



Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet  
www.grf.bg.ac.rs

---

Studijski program: **GRAĐEVINARSTVO – OSNOVNE AKADEMSKE STUDIJE**  
Modul: **HIDROTEHNIKA I VODNO EKOLOŠKO INŽENJERSTVO**  
Godina/Semestar: **4 godina / 8 semestar**

Naziv predmeta (šifra): **KORIŠĆENJE VODNIH SNAGA**  
Nastavnici: **Tina Dašić i Nikola Rosić**  
Demonstrator: **Jovana Vićanović**

Naslov predavanja: **Predavanje - 12**  
Datum : **15.05.2023.**

---

Beograd, 2023.

Sva autorska prava autora prezentacije su zaštićena. Prezentacije se mogu koristiti samo za nastavu studenta Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu u školskoj 2022/2023 i ne mogu se koristiti za druge svrhe bez pismene saglasnosti autora materijala.

## **PUMPNO – AKUMULACIONE (REVERZIBILNE) HE**

***Svrha i uloga u sistemu i podela***

***Energetski aspekti HE***

***Agregati reverzibilnih HE***

***Izbor parametara pumpnih turbina***

***Osobnosti dispozicija mašinskih zgrada RHE***

## Svrha i uloga u sistemu i podela

- RHE za proizvodnju koristi hidroenergetski potencijal koji je ostvaren prethodnim pumpanjem iz donje vode u gornju vodu.
- Za 1 kWh dobijene energije u turbinskom režimu, za pumpanje se troši 1,3 – 1,35 kWh.  
Logika: - pumpa se kada u sistemu ima višak energije ili je jeftinija  
- turbinira se kada je sistem ugrožen – velika potrošnja

### Razlozi izgradnje RHE:

- **iscrpljeni raspoloživi potencijali klasičnih HE**, a postoji potreba za velikom rotirajućom rezervom.
- zbog sve većeg udela solarnih i vetro elektrana sa veoma neravnomernim režimima sve teže balansiranje energije – **raste potreba za skladištenjem energije**.
- grade se **TE i AE sa sve većom jediničnom snagom**, pa zbog mogućeg ispada velikog agregata postoji potreba za sve većom rotirajućom rezervom.
- **realizacija velikih TE** (rade optimalno ako rade ravnomerno) – ravnomeran rad mogu im omogućiti HE koje pokrivaju neravnomeran deo dijagrama opterećenja.
- **DDO su sve neravnomerniji** (kao posledica šematizovanog života), sve je veća brzina podizanja i spuštanja opterećenja.
- **raste zahtevana sigurnost sistema** – moramo imati sve više HE u ulogama hladne ili rotirajuće rezerve, koja će obezbediti sigurnost.
- **neravnomerni vodni režimi** i nizak stepen regulisanja voda u klasičnim HE.

### Navedeni razlozi stvorili su potrebu za:

- **aktivno uticati na dijagram opterećenja** – potrebno smanjiti neravnomernosti
- **uvesti u sistem vršna postrojenja** sa što većom snagom koja se može brzo uvesti u sistem
- stalno **povećavanje rezerve** u sistemu (hladne i rotirajuće)

Sve ove potrebe mogu se zadovoljiti RHE.

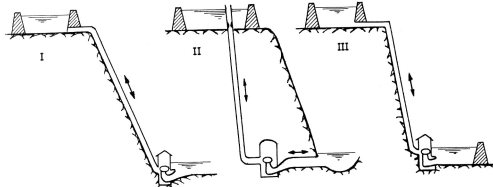
### Zadaci RHE:

- **pokrivaju vršne delove dijagrama opterećenja**
- **regulišu snagu i frekvenciju** posebno u periodima brzog podizanja i skidanja opterećenja
- predstavljaju **manevarsku rezervu snage** u sistemu
- koriste se kao **energetske baterije**
- **peglažu dijagrame opterećenja**
- **proizvode reaktivnu energiju** – rade kao sinhroni kompenzatori
- mogu da **kompenzuju nedostatak energije u sušnim delovima godine**, ako su sa akumulacijama koje omogućavaju duže regulisanje
- koriste se kao **visokomanevarska rezerva snage** i rezerva **opterećenja**

Prema vrsti dotoka dele se na:

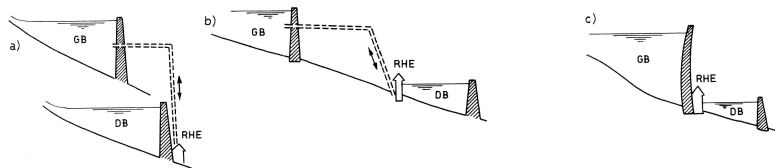
**1) RECIRKULACIONE** – nema dotoka u gornji bazen (čisto reverzibilne HE)

