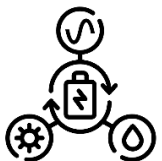


Rys.4 Charakterystyka sprawności przekładni mechanicznej

## Falownik energoelektroniczny

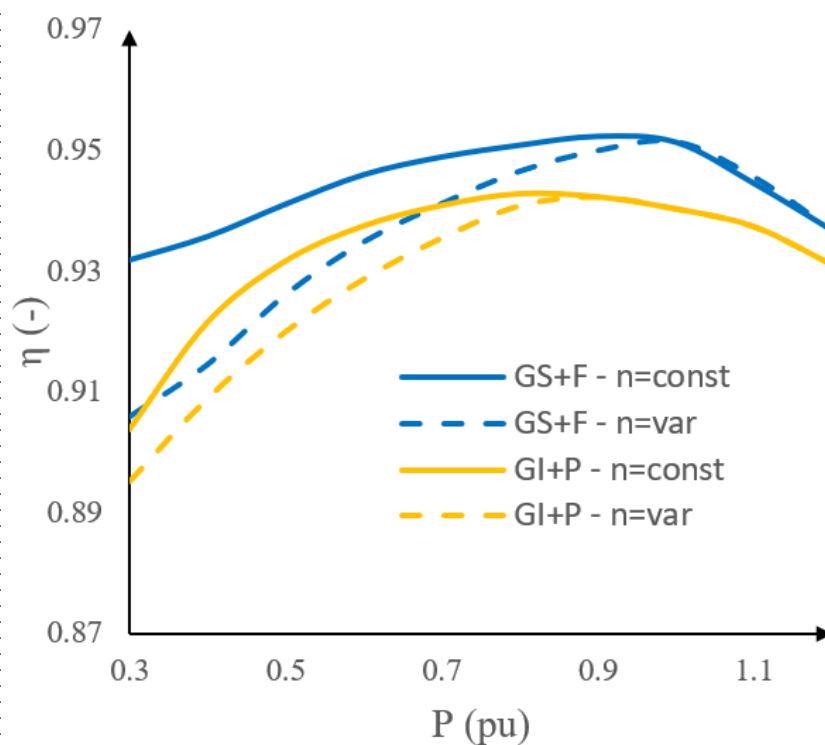


Rys.5 Przykładowa charakterystyka sprawności przekształtnika energoelektronicznego dla stałej prędkości (linia ciągła) oraz zmiennej prędkości obrotowej (linia przerywana).

