



Dinamičke karakteristike hidroagregata

mr.sc. Miljenko Brezovec

Fakultet elektrotehnike i računarstva - Zavod za visoki napon i energetiku

Unska 3, HR-10000 Zagreb Tel: 01/ 6129 907, Fax: 01/ 6129 890 E-mail: zvne@fer.hr URL: <http://www.zvne.fer.hr/>

- Primjer niskotlačne hidroelektrane
- Hidroagregat s dvostruko reguliranom turbinom
 - osnovni dijelovi
 - sustav turbinske regulacije
 - karakteristike dvostruko regulirane turbine
- Prijelazni režimi rada hidroagregata
- Hidroagregat kao dinamički sustav
- Elektromehaničke oscilacije hidroagregata
- Prisilne oscilacije hidroagregata
- Vibracije rotora
- Sustavi na dijagnostički nadzor hidroagregata

Hidroelektrane na Dravi

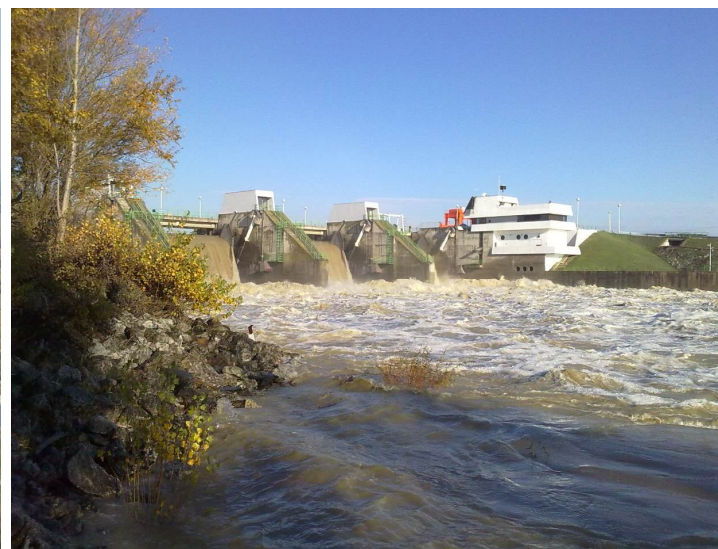
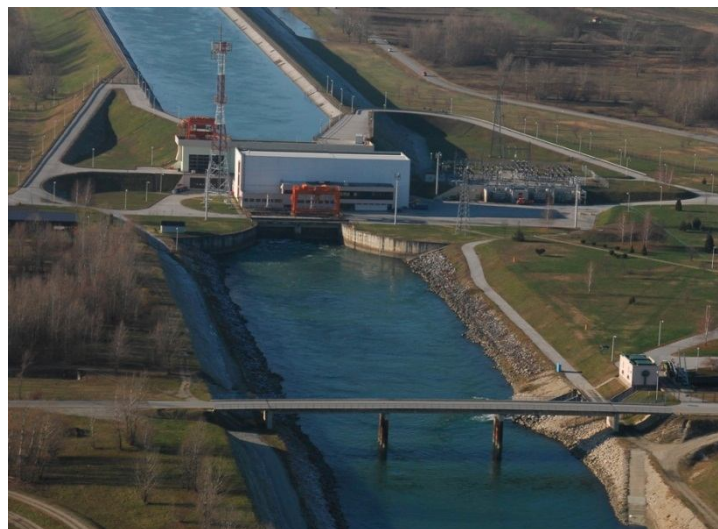


- izgrađene hidroelektrane - Austrija 11, Slovenija 8, Hrvatska 3
- **niskotlačne, derivacijske** hidroelektrane s akumulacijama za dnevno i djelomično tjedno uređenje protoka

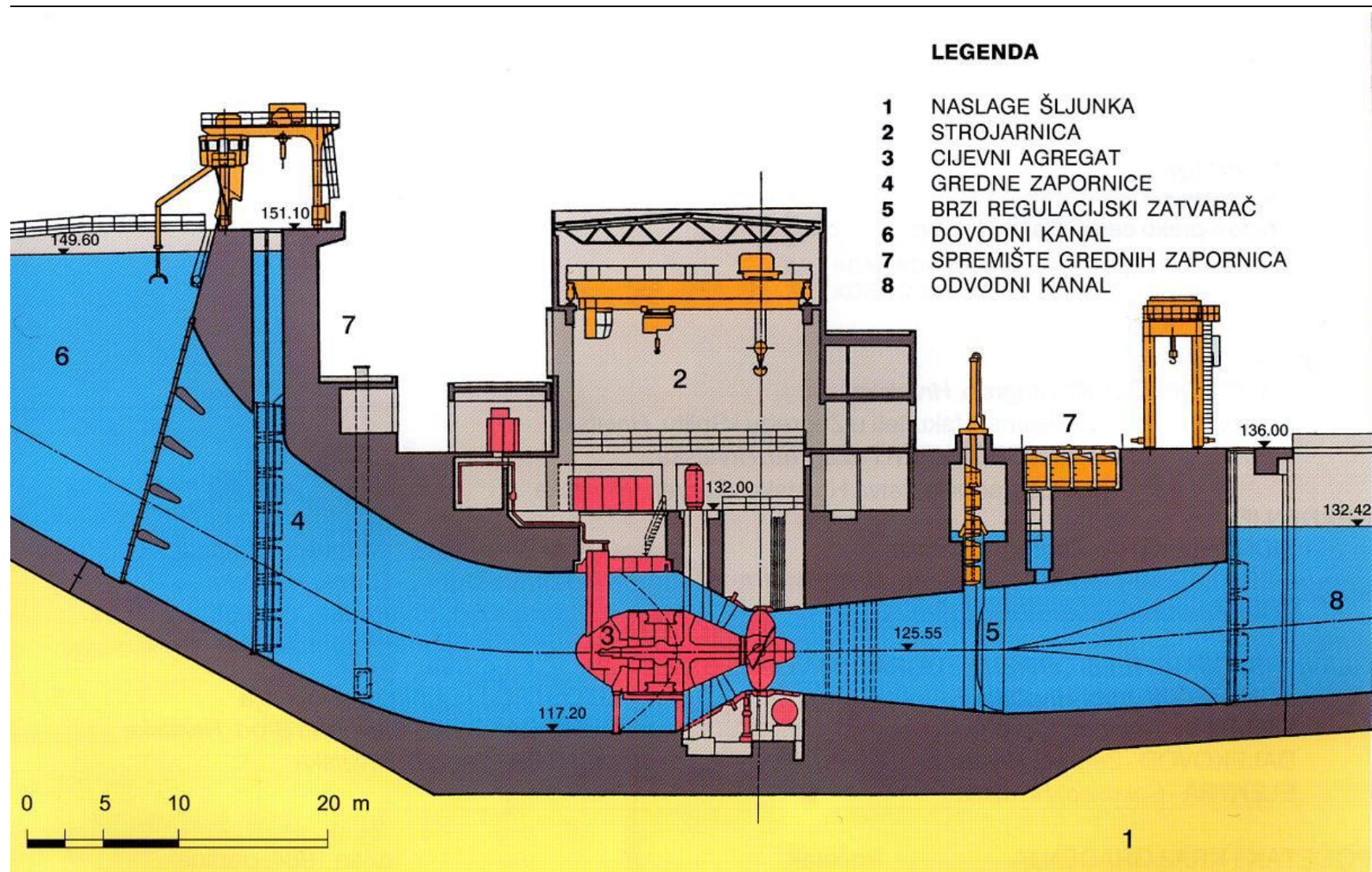
	Varaždin	Čakovec	Dubrava
ukupni volumen akumulacije (10^6 m^3)	8	51.6	93.5
korisni volumen akumulacije (10^6 m^3)	2.8	10.5	16.6
nazivna razina u akumulaciji (m n.m.)	191	168	149.6
derivacijski kanal (km)	7.4 + 7.2	6.5 + 2.0	4.8 + 2.0
pad (m)	20 - 24	16 - 19	16 - 20
maksimalni protok kroz turbine (m^3/s)	2 x 250	2 x 250	2 x 250
vrsta turbine	Kaplan	cijevna	cijevna
prosječna godišnja proizvodnja (GWh)	450	350	350
broj preljevna polja	6	4	4
širina preljevnih polja (m)	17	22	22
visina preljevnih polja (m)	6 + 1.7	9.5 + 2.8	10 + 2.8

- višenamjenski objekti - uz proizvodnju električne energije osnovna funkcija im je **obrana od poplava**

