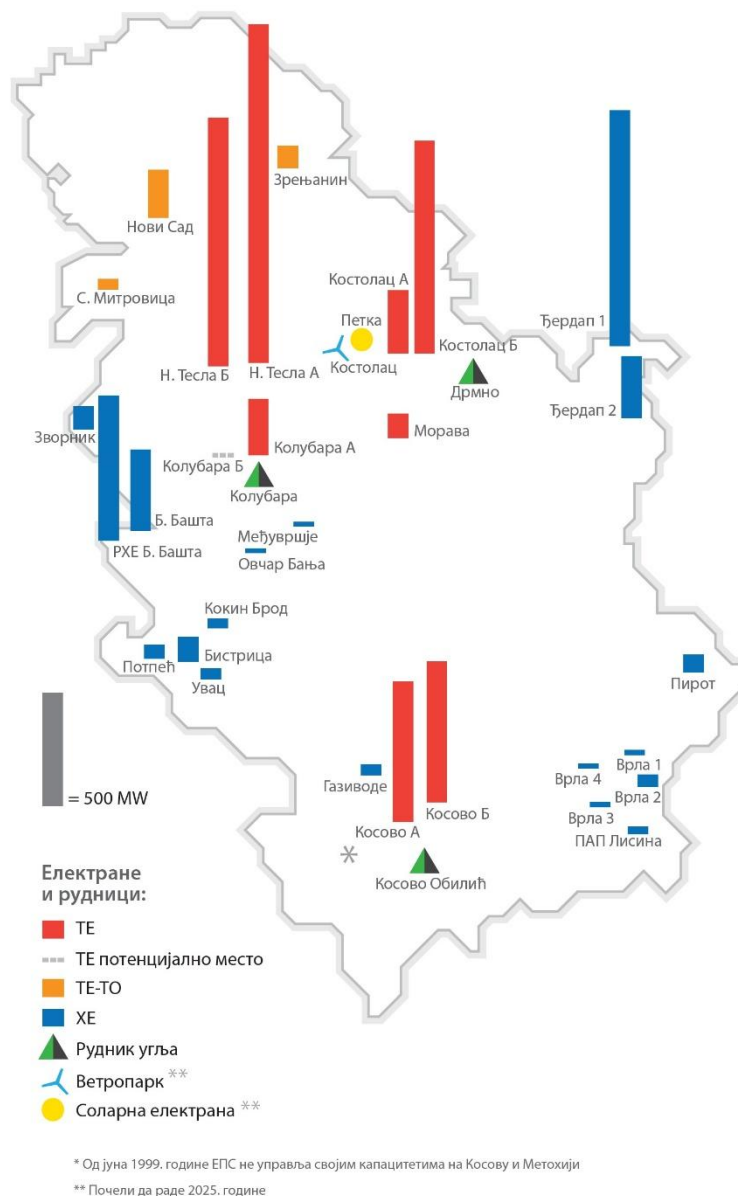


### Sadržaj:

Primena parnih turbina. Princip rada. Toplotna šema parnog bloka. Glavni uređaji i procesi u njima. Osnovni termodinamički parametri. Stepен korisnosti parnog bloka. Specifična potrošnja toplote i goriva.

### 5.1 Primena parnih turbina

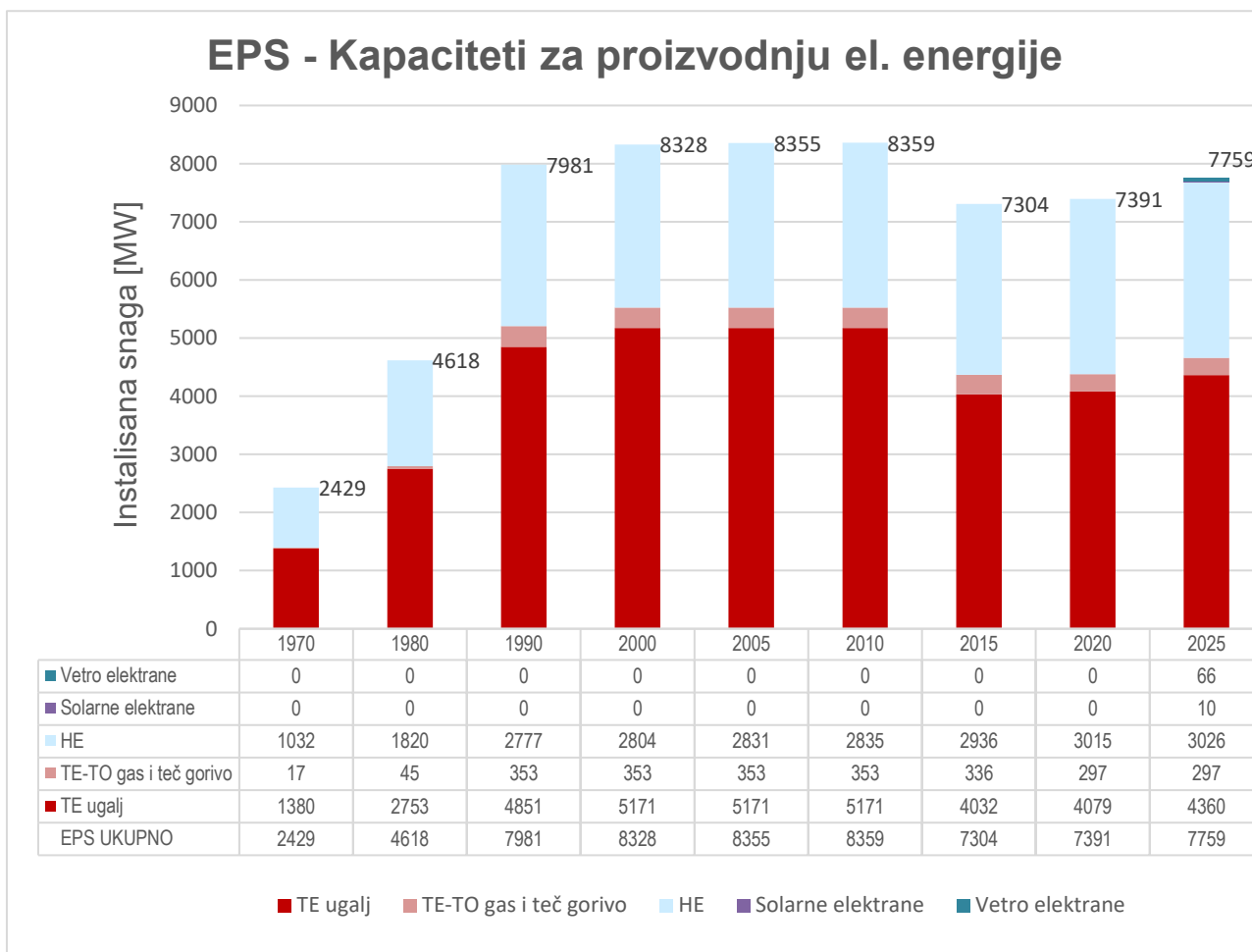
Parne turbine nalaze suštinsku i najvažniju primenu u sektoru energetike za potrebe proizvodnje el. energije – Sl.1. Prema podacima iz 2025. God. u R. Srbiji ukupni instalisani energetska kapacitet iznosi 7759 MW (EPS snaga na pragu), dok 4360 MW (EPS: 56,2%) čini instalisani energetska kapacitet u termoelektranama sa parnim turbinama u kojima se proizvodi približno 70 % el. energije (Sl.2 i Sl.3).