Donji bazen: jezero, usporen vodotok, veštački rezervoar



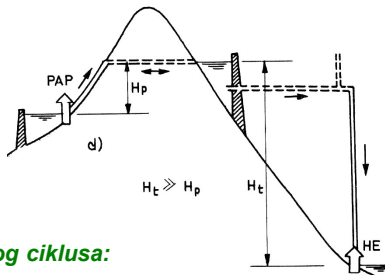
**2) RHE SA SPOLJNIM DOTOKOM** – povoljnije

U gornji bazen dotiče voda prirodnim putem, pa je količina vode koja se turbinira veća od količine koja se pumpa.



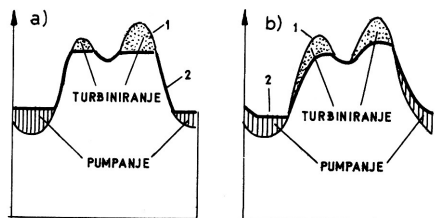
**3) PUMPNO-AKUMULACIONA POSTROJENJA**

Povećavaju količinu vode visoko lociranih akumulacija klasičnih HE pumpanjem.



Sa gledišta vremenskog ciklusa:

**1) RHE SA DNEVNIM REGULISANJEM**



- zatvaraju bilans pumpanja i turbiniranja u jednom danu
- ublažavaju DDO koga treba da pokriju ostale elektrane u EES
- proizvode reaktivnu snagu u sistemu

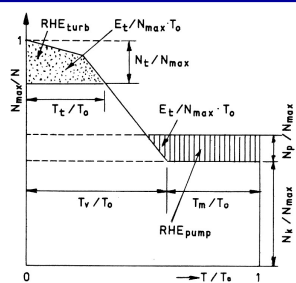
## 2) RHE SA NEDELJNIM REGULISANJEM

- bilansni ciklus zatvara se u okviru jedne nedelje
- pumpanje – nedelja, subota (poslepodne) i ostalim danima noću
- turbiniranje – radni dani i subota (malo)
- zahteva nešto veću zapreminu gornjeg bazena

## 3) RHE SA SEZONSKIM REGULISANJEM

- postoji velika zapremina koja omogućava dugotrajna pumpanja (u periodima većih proticaja, kada rade protočne i HE manjih opterećenja) i intenzivna turbiniranja (sušni i energetske kritični režimi)

## Energetski aspekti RHE



dijagram trajanja opterećenja

- zbog sve većeg udela TE i drugih razloga postoji "glad za vršnom energijom i snagom"
- ako TE radi varijabilno njen rad je skuplji

$$N_t = 9,81 \cdot Q_t \cdot H_t \cdot \eta_t \quad N_p = \frac{9,81 \cdot Q_p \cdot H_p}{\eta_p}$$

$$E_t = \frac{V_t \cdot H_t \cdot \eta_t}{367} \quad E_p = \frac{V_p \cdot H_p}{367 \cdot \eta_p}$$

V – upotrebljena količina vode

$$\frac{E_t}{E_p} = \frac{H_t}{H_p} \cdot \eta_t \cdot \eta_p \quad \text{ENERGETSKA VREDNOST RHE}$$

**Ekonomska vrednost:** pumpanje se vrši u noćnom periodu, kada je potrošnja el. energije u sistemu manja (niža je i cena energije), dok se turbiniranje vrši u periodima maksimalne potrošnje (kada je i njena cena najveća).

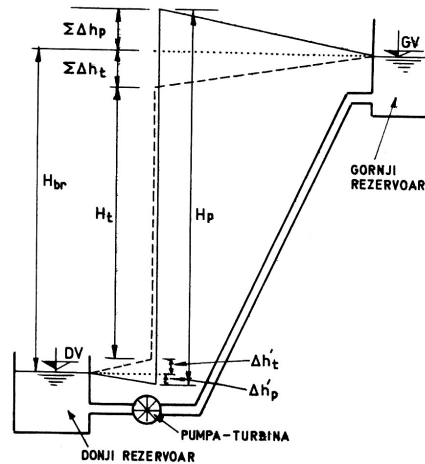
## Gubici

### 1) Pumpni režim

- kkd transformatora
- kkd motora
- kkd pumpe
- kkd derivacije u pumpnom režimu

### 2) Turbinski režim

- kkd derivacije u turbinskom režimu
- kkd turbine
- kkd generatora
- kkd transformatora