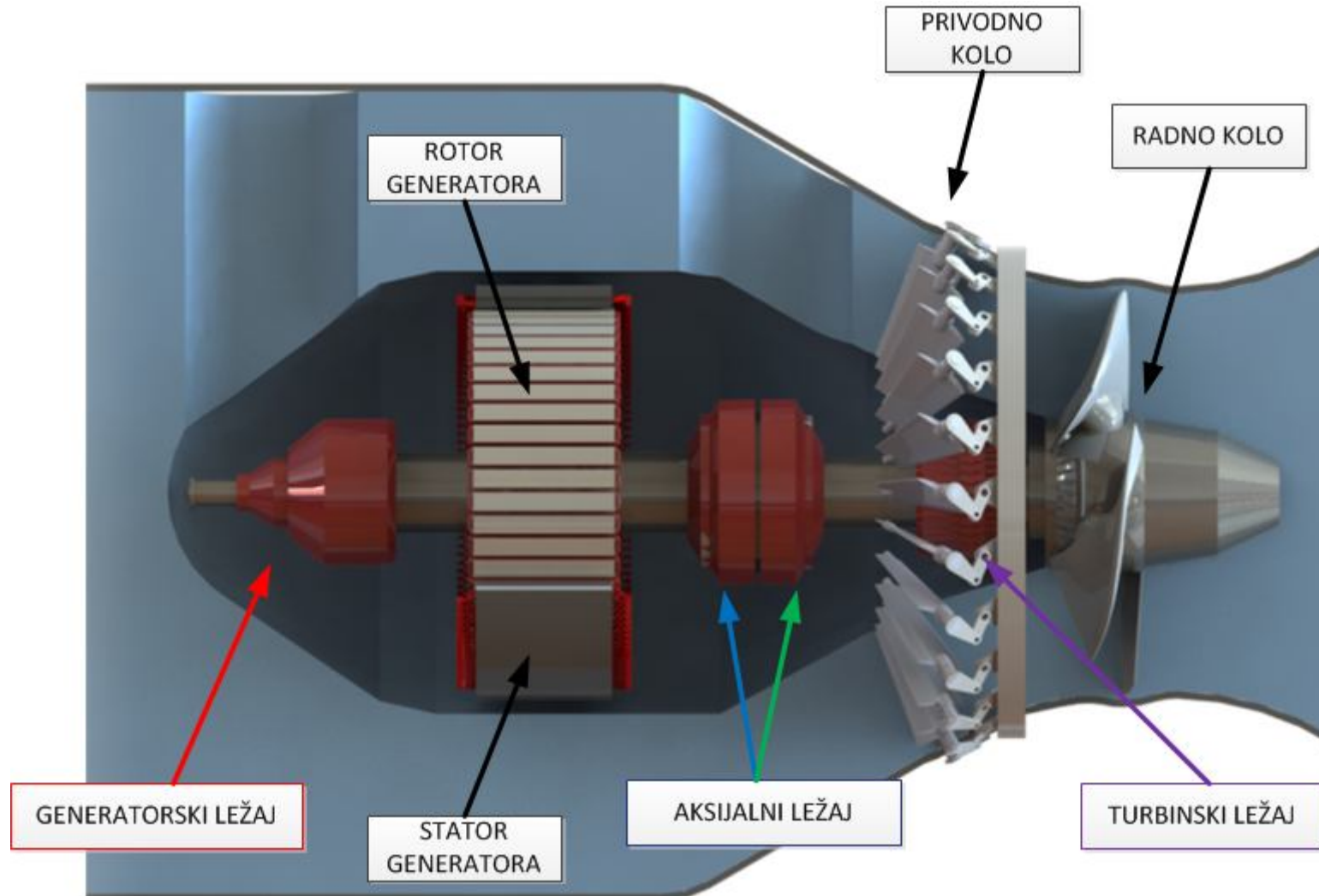
HE Dubrava



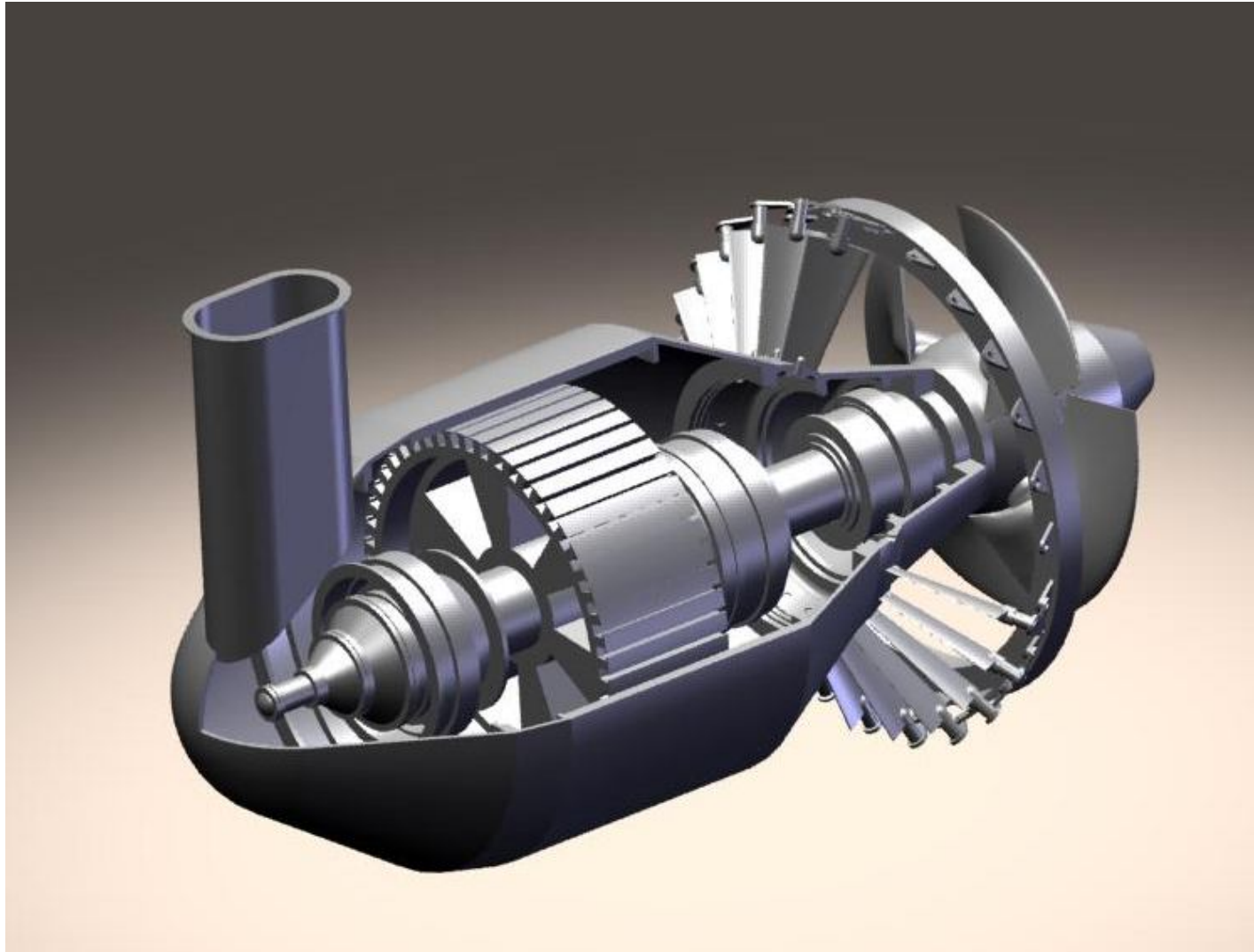
HE Dubrava



Hidroagregat s dvostruko reguliranom cijevnom turbinom



Hidroagregat s dvostruko reguliranom cijevnom turbinom



Turbina



<i>turbina</i>	<i>staro RK</i>	<i>ново RK</i>
<i>maksimalna snaga na vratilu</i>	40.3 MW	43.5 MW
<i>konstruktivni pad</i>	17.50 m	18.80 m
<i>brzina vrtnje pobjega</i>	440 min⁻¹	345 min⁻¹
<i>promjer radnog kola</i>	5400 mm	5500 mm
<i>ulazni promjer difuzora</i>	5180 mm	5335 mm
<i>promjer privodnog kola</i>	6740 mm	
<i>visina privodnog kola</i>	1870 mm	
<i>broj lopatica radnog kola</i>	4	
<i>broj lopatica privodnog kola</i>	24	
<i>broj lopatica preprivodnog kola</i>	6	

Turbina - iznutra



Turbina - izvana



<i>generator</i>	
<i>tip</i>	trofazni sinkroni s horizontalnom osovinom
<i>prividna snaga</i>	42 MVA
<i>napon</i>	6.3 kV ± 7.5 %
<i>struja</i>	3850 A
<i>brzina</i>	125 min⁻¹
<i>frekvencija</i>	50 Hz
<i>faktor snage cos φ</i>	0.95