Sl. 1 – Производни капацитети EPS-a

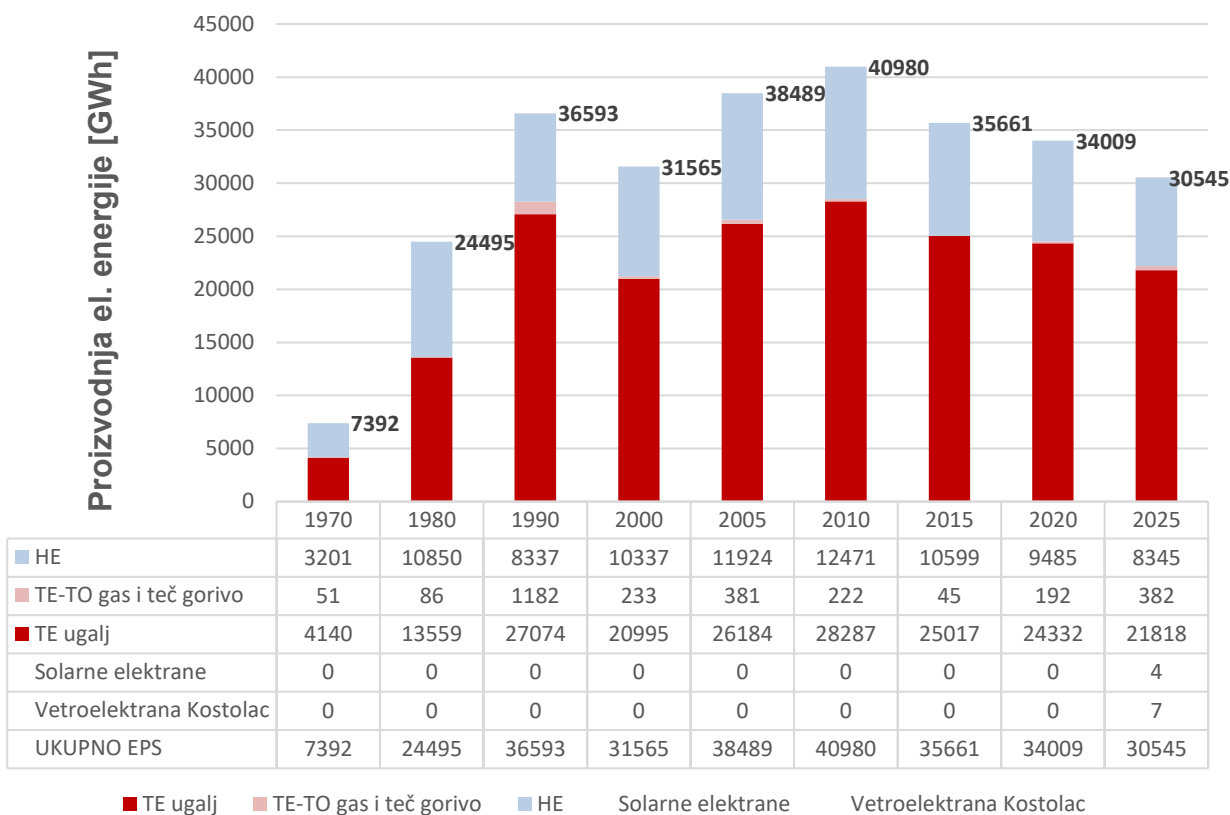
Parne turbine se primenjuju još i u:

- industriji,
- komunalnoj energetici,
- kao brodske pogonske mašine.



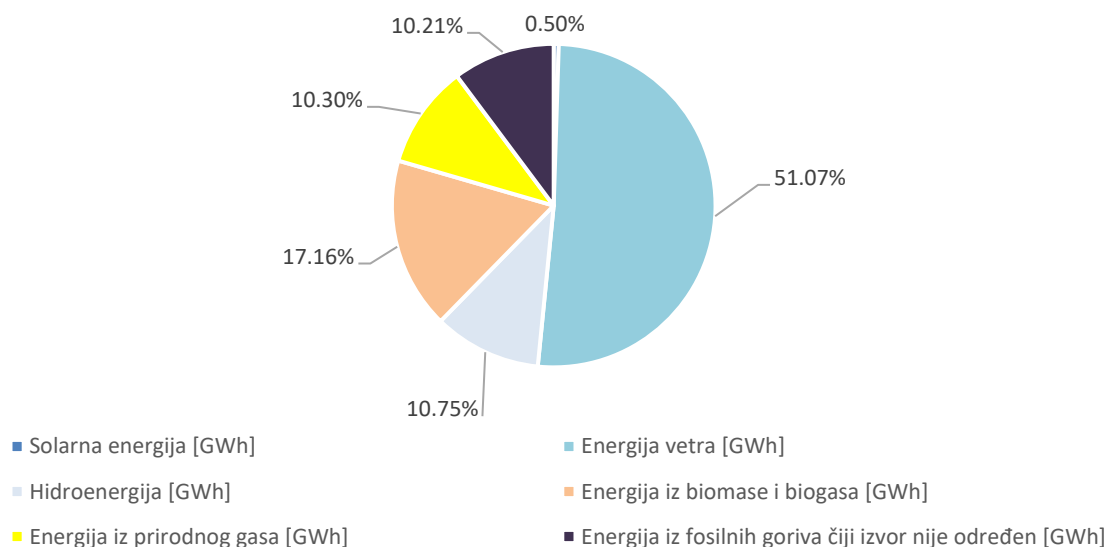
Sl. 2 – EPS Kapaciteti za proizvodnju električne energije

## EPS - Proizvodnja električne energije



Sl. 3a – EPS Proizvodnja električne energije

## 2025: Struktura el. energije proizvedene iz OIE u sistemu podsticaja



Sl. 3b – 2025: Struktura el. energije proizvedene iz OIE u sistemu podsticaja

Ukupan broj elektrana u 2025. godini koje su iz OIE proizvodile električnu energiju je bio 271 van sistema EPS. Na Sl. 3b prikazan je procentualni udeo proizvodnje električne energije u R. Srbiji iz obnovljivih izvora (OIE) kompanija koje su bile u sistemu podsticaja. U tabeli 1 dati su podaci u fizičkim jedinicama {GWh} koji odgovaraju strukturanoj proizvodnji električne energije prikazani na Sl.3b. za 2025. godinu.