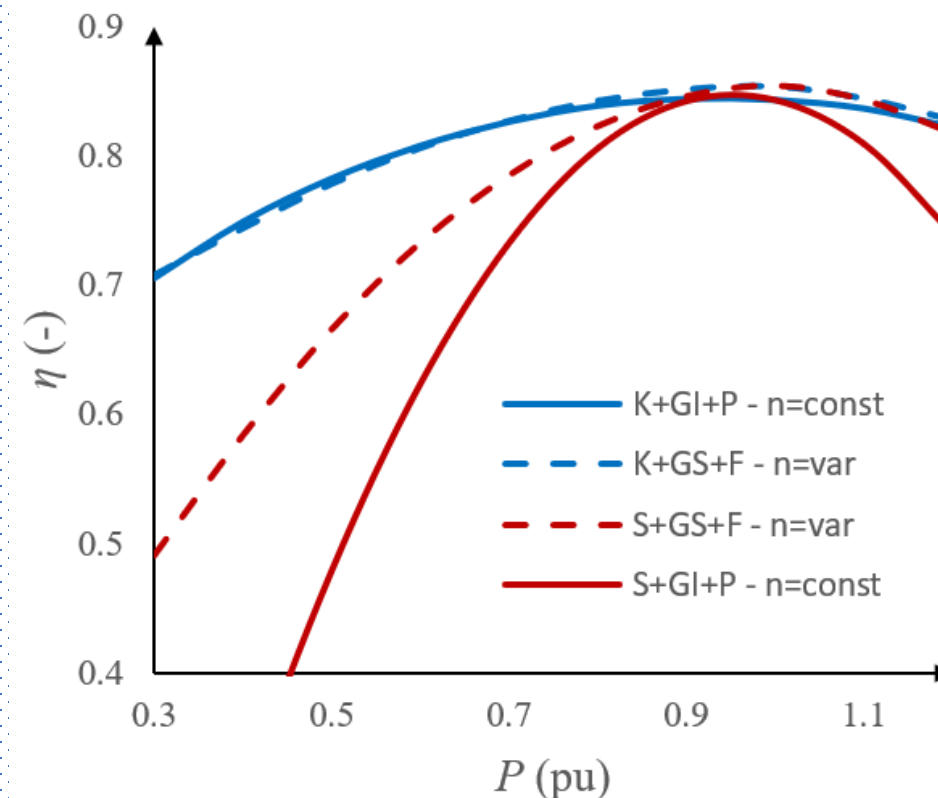


## Porównanie wybranych rozwiązań układów generacyjnych

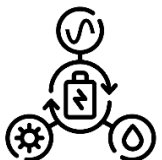
Założenia: - przekładnia jednostopniowa planetarna,  
- znamionowa sprawność turbiny 90%.



Rys.6 Charakterystyki sprawności układu przetwarzania energii mechanicznej turbiny na elektryczną



Rys.9 Charakterystyki sprawności hydrozespołów wybranych układów.



## Podsumowanie:

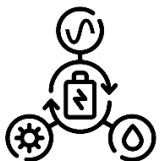
Wykorzystanie układów z **wysokosprawnym generatorem synchronicznym oraz przekształtnikiem:**

- daje największe korzyści w postaci zwiększonej sprawności w przypadku turbiny śmigłowej.
- w przypadku turbiny Kaplana zysk sprawności nie jest znaczący.

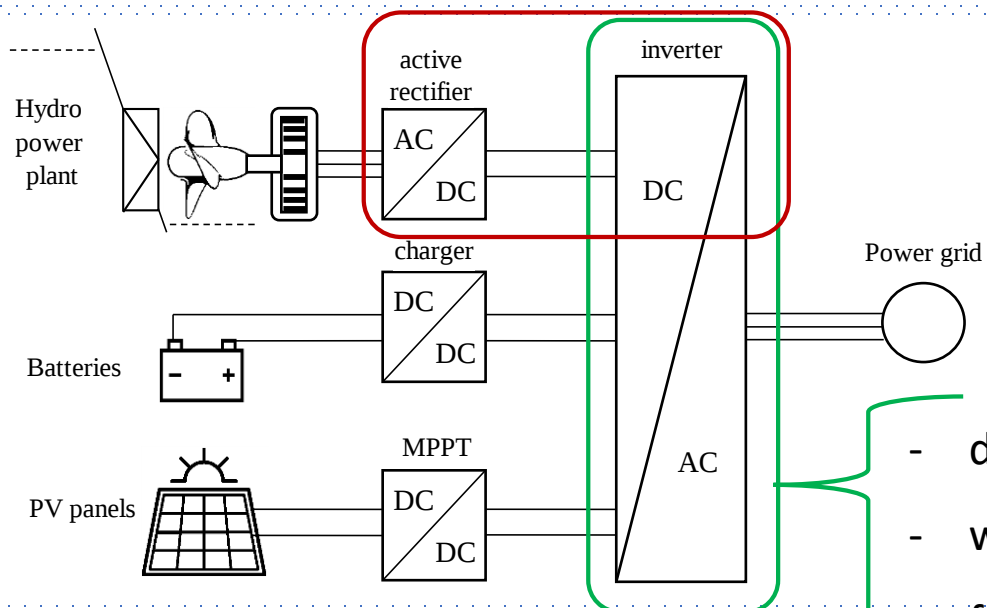
Trzeci stopień regulacji pozwala na dodatkową optymalizację pracy w przypadku **zmiany spadku oraz omijanie obszarów pracy narażonych na kawitację.**

Obecność przekształtnika daje dodatkowe możliwości **precyzyjnej kontroli mocy biernej** co odpowiada najnowszym wymaganiom stawianym układom generacyjnym przyłączanym do sieci elektroenergetycznej (NCRfG). Dodatkowo, układ taki można wykorzystać do lokalnej kompensacji mocy biernej czy świadczenia usług systemowych.