Generator – rotor i stator

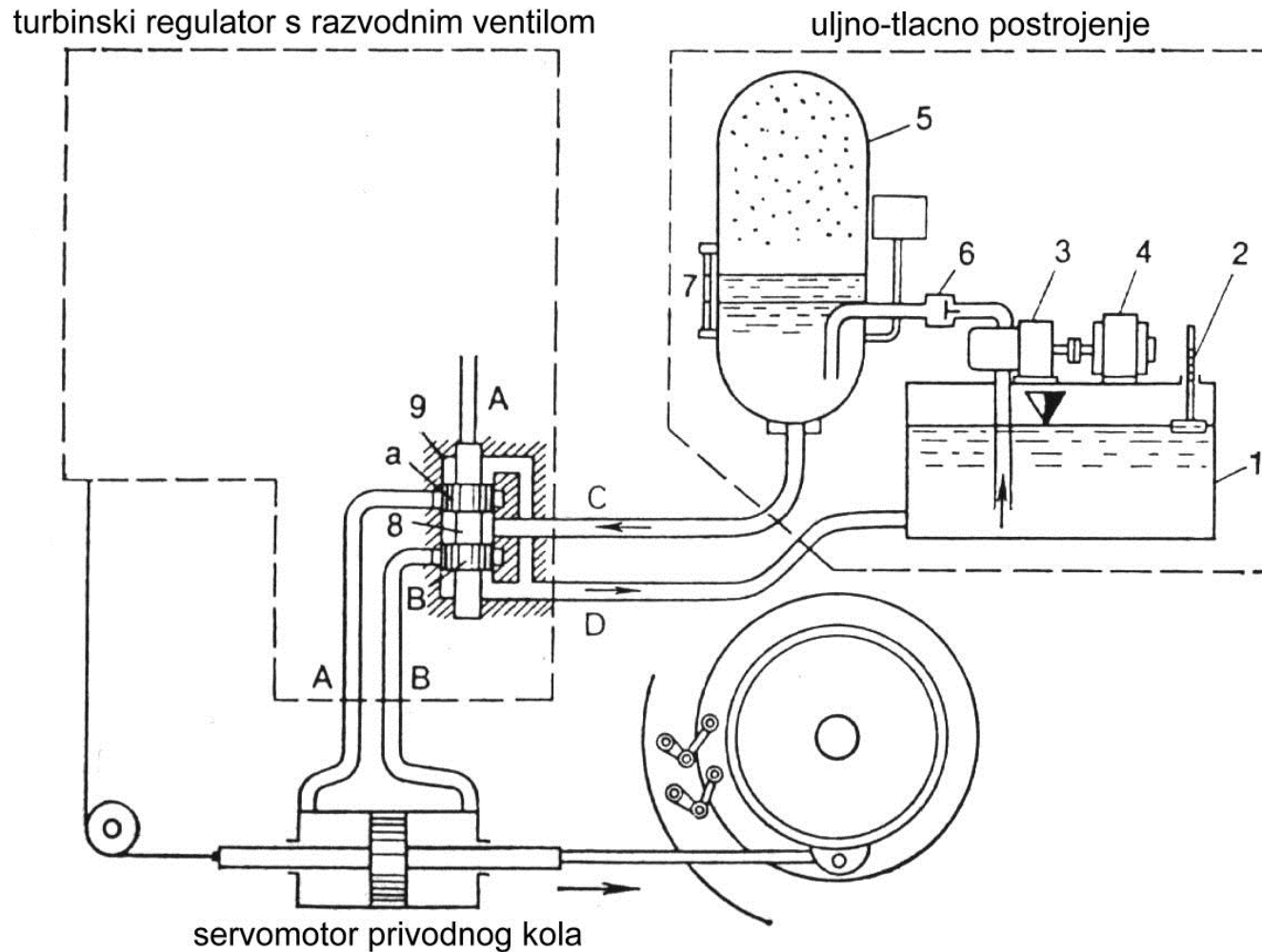


Sustav turbinske regulacije

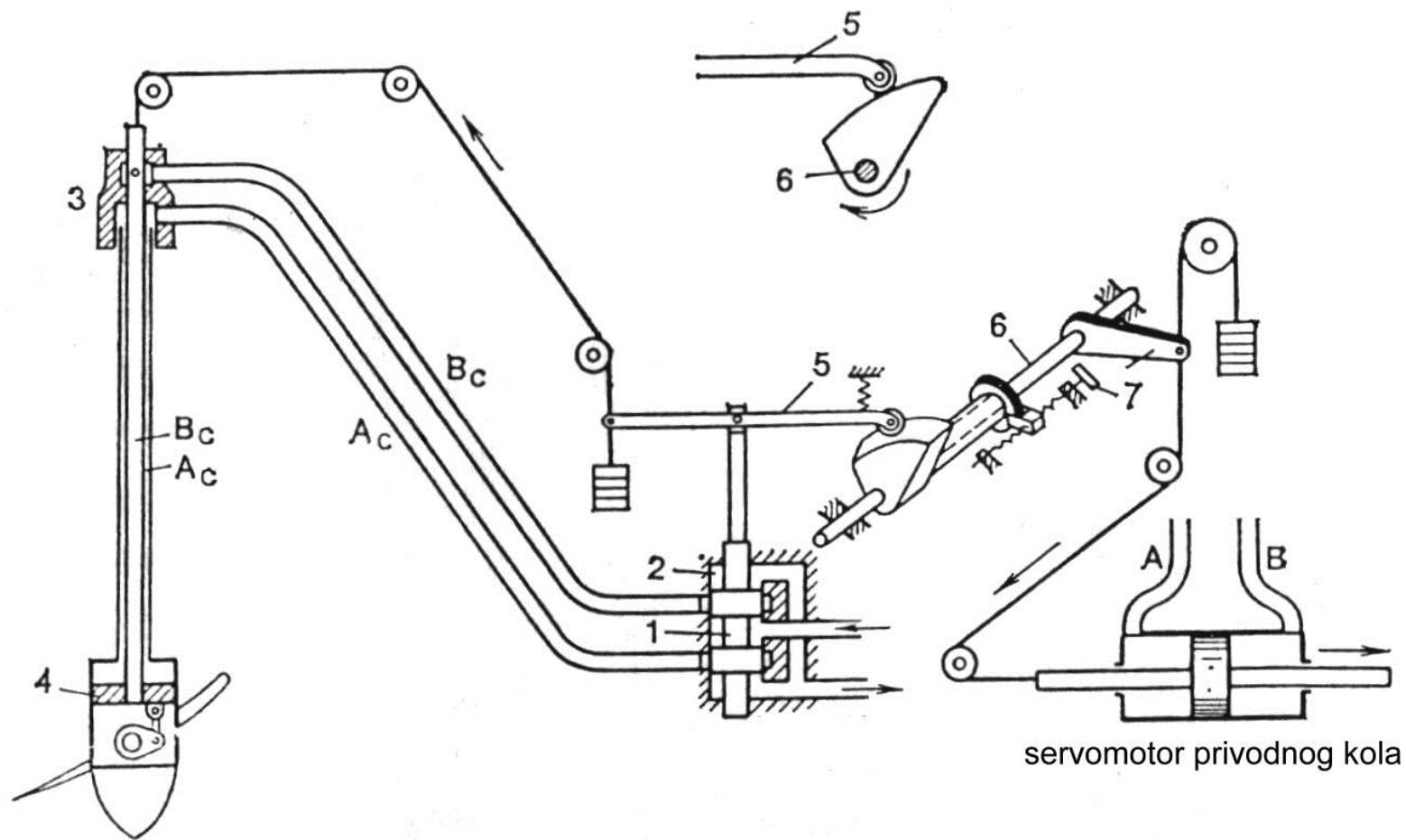


- pogon hidroelektrane obuhvaća općenito pokretanje i zaustavljanje agregata, regulaciju brzine vrtnje pri otočnom radu i regulaciju snage pri paralelnom radu s EE sustavom
- provođenje tih funkcija omogućava **sustav automatske turbinske regulacije** djelovanjem na mehanizam privodnog aparata kojim se određuje protok kroz turbinu
- privodni aparat reakcijskih turbina čine pomične lopatice čijim se zakretanjem mijenja otvor statora koji određuje protok kroz turbinu
- propelerne turbine kod kojih su pomične i lopatice rotora nazivaju se dvostruko reguliranim turbinama – zakret lopatica rotora mijenja se tako da se za svaki otvor privodnog kola kod određenog pada postigne najveća korisnost turbine

Sustav turbinske regulacije



Sustav regulacije dvostruko regulirane turbine

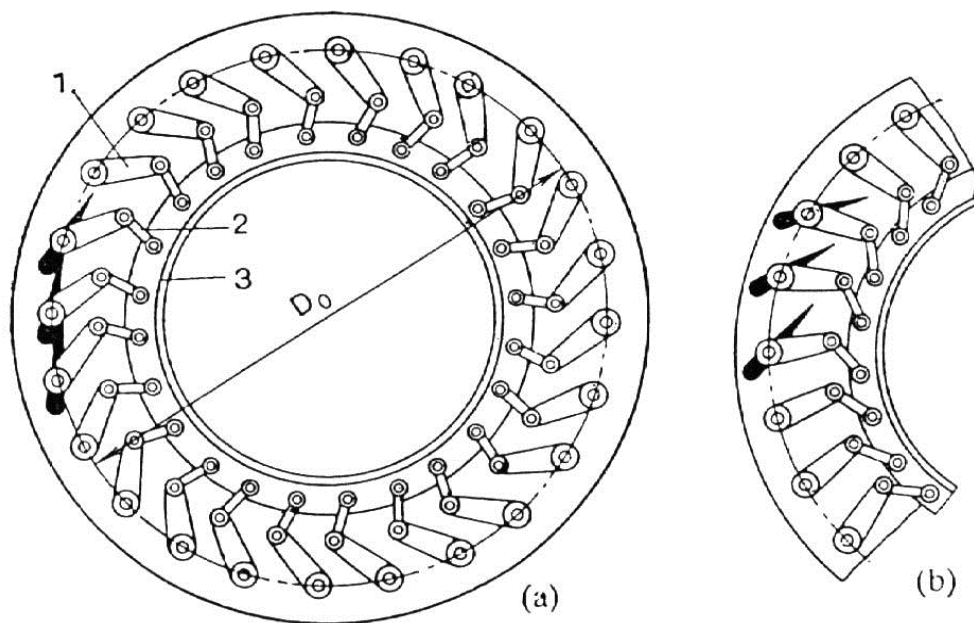


Sustav regulacije dvostruko regulirane turbine



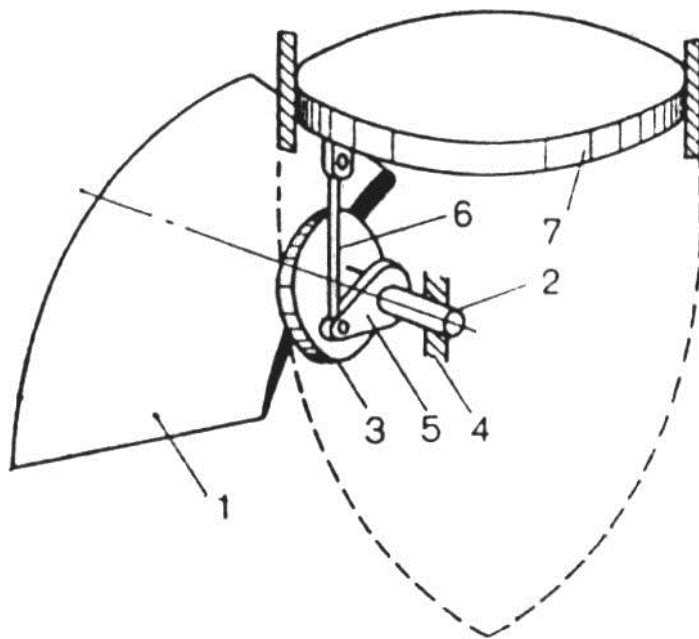
Regulacija protoka kroz turbinu

- uloga statorskih lopatica turbine je usmjeravanje vode u unutrašnjost turbine i regulacija količine vode koja protječe kroz turbinu
- regulacijski prsten zakreće se pomoću servomotora kod kojeg se pomicanje stapa postiže dovodenjem ulja pod tlakom