Tabela 1 – Količina električne energije proizvedena u sistemu podsticaja u 2025. god. u R. Srbiji

	Jedinice	
	[GWh]	[%]
Solarna energija	9,399	0.6%
Energija vetra	952,705	56.9%
Hidroenergija (MHE)	200,496	12.0%
Energija iz biomase i biogasa	320,118	19.1%
Energija iz prirodnog gasa	192,212	11.5%
UKUPNO OIE	1674,93	100%

## 5.2 Princip rada. Toplotna šema parnog bloka. Glavni uređaji i procesi u njima

Parne turbine rade u sklopu termoelektrana sa parnim blokovima.

Parni blok je postrojenje u kome se hemijska energija goriva prvo pretvara u toplotu a zatim se toplota transformiše u mehanički rad i dalje u el. energiju.

Da bi se iz toplotne energije dobio mehanički rad mora se obaviti termodinamički kružni ciklus. Parni blokovi rade po **Rankin-Klauzjusovom (Rankine-Clausius cycle)** kružnom ciklusu. Radno telo koje obavlja ciklus je voda i vodena para.

Za dobijanje mehaničkog rada iz toplote mora postojati izvor toplote u kojem se iz hemijske energije goriva dobija toplota, koja se dalje predaje radnom telu.

Delu parnog bloka, koji nazivamo **parni kotao** dovodi se toplota – Sl.4. U parnom kotlu se sagoreva fosilno gorivo (čvrsto (npr.: ugalj), tečno (npr.: mazut) ili gasovito (npr.: prirodni gas)) obrazujući produkte sagorevanja na visokoj temperaturi. Takođe, u kotao se dovodi napojna voda pod visokim pritiskom koja struji kroz kotlovske cevi. Produkti sagorevanja struje oko snopova kotlovskih cevi predajući toplotu napojnoj vodi koja se zagreva, isparava i pregreva do visokih temperatura (oko 540 °C). Tako formirana para se dalje odvodi u parnu turbinu. U nuklearnim elektranama se toplota dobija iz nuklearnog goriva.

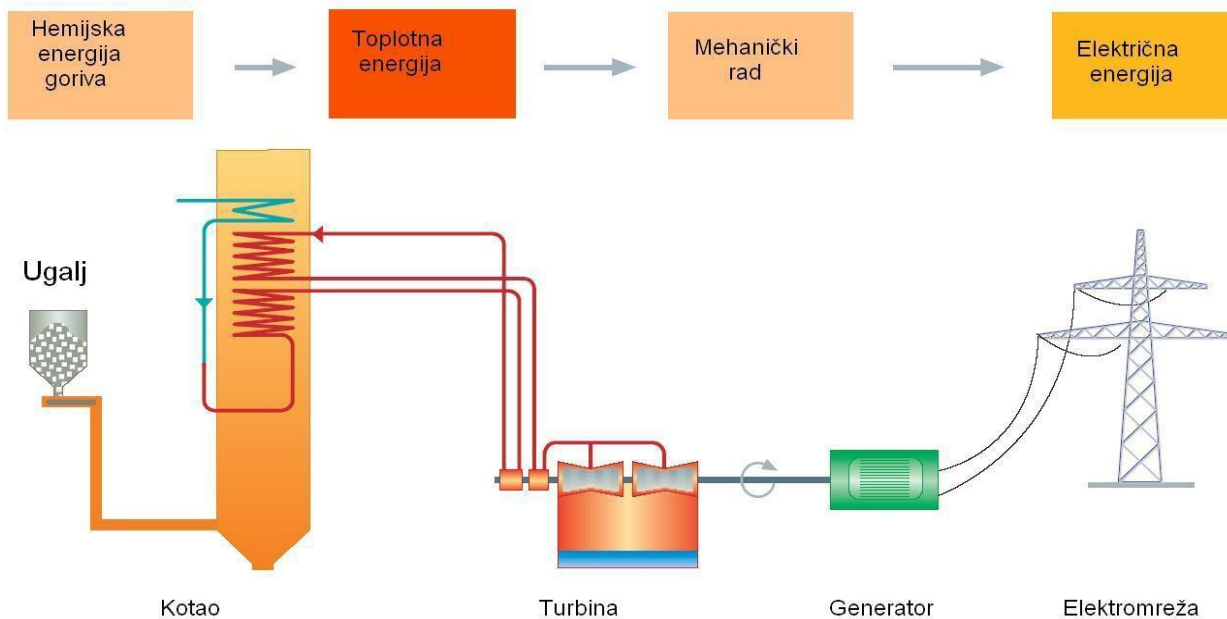
**Parne turbine** su mašine koje pretvaraju toplotnu energiju u kinetičku energiju uređene fluidne struje, a potom ovu u mehanički rad u obliku obrtanja rotora. Preko rotora turbine koji je povezan sa rotorom generatora dalje se generiše obrtno kretanje rotora generatora, gde se mehanički rad pretvara u električnu energiju. Parna turbina zajedno sa generatorom se naziva **turboagregat**.

Takođe, parna turbina može da pokreće i neku drugu radnu mašinu (umesto generatora, npr.: kompresor ili pumpu) ili da služi za pokretanje raznih saobraćajnih sredstava.