$$H_t = H_{\text{brutto}} - \sum \Delta h_t - \sum \Delta h_t^o$$

$$H_p = H_{\text{brutto}} + \sum \Delta h_p + \sum \Delta h_p^d$$

## Agregati RHE

### 1) ŠEMA SA 4 MAŠINE

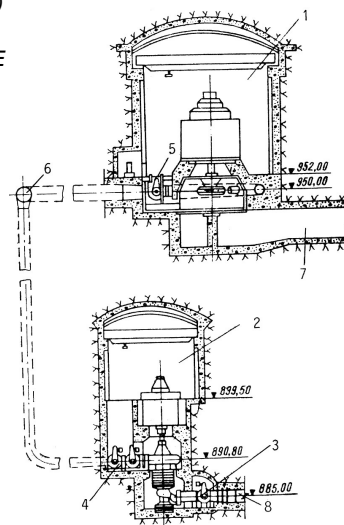
- Najstariji tip (turbina – generator + pumpa – motor)
- Prvo su realizovane turbine, pumpni agregati su dodati naknadno, kada se pojavila potreba za RHE
- Danas se koriste u slučaju fazne gradnje

#### Prednosti:

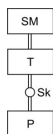
- svaka mašina može da radi sa max.  $\eta$

#### Mane:

- veća cena koštanja
- veći je objekat, površina, zapremina mašinske zgrade



## 2) ŠEMA SA 3 MAŠINE



SM – sinhrona mašina  
(može da radi kao generator i kao motor)  
T – turbina  
P – pumpa  
SK - sklopka

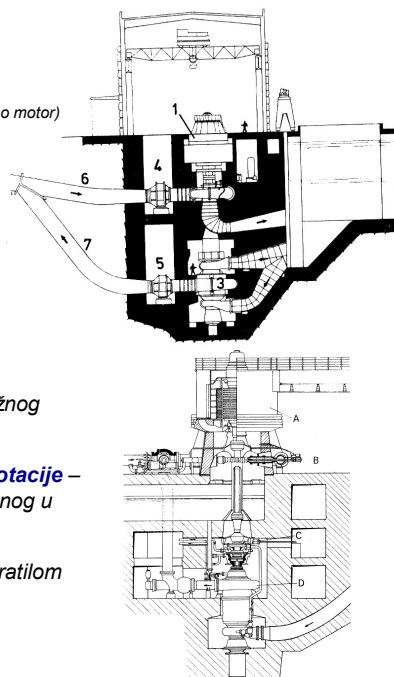
### Turbine:

- za padove do  $H < \approx 600$  m - Francisove
- $H > 600-700$  m – Peltonove

### Pumpe:

- jednostepene i višestepene raznih izvedbi

- Agregati se obično smeštaju u vertikalni šaht kružnog poprečnog preseka
- SM – radi kao generator i motor u **istom smeru rotacije** – to je dobro zbog mogućnosti brzog prelaska iz jednog u drugi režim – važna karakteristika RHE
- Agregati mogu biti sa horizontalnim i vertikalnim vratilom



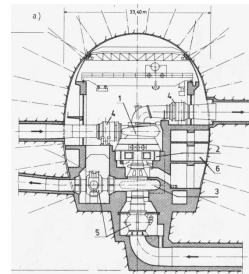
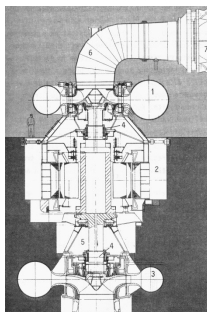
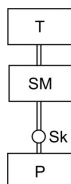
### Prednosti u odnosu na šemu sa 2 mašine:

- Bolji (veći) kkd – pumpno i turbinsko kolo oblikovani optimalno
- Brzo i lako prelaženje pumpni ↔ turbinski režim (80 – 90 s)
- Moguća je primena i za najveće padove (do 2000 m) – padovi koje mogu savladati višestepene pumpe

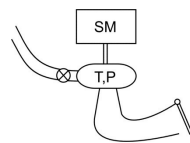
### Mane u odnosu na šemu sa 2 mašine:

- Skuplje od dvomašinskih
- Agregat je izduženiji, sa više ležajeva, pa je manja njegova pouzdanost
- Veći su eksploatacioni troškovi
- MZ je veća i komplikovanija
- U turbinskom režimu osovina se vrti u struji vode – izložena kavitaciji