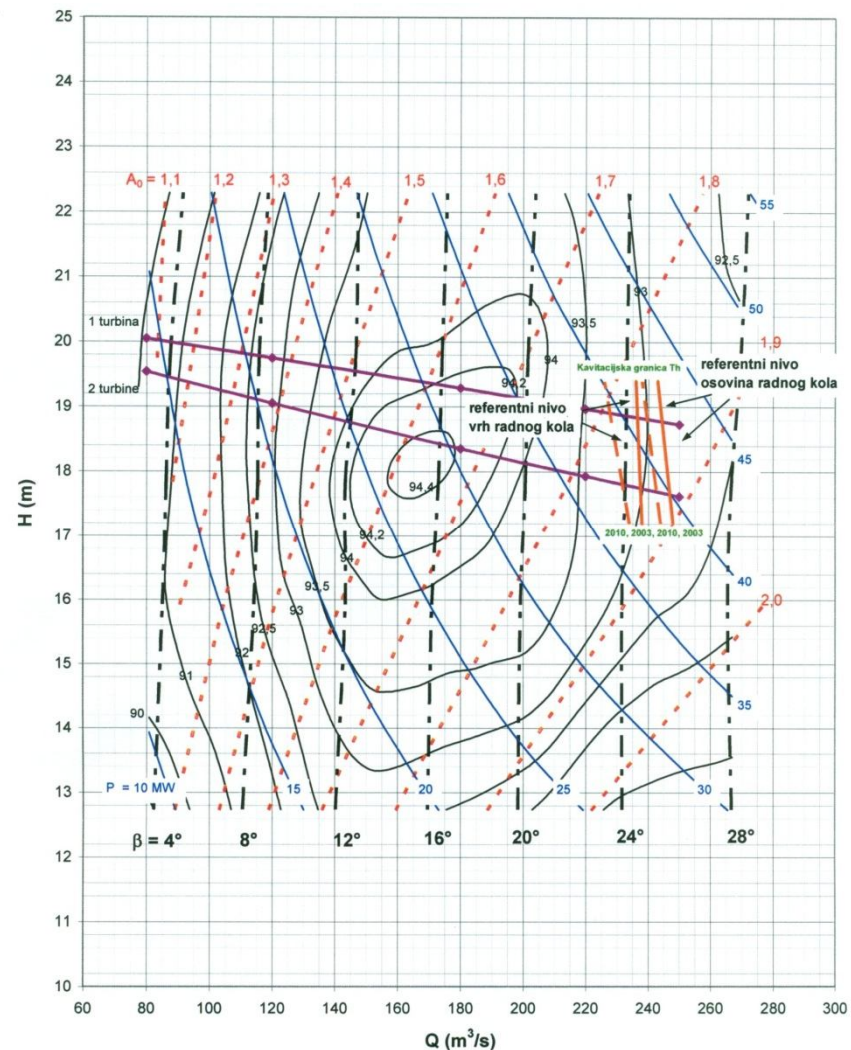
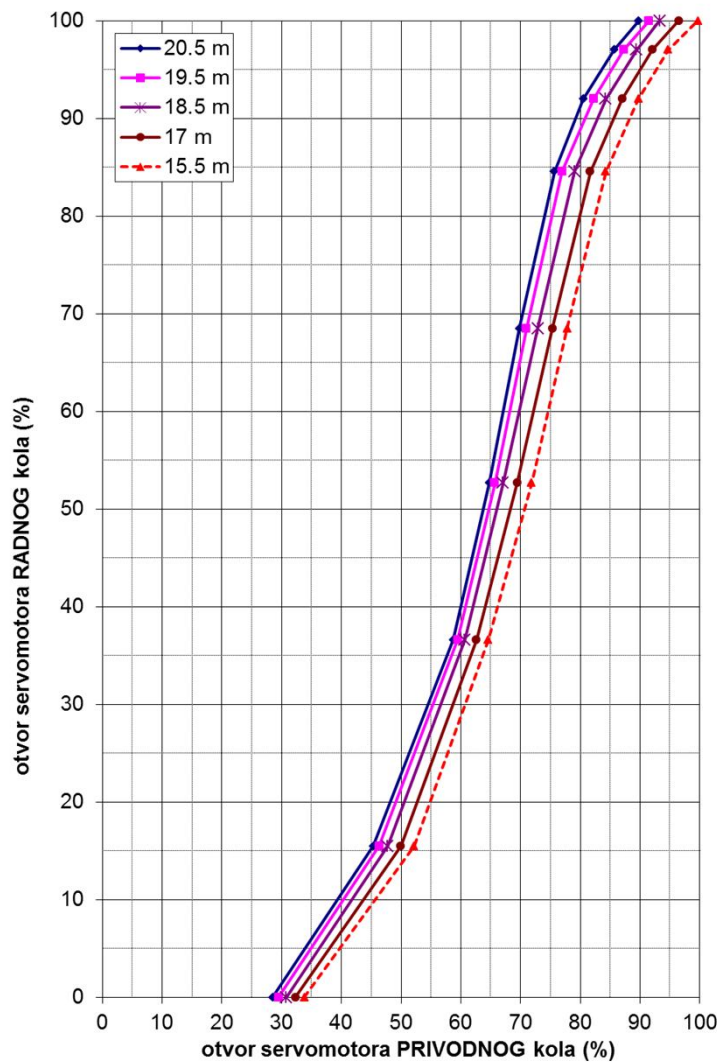


Regulacija protoka kroz turbinu

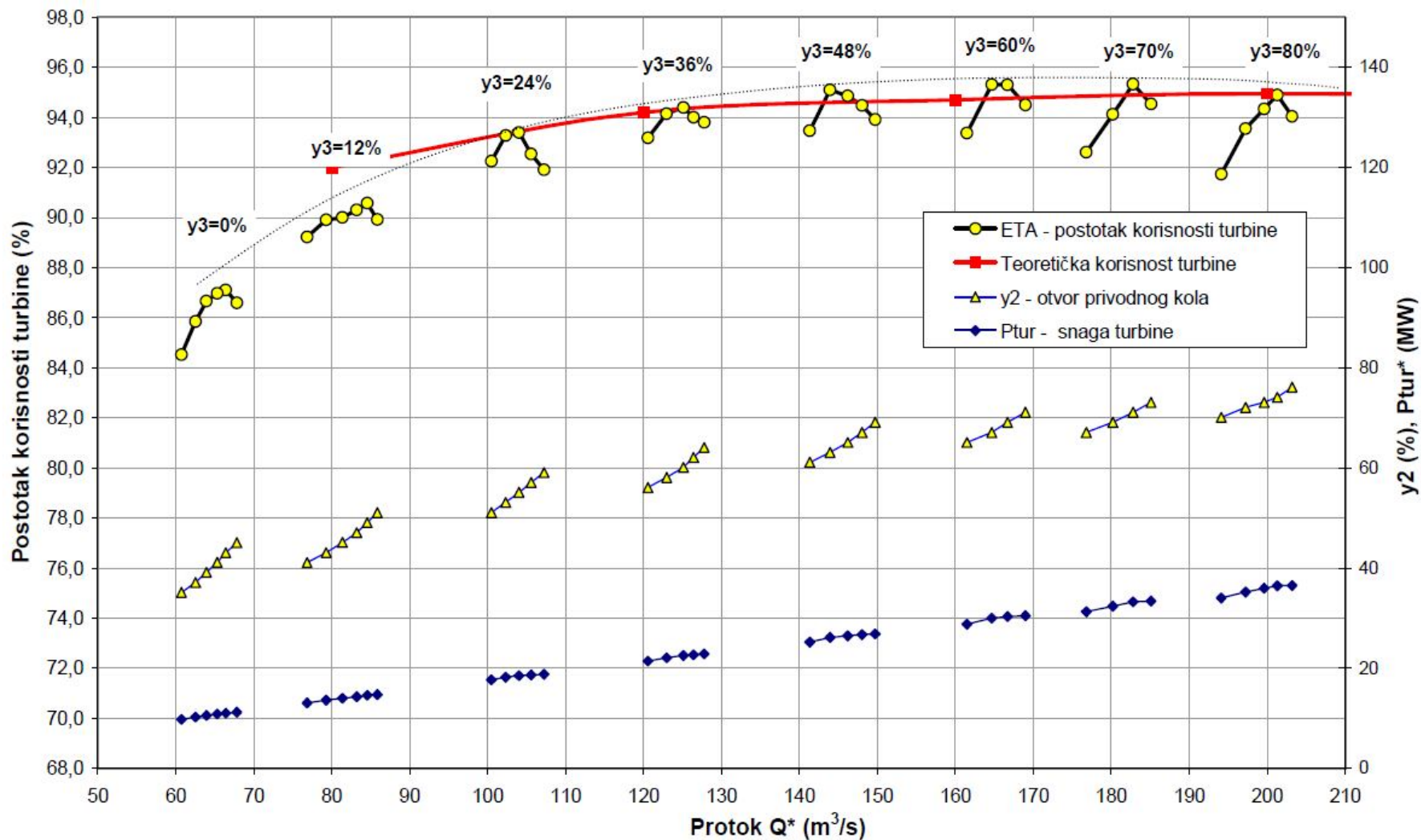
- kod dvostruko reguliranih vodnih turbina mehanizam radnog kola mora omogućiti zakretanje rotorskih lopatica u pogonu kod rotirajućeg rotora