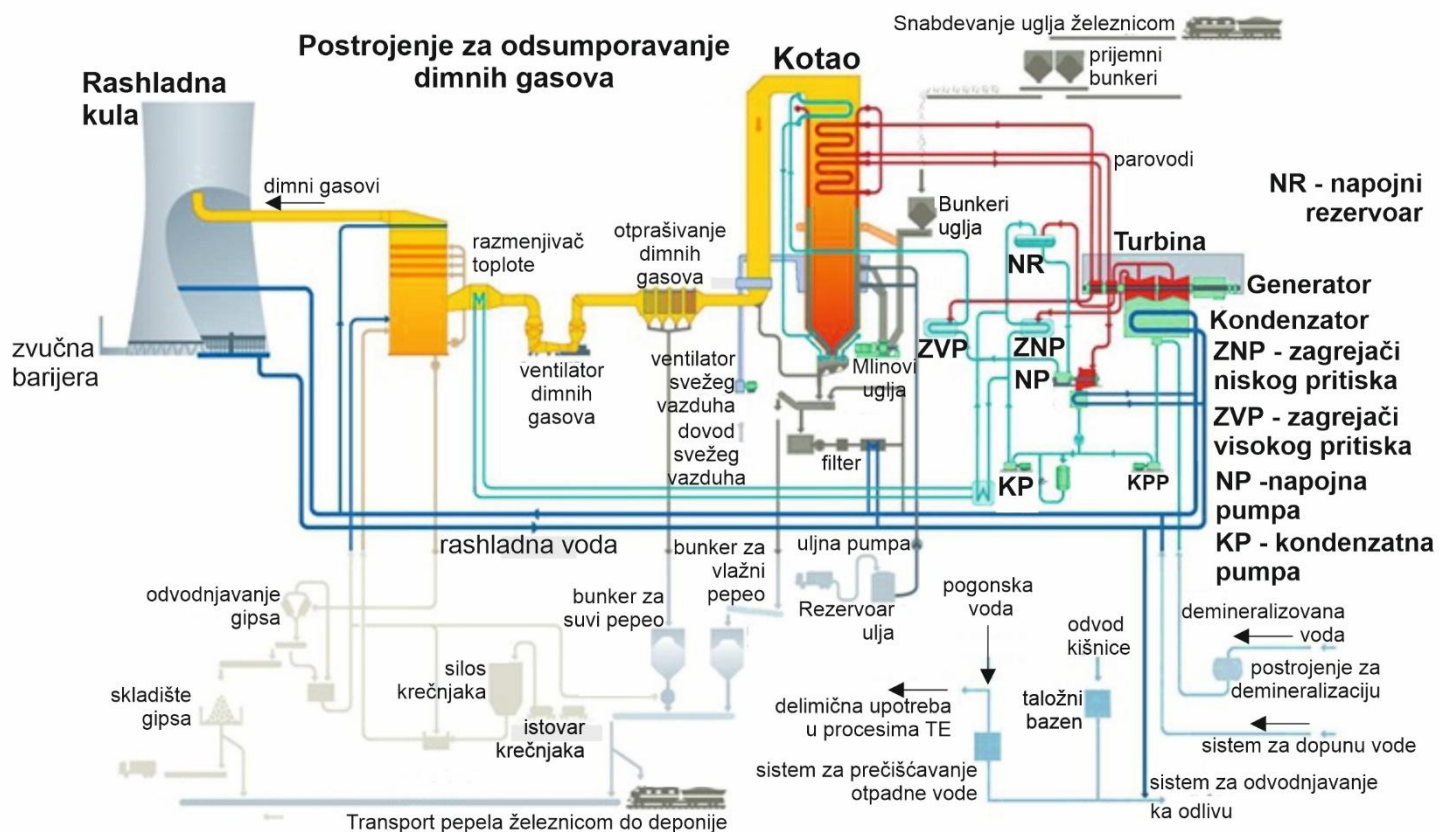
Pored toga mora postojati i toplotni ponor tj. uređaj (deo postrojenja) u kojem se toplota koja nije mogla biti pretvorena u mehanički rad odvodi i predaje okolini. Ovaj uređaj u parnim blokovima se naziva **kondenzator**. U kondenzator dolazi para iz turbine na niskoj temperaturi (oko 30 °C). Para se kondenzuje dok se toplota kondenzacije odvodi u okolinu rashladnom vodom.

Za obavljanje kružnog ciklusa potrebno je ostvariti povećanje vrednosti pritiska napojne vode što se ostvaruje radom **napojne pumpe**.

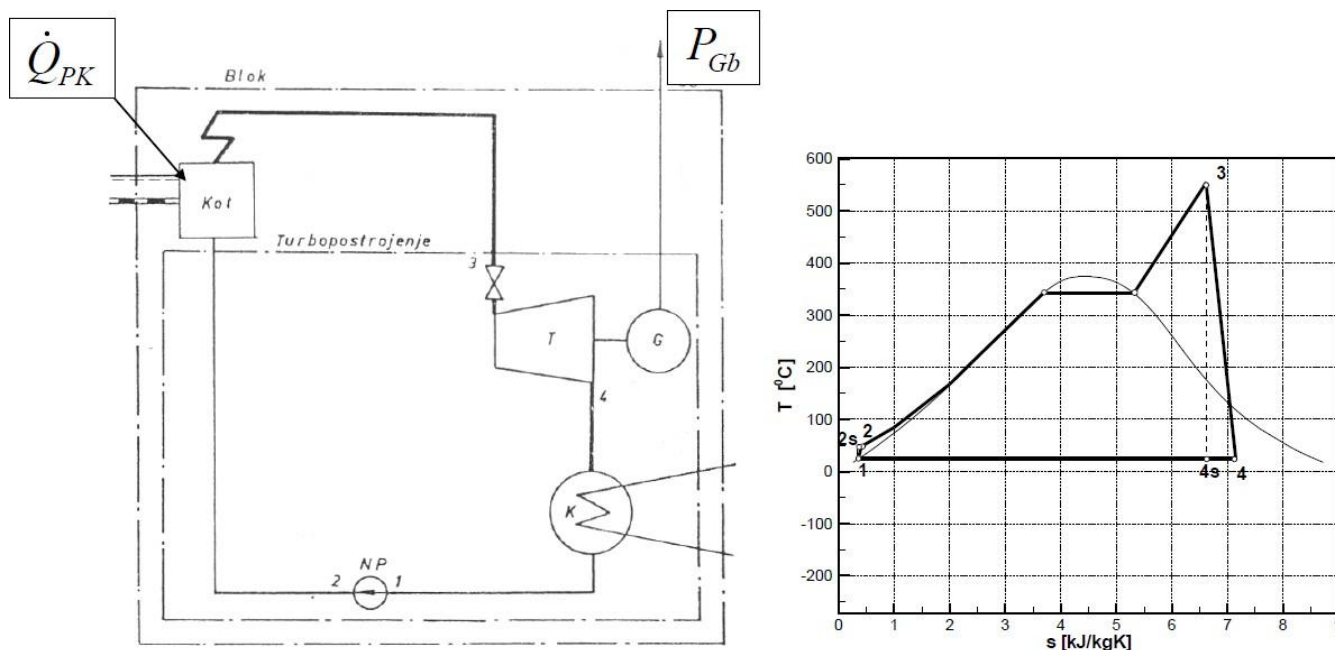
Na Sl.5 prikazana je tehnološka šema jednog parnog bloka.