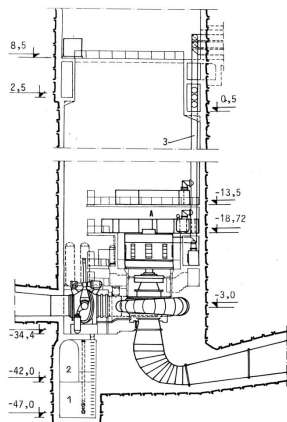
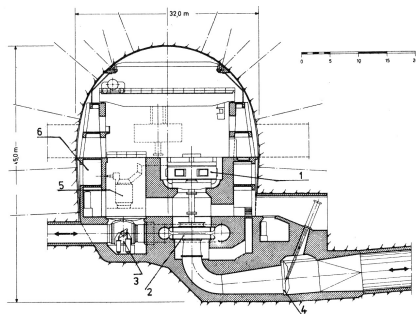
- Smanjenje visine šahta agregata



## 3) ŠEMA SA 2 MAŠINE



SM – sinhrona mašina  
T,P – reverzibilna mašina



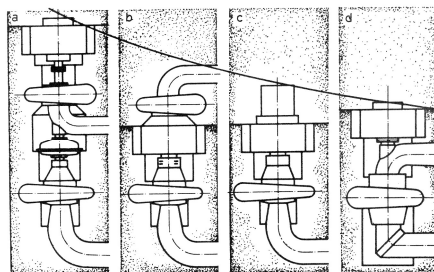
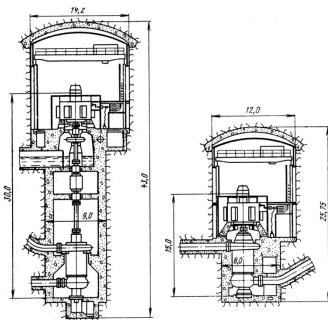
- Po vremenu nastanka – najnovije
- Moguće ih je primeniti na padovima  $3 \leq H \leq 650$  m
- Radno kolo može biti svaka reakcijska turbina
- Agregati mogu biti samo sa vertikalnim vratilom

### **Prednosti u odnosu na šemu sa 3 mašine:**

- Manje koštanje (20-30% u odnosu na šemu sa 3 mašine, cela MZ 10-15%)
- Bolja pristupačnost za pregled i održavanje
- Veća pouzdanost: manje mašina, ležajeva, zatvarača i kraće vratilo
- Hala je sažetija, ali mašine su duboko postavljene

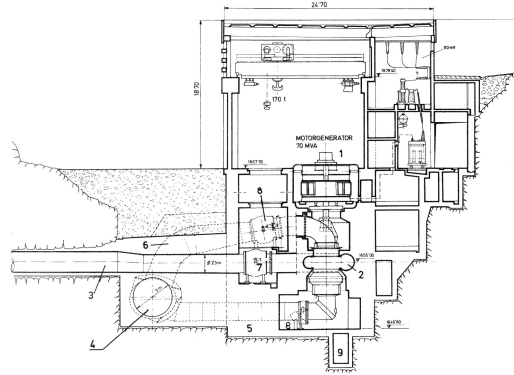
### **Mane u odnosu na šemu sa 3 mašine:**

- Manji su skd – oblik lopatica optimalan za jedan režim ili nešto između
- Prelaz pumpni ↔ turbinski režim je dug i komplikovan (400 – 450 s)
- SM rotira u dva smera rotacije tako da se pri prelazu mora zaustaviti, pa krenuti
- Skuplja elektrooprema
- Nepovoljniji uslovi rada u ulozi rotirajuće rezerve
- Veća opasnost od vibracija u pumpnom režimu



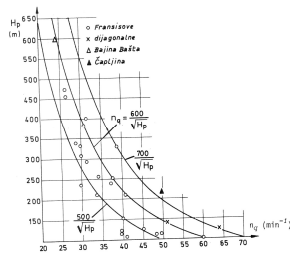
## Isogyre mašina – otklonila neke od mana 2-mašinskih agregata

- $P$  i  $T$  kolo spojeni u jednu celinu sa zajedničkom spiralom, ali odvojenim dovodima (difuzorima)  $\Rightarrow kkd \uparrow$
- Odvod prema gornjoj vodi – zajednički  
 $T$  – ima sprovodno kolo sa pokretnim lopaticama  
 $P$  – sprovodno kolo samo fiksne statorske lopatice
- Brz prelazak  $P \leftrightarrow T$ :  $P \rightarrow T$  65 s  
 $T \rightarrow P$  55 s



Očekuje se korišćenje dvomašinskih agregata i na većim padovima, do 700 m.