Kulisa i školjkasti dijagram



Određivanje kulise (indeks test)



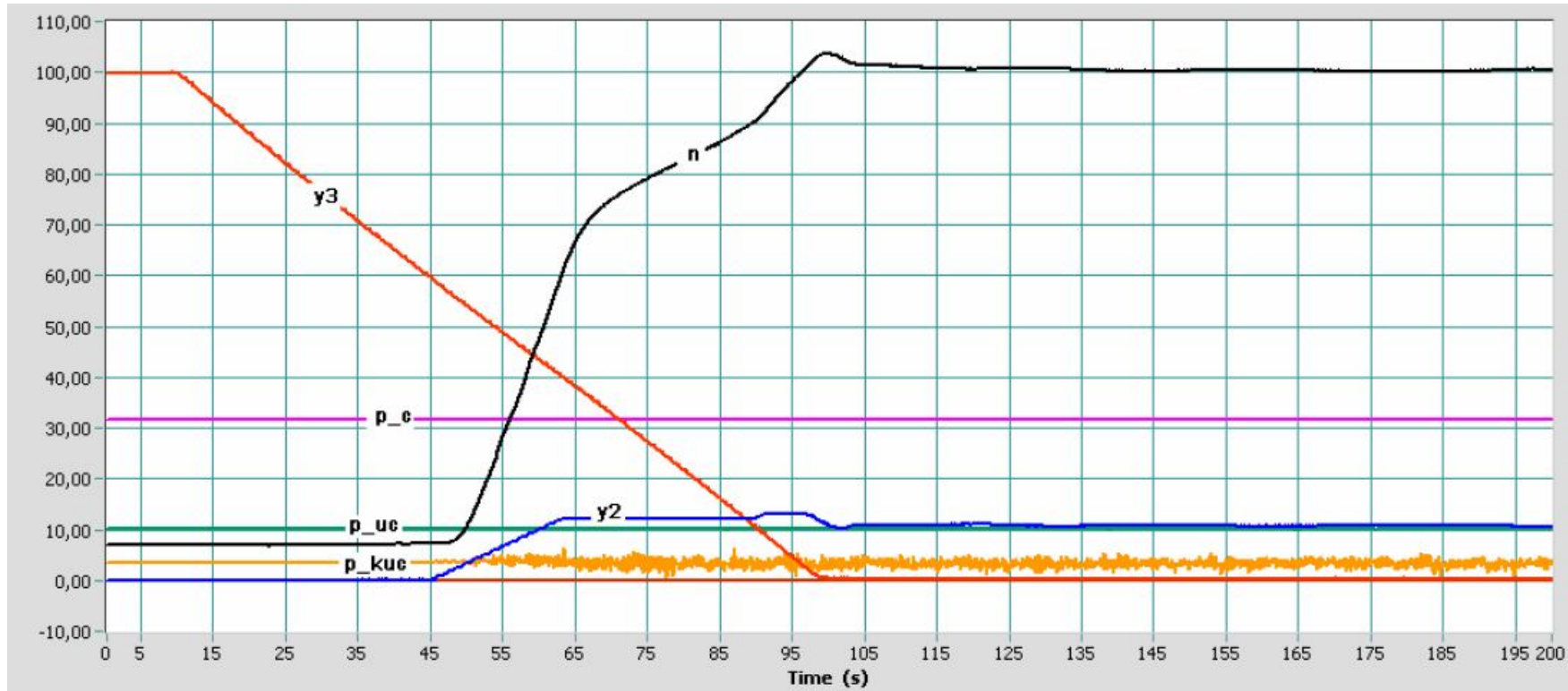
Prijelazni režimi rada



- karakteristični režimi rada hidroagregata
 - mehanička vrtnja (nazivni broj okretaja)
 - prazni hod (uzbuđen generator)
 - rad na mreži
- prijelazni režimi rada
 - pokretanje u mehaničku vrtnju
 - sinkronizacija na mrežu
 - promjena opterećenja – terećenje/rasterećenje
 - normalno zaustavljanje
 - brzo zaustavljanje
 - brzo rasterećenje (brzi stop 2)
 - trenutno rasterećenje (brzi stop 1, stop regulatorom protoka)