Sl. 4 - Princip rada parnog bloka



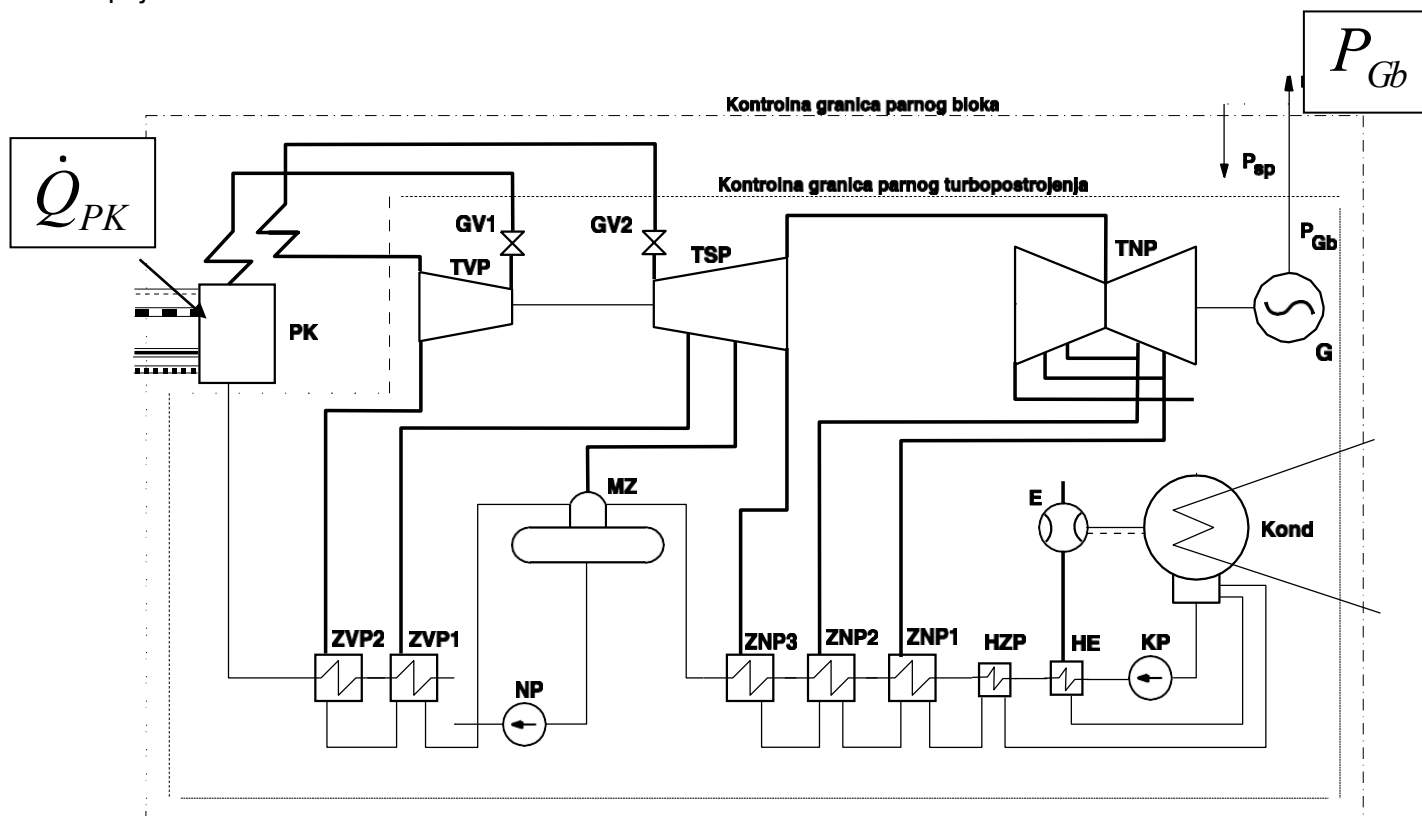
Sl. 5 - Tehnološka šema parnog bloka



Sl. 6 - Osnovna toplotna šema i T,s- dijagram procesa parnog bloka

Parna turbina sa generatorom, kondenzatorom i napojnom pumpom čini **parno turbopostrojenje**. Parno turbopostrojenje sa parnim kotlom čini **parni blok**.

Na Sl. 6 je dat šematski prikaz i T,s-diagram najjednostavnijeg parnog bloka. Na Sl. 7 je data toplotna šema komplikovanijeg bloka sa dogrevanjem pare i oduzimanjima pare radi zagrevanja napojne vode.



Sl. 7 - Osnovna toplotna šema i definicija kontrolnih granica za parni blok i turbopostrojenje sa dogrevanjem

### 5.3 Osnovi i glavni termodinamički parametri parnog bloka

Osnovi termodinamički parametri parnog bloka su oni parametri koji u potpunosti definišu termodinamički ciklus po kojem postrojenje radi.

Za postrojenje kao na Sl. 6 to su:

- $p_{GV}$  - pritisak pare ispred glavnog ventila turbine,
- $t_{GV}$  - temperatura pare ispred glavnog ventila turbine,
- $p_{PK}$  - pritisak pare na prirubnici turbine i kondenzatora.

Kod složenijih postrojenja (Sl. 7) se mogu kao osnovni termodinamički parametri označiti one osnovne veličine stanja koje određuju ciklus po kojem radi ovakav blok. To su sledeće veličine:

- $p_{GV_I}$  - pritisak pare ispred glavnog ventila turbine visokog pritiska,
- $t_{GV_I}$  - temperatura pare ispred glavnog ventila turbine visokog pritiska,
- $p_{GV_{II}}$  - pritisak pare ispred glavnog ventila turbine srednjeg pritiska,
- $t_{GV_{II}}$  - temperatura pare ispred glavnog ventila turbine srednjeg pritiska,
- $p_O$  - pritisci oduzimanja pare iz turbine,
- $p_{PK}$  - pritisak pare na prirubnici turbine i kondenzatora,
- $p_{NV}$  - pritisak napojne vode na ulazu u kotao,
- $t_{NV}$  - temperatura napojne vode u kotao.