**Podłączanie generatorów indukcyjnych bezpośrednio do systemu jest dyskusyjne z uwagi na spełnienie wymagań NCRfG** min. zdolność do regulacji mocy biernej, zdolność do zapewnienia szybkiego prądu zwarciovego, odbudowa mocy czynnej po zwarciu.



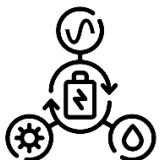
## Przekształtniki energoelektroniczne



- dynamiczne sterowanie mocą czynną i bierną
- wyższe harmoniczne THD (prądu i napięcia)
- funkcje: off-grid, microgrid, symetryzacja
- żywotność falowników (wilgotność, temperatura)
- badania falowników (certyfikaty):

> Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 (NCR fG)

> PN-EN 50549-1 (2019)

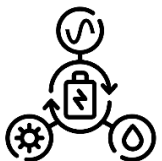


# Dziękuję za uwagę

**Dariusz Borkowski**

Politechnika Krakowska

e-mail: [dariusz.borkowski@pk.edu.pl](mailto:dariusz.borkowski@pk.edu.pl)



## Lab OZE – stanowisko do badań hydroenergetycznych



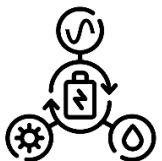
### Parametry:

- koryto o wymiarach 800/950/4000 (wys/szer/dł)
- rurociąg niskociśnieniowy (do 10 mH<sub>2</sub>O) o dużej przepustowości (do 300 l/s);
- rurociąg wysokociśnieniowy: 70 mH<sub>2</sub>O, 75 l/s;

### Zakres badań:

- turbiny niskospadowe - MEW
- piętrzenia hydrotechniczne – powłokowe, klapowe i inne, przepławki (MEW, retencja);
- turbiny wysokociśnieniowe - odzysk energii z procesów przemysłowych;



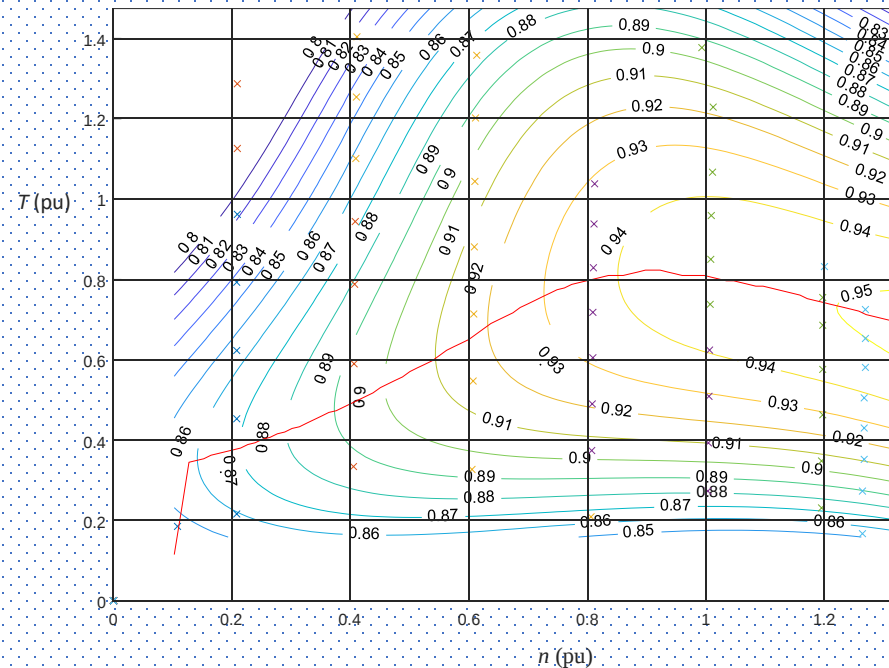


## Lab OZE – stanowisko do badania generatorów



### Parametry:

- prędkość obrotowa: 0 – 1000 obr/min
- moment napędowy: 0 – 1500 Nm



### Zakres badań:

- pomiar biegu jałowego (starty, momenty zaczepowe)
- pomiar sprawności
- próby nagrzewania
- pomiar drgań