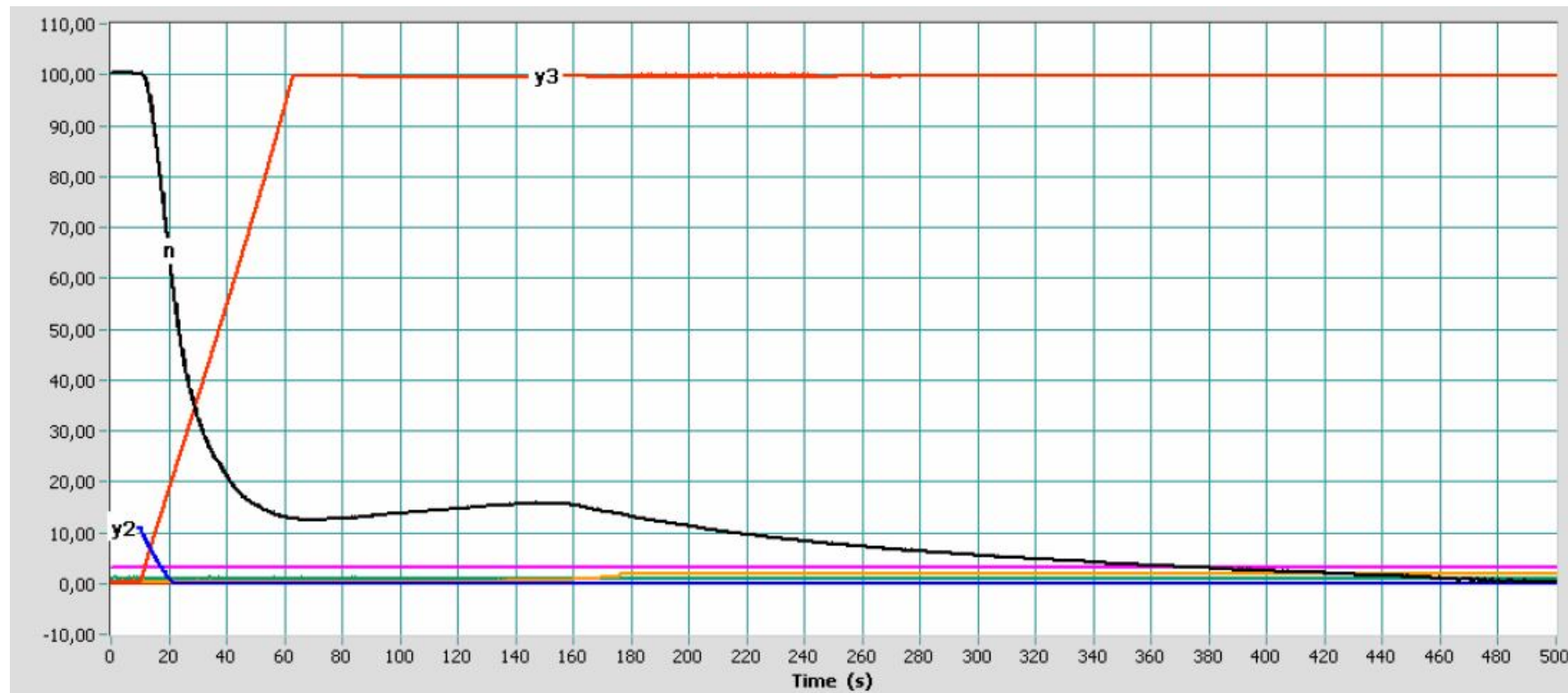
Prijelazni režimi rada

- start agregata u mehaničku vrtnju



Prijelazni režimi rada

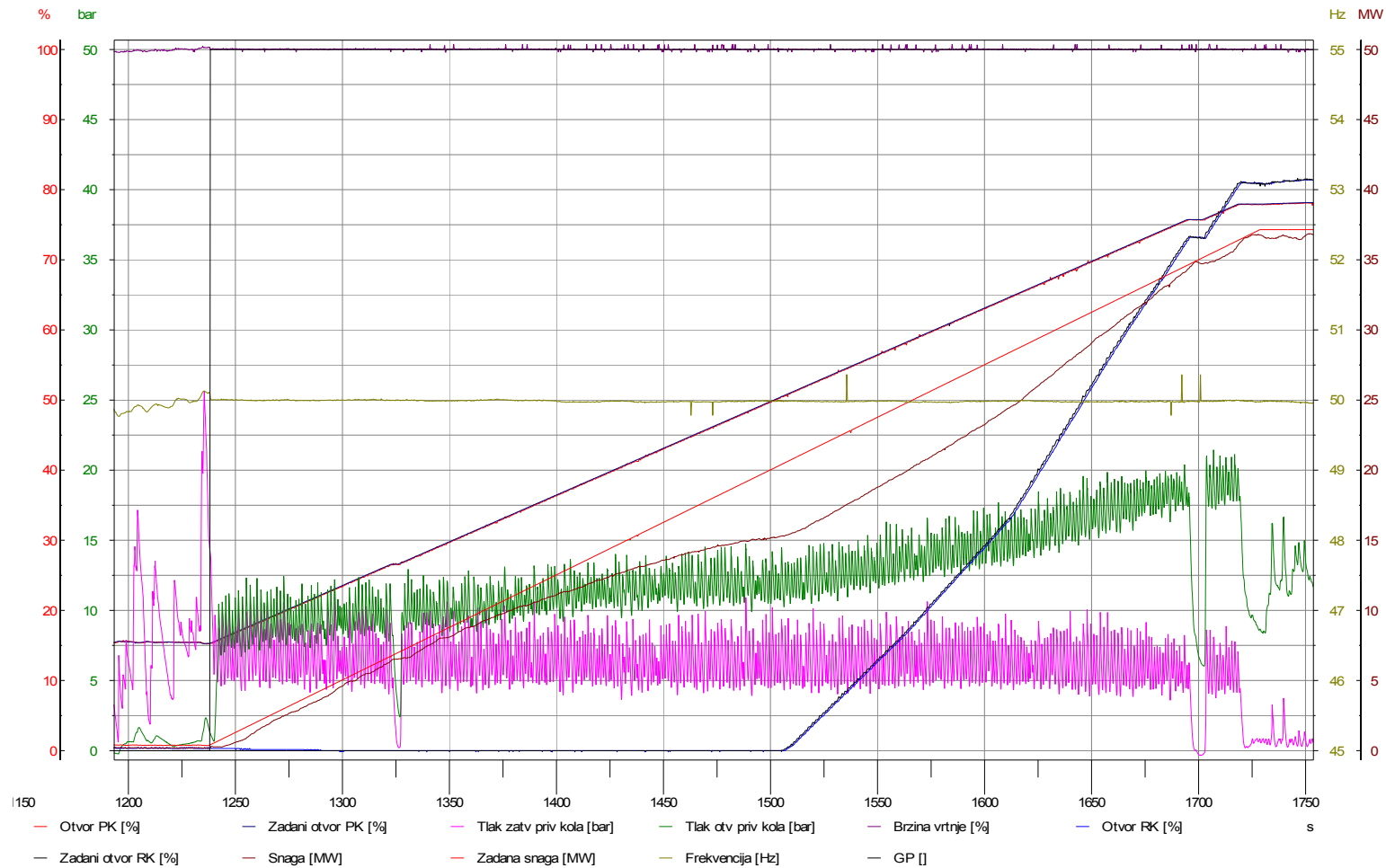
- normalno zaustavljanje agregata



Prijelazni režimi rada



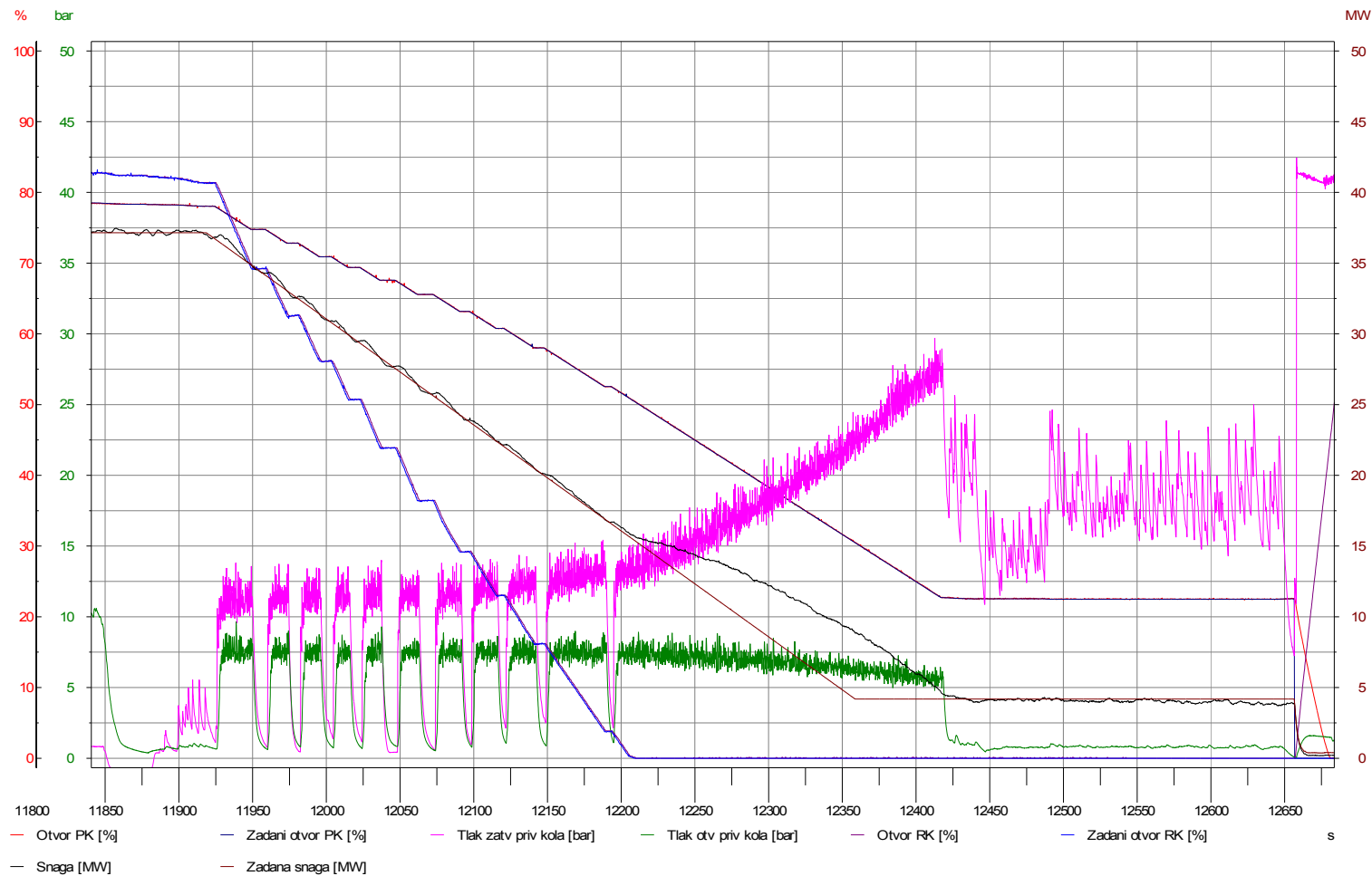
- sinkronizacija i terećenje agregata