U tabeli 2 su prikazane orijentacione vrednosti osnovnih termodinamičkih parametara za blokove različitih snaga.

Tabela 2- Orijetacione vrednosti osnovnih termodinamičkih parametara za blokove različitih snaga

Maksimalna trajna snaga	[MW]	30	50	60	100	200	600
Pritisak ispred turbine	[bar]	40	40	60	105	105	178
Temperatura ispred turbine	[°C]	450	450	480	540	540	540
Temperatura iza dogrejača	[°C]					540	540
Temperatura napojne vode	[°C]	165	179	196	232	244	250
Pritisak u kondenzatoru	[bar]	0,042					

Glavni termodinamički parametri pokazuju kvalitet parnog bloka u pogledu transformacije toplote u el. energiju. U daljem delu teksta definisane su vrednosti stepena korisnosti bloka i specifične potrošnje toplote bloka.

Stepen korisnosti parnog bloka  $\eta_{Bb}$  predstavlja odnos između dobijene el. energije u jedinici vremena  $P_{Gb}$  i dovedene količine toplote u parnom kotlu  $\dot{Q}_{PK}$  u jedinici vremena:

$$\eta_{Bb} = \frac{P_{Gb}}{\dot{Q}_{PK}}$$

Specifična potrošnja toplote predstavlja odnos između dovedene količine toplote parnom bloku i proizvedene električne energije u jedinici vremena:

$$q_{Bb} = \frac{\dot{Q}_{PK}}{P_{Gb}}$$

i definisani odnos veličina zapravo pokazuje koliko je jedinica toplote potrebno dovesti da bi se proizvela jedinična količina električne energije. Ako je  $H_d$  toplotna moć goriva izražena u  $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$ , tada se može odrediti vrednost masenog protoka goriva  $\dot{M}_G$ , kao i vrednost specifične potrošnje goriva po jedinici električne energije:

$$b_{GB} = \frac{\dot{Q}_{PK}}{P_{Gb}} = \frac{\dot{M}_G}{P_{Gb}}$$

7

i dobijena veličina se može izraziti u  $\left[ \frac{\text{kg goriva}}{\text{kWh el.ener.}} \right]$ .

Ukoliko je poznata cena goriva  $\left[ \frac{\text{RSD}}{\text{kg}} \right]$ , lako se mogu odrediti troškovi goriva po svakom proizvedenom kWh el. energije.

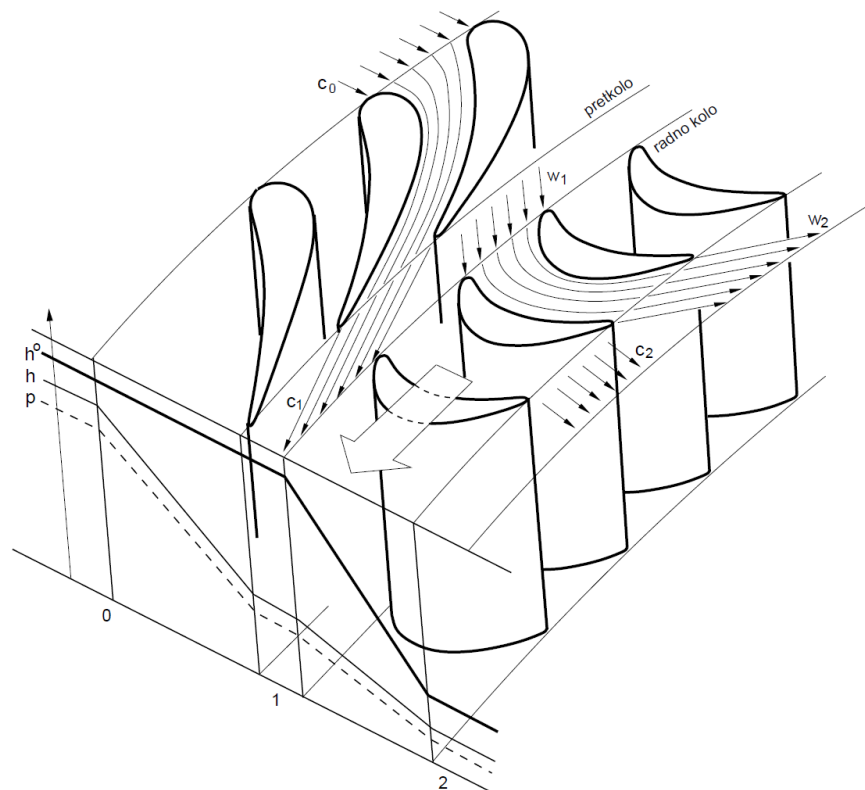
#### 5.4 Princip rada i osnovni elementi parnih turbina

U parnim turbinama prvo se toplotna energija pretvara u kinetičku energiju uređene fluidne struje. Takva transformacija energije se može ostvariti jednim adijabatskim procesom širenja pri čemu vrednosti pritiska i temperature opadaju dok vrednost brzine strujanja raste. Za takav adijabatski gasodinamički proces mora postojati strujni prostor (kanali) koji se **sužavaju**, odnosno, čiji se preseči smanjuju. Takvi kanali čine **spvodni aparat (pretkolo)** jedne turbine. U spvodnom aparatu se para ubrzava kako bi sa povećanom vrednošću brzine ušla u **radno kolo**.

U radnom kolu se dalje nastavlja proces transformacije toplotne energije u kinetičku energiju uređene fluidne struje. Ovo se ostvaruje daljom ekspanzijom radnog fluida i povećavanjem vrednosti brzine. Ovakve turbine se nazivaju **reakcionim**. Kod **akcionih** turbina se kompletna transformacija toplotne energije obavlja u pretkolu, dok se u radnom kolu se samo menja pravac strujanja bez promene intenziteta brzine.