Potrebno je smanjiti brzohodnost, ali brzohodnost  $\downarrow \Rightarrow kkd_p \downarrow$



Specifični broj obrtaja za  $H_p \uparrow \Rightarrow n_q \downarrow$

$$n_q = \frac{K}{\sqrt{H_p}} = \frac{500 \div 700}{\sqrt{H_p}}$$

$$K = n_q \sqrt{H_p} \quad \text{KOEFIJIENT SMELOSTI}$$

$K \uparrow \Rightarrow n_q \uparrow \Rightarrow \uparrow$  opasnost od kavitacije, vibracija  
 $\Rightarrow \uparrow$  dubina ukopavanja

$n_q \uparrow \Rightarrow D_1 \downarrow \Rightarrow G_{generatora} \downarrow \Rightarrow$  racionalnija MZ i agregati

- Za  $H > 600$  m  $\Rightarrow$  višestepene reverzibilne mašine  
fiksne lopatice sprovodnog kola  $\Rightarrow$  nemoguća regulacija snage u turbinskom režimu
  - Za  $H = 35 - 150$  m  $\Rightarrow$  dijagonalne RM  $\rightarrow$  sa sprovodnim kolom  
 $\rightarrow$  bez sprov. kola (regulacija lopaticama radnog kola)
- skuplje,  
- nepovoljnije kavitacione karakteristike } u odnosu na alternativnu Francisovu turbinu



## Izbor parametara reverzibilnih pumpnih turbina

- Za 4-mašinske i 3-mašinske šeme – parametri kao za pumpu i turbinu

- **Izbor parametara 2-mašinskog agregata**

**1) Definisane protoka u pumpnom i turbinskom režimu ( $Q_p$ ,  $Q_t$ )**

- Snage  $N_t$  i  $N_p$  treba da su približno iste

$$Q_t \cdot H_t \cdot \eta_t \cdot \eta_m = \frac{Q_p \cdot H_p}{\eta_p \cdot \eta_m} \quad \eta_m - \text{kkd sinhronne mašine}$$

$$\frac{Q_p}{Q_t} = 0,7 \div 0,8 \quad \Rightarrow \quad Q_p < Q_t \quad - \text{zbog kkd i gubitaka } (H_p > H_t)$$

**2) Bira se koeficijent smelosti**

$$\left. \begin{array}{l} K = 600 - 700 \\ H_p \end{array} \right\} \Rightarrow n_q = \frac{K}{\sqrt{H_p}} \Rightarrow n_s = 3,365 \cdot n_q \quad - \text{približan specifičan broj}$$

$$(n_s)_p = \frac{3,65 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H_p^3}} \Rightarrow n_s - \text{spec. br. obrtaja u pumpnom režimu}$$

$n$  – izaberu se 3 varijante

$$\Rightarrow \text{stvarni } n_s \text{ i } n_q \Rightarrow K_p = 1,2 \cdot e^{\frac{(n_s)_p}{500}} \Rightarrow (n'_1)_p = \frac{84,8}{\sqrt{K_p}} \Rightarrow D_1, \sigma, H_s$$

sve ostale dim. na osnovu  $D_1$

## Osobnosti dispozicija MZ RHE

❖ **4-mašinska šema**

- Postoje dva dela zgrade: sa turbinama i pumpama (koje su dublje ukopane)
- Danas se primenjuju u slučaju fazne gradnje

❖ **3-mašinska šema**

- Dispozicija zgrade zavisi od položaja vratila
- Vertikalno vratilo – izdužena zgrada:
  - etaža turbinskog difuzora
  - etaža vodećih ležaja i spojki
  - etaža pumpi
  - etaža nosećih ležaja pumpe
- Savremenija rešenja sa 3 mašine:  $T - M - P \rightarrow$  sažetiji agregat i MZ
- MZ agregata sa horizontalnim vratilom: duže, pumpe za povećavanje pritiska na ulazu u pumpu

## ❖ **2-mašinska šema**

- Kod nas će se koristiti.
- Potencijalni profili sa padovima do  $H = 650$  m
- Slične su kao klasične HE, ali:
  - Znatno veća dubina potapanja → podzemne elektrane
  - Agregati se smestaju u šahove – prilaz sa gornje strane
  - Izduženi difuzori i pod većim uglom
  - Zatvarači sa obe strane MZ moraju biti brži u cilju zaštite MZ, prelaska iz jednog režima u drugi
  - Problem dreniranja složeniji zbog dubokog ukopavanja
- Radi sprečavanja koncentracije napona u uglovima – kružni poprečni presek
- Radi sažimanja – agregati na raznim visinama zbog dovoda, odvoda