Prijelazni režimi rada

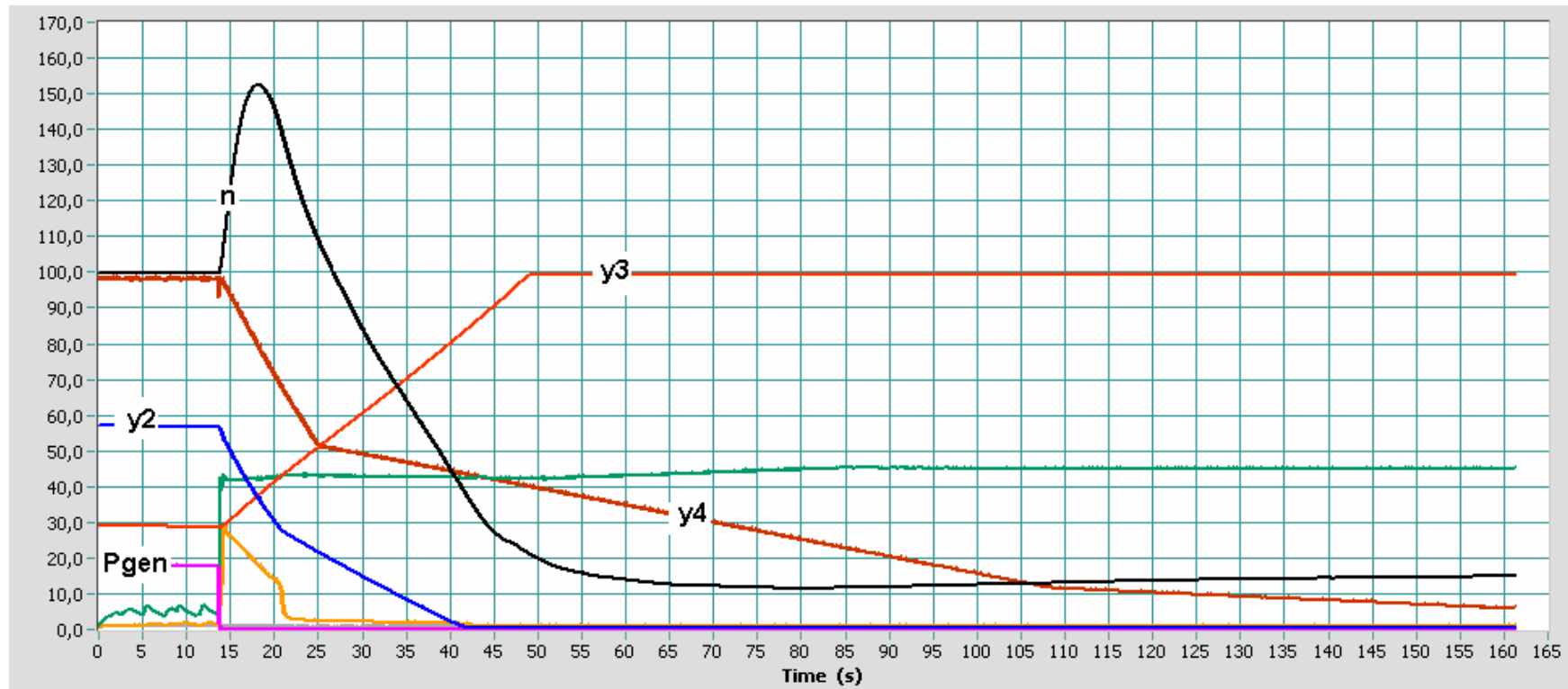


- rasterećenje agregata



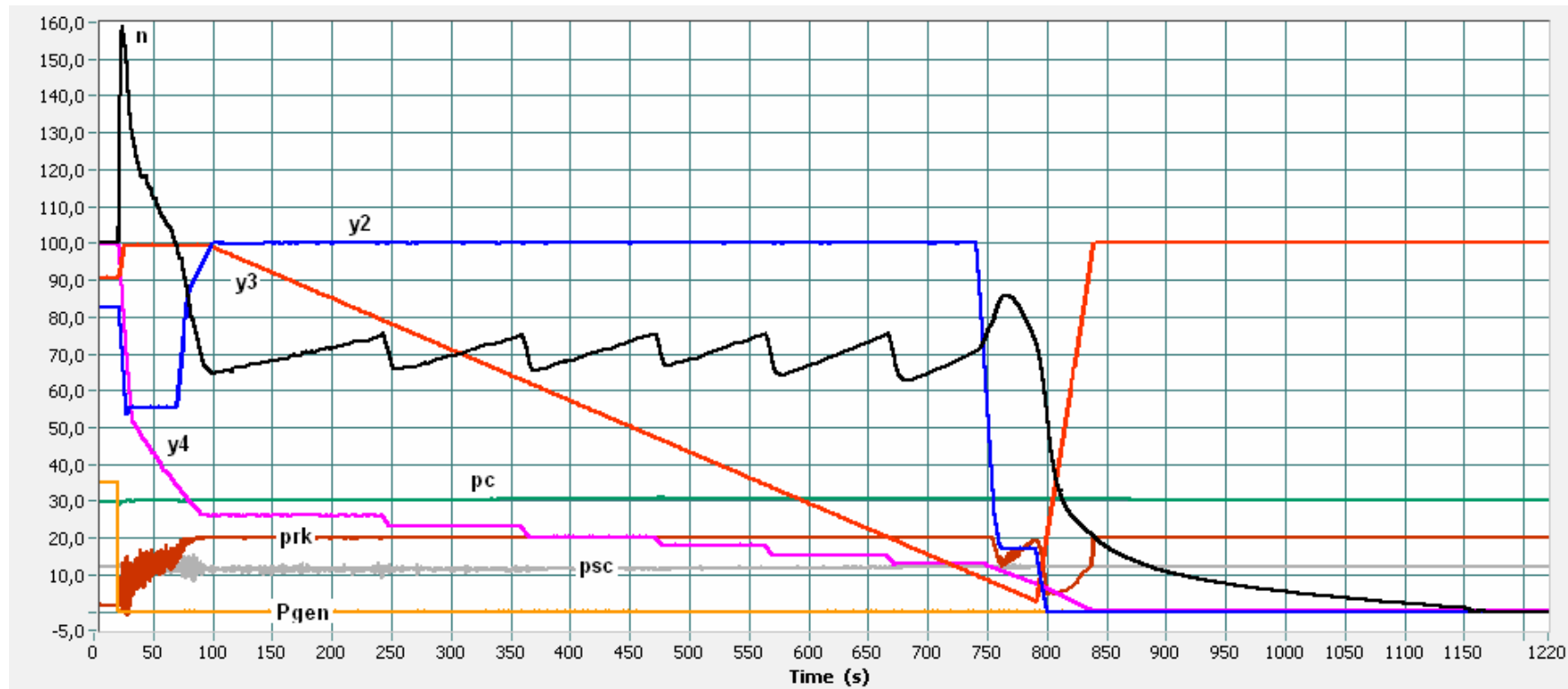
Prijelazni režimi rada

- trenutno rasterećenje (brzi stop 1)



Prijelazni režimi rada

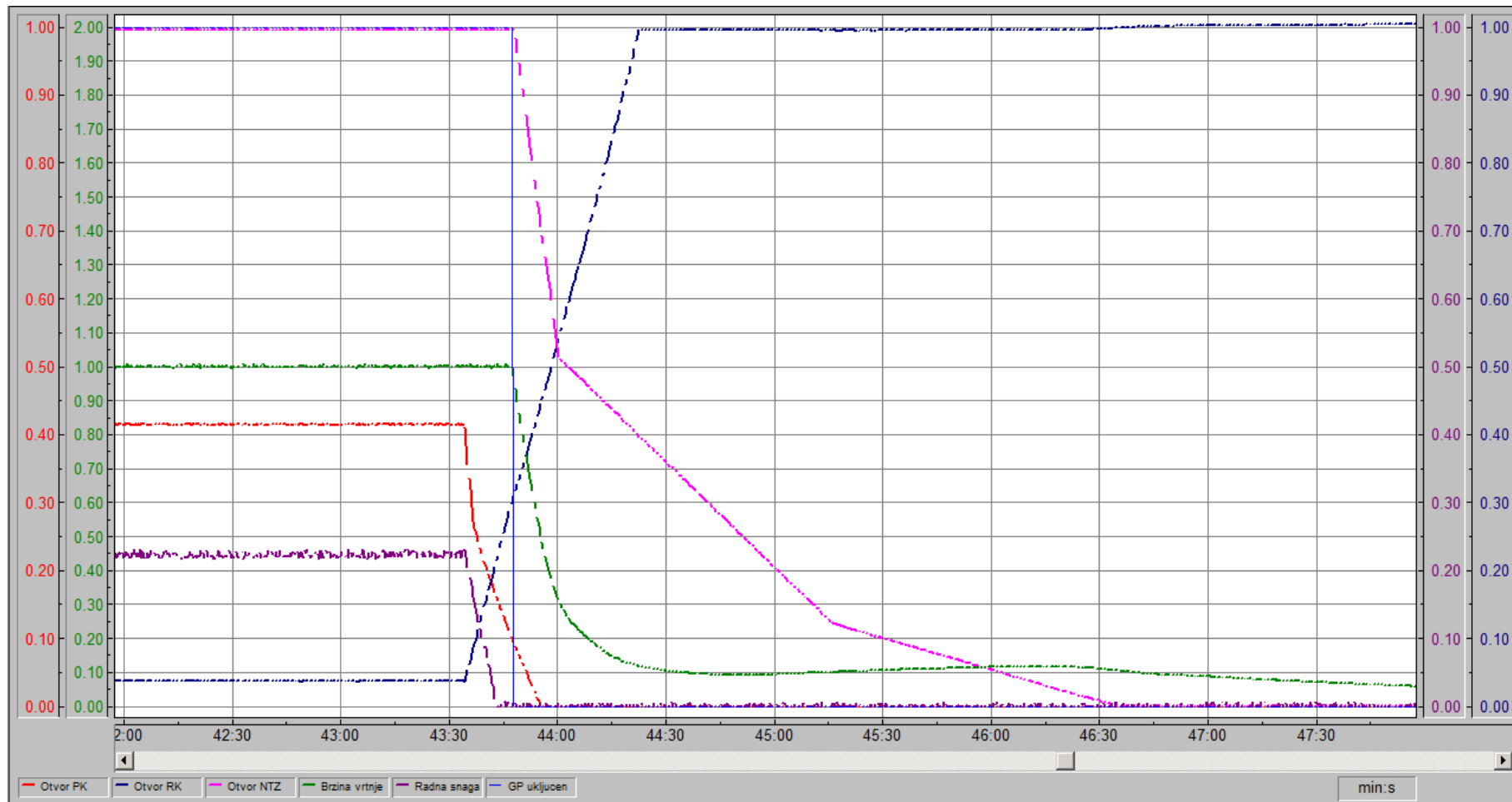
- trenutno rasterećenje (stop regulatorom protoka)