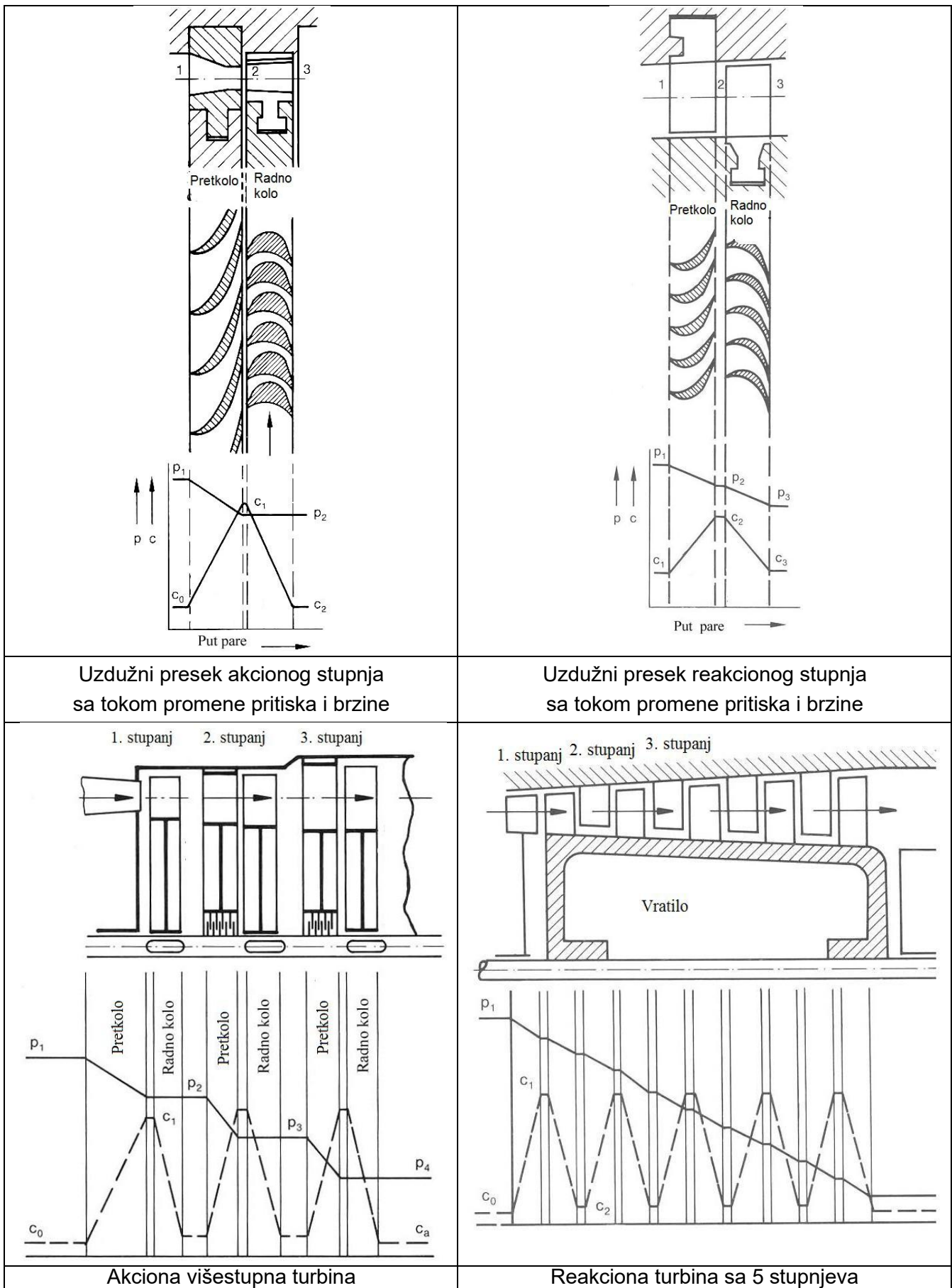
Oblik kanala radnog kola mora biti takav da se ostvari još jedan važan proces. To je proces prenošenja kinetičke energije fluidne struje na rotor. Ovakav proces se može ostvariti samo ukoliko se pri strujanju fluida kroz kanale radnog kola pojave sile. To se postiže naročitim oblikom lopatica koje se nalaze poređane po obimu radnog kola.

Pretkolo i radno kolo čine **stupanj** turbine kao osnovni funkcionalni element. Turbine mogu imati jedan ili više stupnjeva. Moderne turbine uvek imaju veći broj stupnjeva. Na Sl. 9 je prikazan princip rada aksijalnog stupnja.



Sl. 9 – Princip rada aksijalnog stupnja

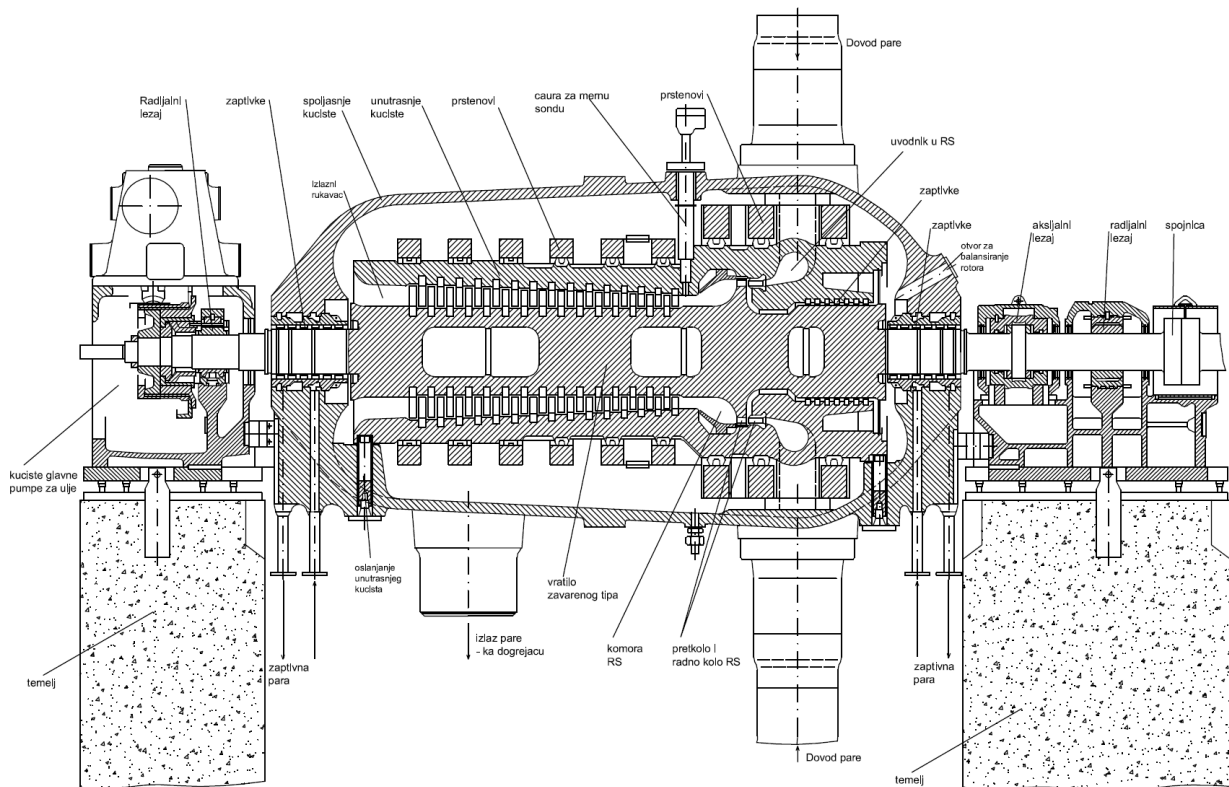
Na Sl. 9 prikazani su uzdužni preseči akcionog i reakcionog stupnja sa tokom promene vrednosti pritiska i brzine kao i preseči višestupnih turbina.



Sl. 9 - Akcione i reakcione parne turbine

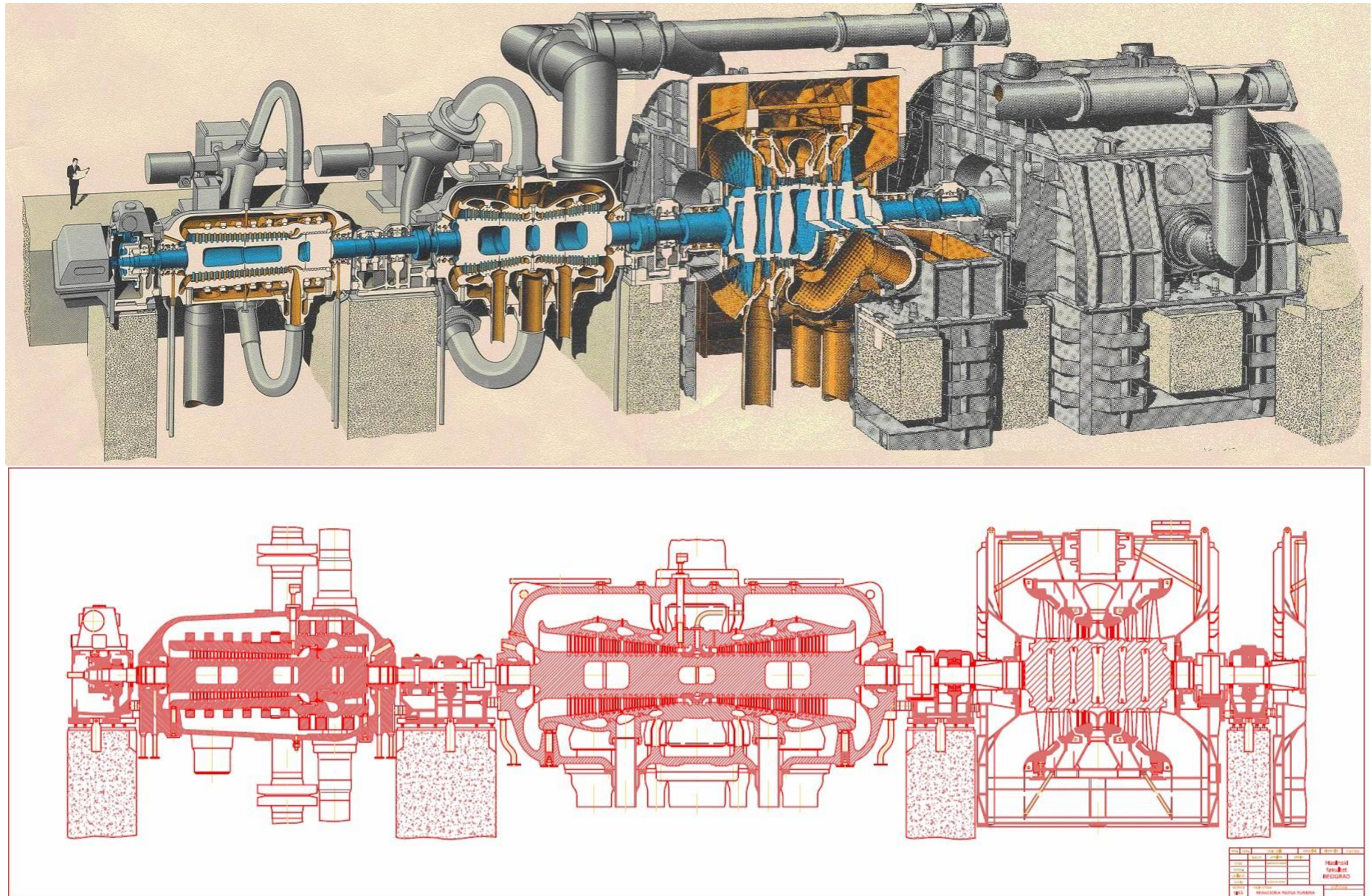
Svaka turbina, pored stupnjeva, mora imati i druge uglavnom konstruktivne elemente. Naime, jedno ili više radnih kola moraju biti pričvršćeni za **vratilo** kojim se obrtni moment preko spojnice prenosi na radnu mašinu (na primer generator). Vratilo sa radnim kolom ili sa više radnih kola naziva se **rotor turbine**. Kako radni fluid ne bi izlazio u okolinu, unutrašnjost turbine mora biti zatvorena (zaptivena). U ovu svrhu služi **oklop turbine** koji istovremeno štiti rotor od oštećenja i od uticaja stranih tela i služi kao zaštita od kontakta. Na mestima gde rotor izlazi iz oklopa, takođe se mora sprečiti, s jedne strane dodir pokretnog vratila i nepokretnog oklopa a s druge strane gubitak radnog tela u okolinu (obezbediti zaptivanje). Zbog toga se na takvim mestima predviđa ugradnja uglavnom bezkontaktnih **zaptivki**. Za aksijalno i radijalno vođenje rotora tj., kako bi se obezbedili aksijalni i radijalni zazori pri obrtanju rotora, moraju biti ugrađena **radijalna i aksijalna ležišta**. Ona istovremeno služe za primanje (kompenzovanje) odgovarajućih radijalnih i aksijalnih sila koje se javljaju pri radu turbine.

Na Sl. 10 je prikazan podužni presek jedne višestupnje parne turbine sa osnovnim delovima.



Sl. 10 – Presek turbine visokog pritiska

Na Sl. 11 je prikazana jedna moderna turbina velike snage.



Sl. 10. Parna turbina velike snage (iznad 600 MW)