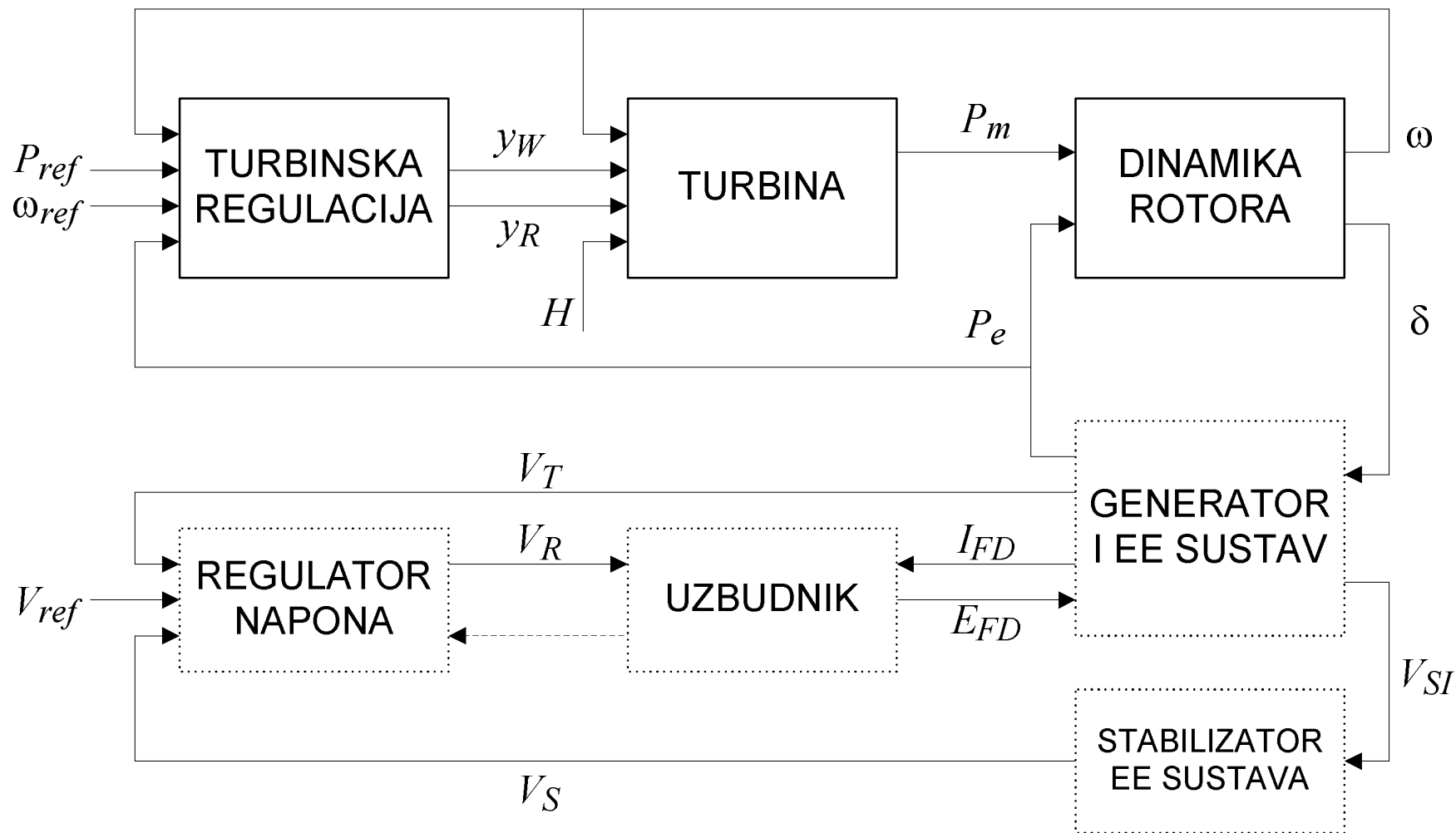
Prijelazni režimi rada



- brzo rasterećenje (brzi stop 2)



Hidroagregat kao dinamički sustav



- istraživanja na simulacijskim modelima agregata
 - analize dinamičkog ponašanja (detaljni nelinearni modeli)
 - definiranje upravljačkih algoritama (linearizirani modeli)
 - dijagnostika problema u pogonu konkretnih agregata
- **izbor modela** ovisi prije svega o frekvencijskom rasponu prijelaznih pojava odnosno vremenskoj domeni istraživanja
- problem detaljnog modeliranja, u prvom redu generatora i turbina te njihovih regulacijskih sustava, posebno je izražen u proračunima dinamičke i prijelazne stabilnosti
- za opis elektromehaničkih oscilacija potreban je odgovarajući model **sinkronog generatora** – element koji najviše utječe na stabilnost hidroagregata u cjelini

- složenost modela generatora ovisi o tome kako su uključeni pojedini elementi koji utječu na proračun prijelaznih pojava
 - prigušni namot
 - automatski regulator napona
 - stabilizator EE sustava
- kako bi model što preciznije opisivao djelovanje agregata u raznim režimima rada, potreban je nelinearni model u kojem su matematički opisane **karakteristike turbine i sustava turbinske regulacije** konkretnog agregata
- **verifikacija modela** – usporedba rezultata simulacija s rezultatima mjerenja na stvarnom agregatu

- poremećaj stacionarnog stanja agregata rezultira elektromehaničkim oscilacijama generatora
- vrste elektromehaničkih oscilacija
 - lokalne - njihanje generatora u odnosu na ostatak EES-a
 - međupodručne - njihanje koherentnih grupa generatora
- kao posljedica elektromehaničkih oscilacija pojavljuju se njihanja karakterističnih varijabli stanja sinkronog generatora (radna i jalova snaga, napon, struja, brzina vrtnje, kut opterećenja itd.)
- oscilacije se superponiraju stacionarnim varijablama i u nepovoljnim slučajevima mogu ugroziti stabilnost EE sustava
- uvjet stabilnosti
 - amplituda oscilacija ne smije biti prevelika
 - oscilacije moraju biti prigušene

- zahtjev za brzom regulacijom uzbude smanjuje prirodno prigušenje elektromehaničkih oscilacija
- problem stabilnosti rješava se uvođenjem dodatnog zahtjeva na regulator napona tako da djeluje prigušujuće u odnosu na elektromehanička njihanja
- **stabilizator EE sustava**
 - prigušenje međupodručnih i lokalnih oscilacija (od 0.1 do 3 Hz)
 - mora stvoriti komponentu električnog momenta na rotoru koja je u fazi s promjenama brzine
 - izlazni signal stabilizatora uvodi se u sustav uzbude u sumator ispred regulatora napona

Prisilne oscilacije hidroagregata



- **prisilne oscilacije** sinkronog generatora uzrokuje periodički poremećaj momenta turbine
- sile koje djeluju na **rotor vodne turbine**
 - statička radijalna sila (konstrukcija protočnog trakta, statički položaj rotora)
 - vanjske promjenjive sile (nestacionarno strujanje)
 - sile uslijed interakcije rotora i statora turbine

Prisilne oscilacije hidroagregata



- uzroci poremećaja mehaničkog momenta turbine i pojave izmjenične komponente mehaničkog momenta

frekvencija	uzrok
$\sim 1/3 \cdot n$	vrtlog u difuzoru
n	nesimetrija rotora
$n \cdot Z_r$	lopaticice rotora
$n \cdot Z_s$	lopaticice privodnog aparata
$k \cdot n \cdot Z_r$	harmonici lopatica rotora
$m \cdot n \cdot Z_s$	harmonici lopatica privodnog aparata

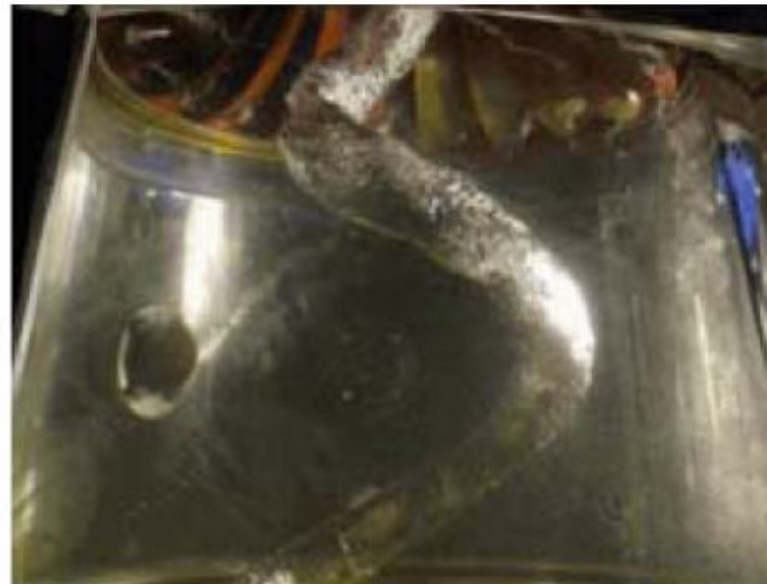
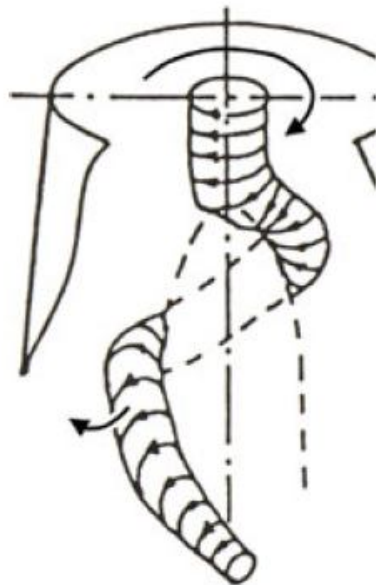
Oscilacije niskih frekvencija



- najčešći uzrok oscilacija niskih frekvencija su pulzacije tlaka u difuzoru koje nastaju kao posljedica vrtloženja
- vrtlog u difuzoru - obično nastaje kod Francis turbina u uskom području otvora privodnog aparata (pri manjim snagama)
- uslijed pulzacija tlaka u difuzoru nastaju pravilne promjene mehaničkog momenta turbine koje rezultiraju s njihovim izlazne snage generatora
- frekvencija takvih njihovih snage nije u direktnoj vezi s brzinom vrtnje i brojem lopatica privodnog aparata ili brojem lopatica rotora
- relativna frekvencija pulzacija u odnosu na brzinu vrtnje je od 0.2 do 0.4 (najčešće oko 0.3)

Oscilacije niskih frekvencija

- vrtlog u difuzoru (*eng. vortex*)



Oscilacije niskih frekvencija



- pulzacije u difuzoru mogu nastati i kod propelernih turbina s fiksnim lopaticama rotora, dok kod dvostruko reguliranih turbina (Kaplan) nemaju značajniji utjecaj
- za optimalne radne točke prema kulisi, vrtlog na izlazu rotora Kaplan turbine je premali da bi nastale pulzacije
- mogućnost nastanka vrtloga kod Kaplan turbina postoji za radne točke izvan kulise – kod malih snaga u postupku terećenja/rasterećenja
- veće pulzacije u difuzoru kod Kaplan turbina pojavljuju se samo u prijelaznim režimima (npr. trenutno rasterećenje)

- mogući uzroci oscilacija frekvencijom rotora:
 - nesimetrija rotora
 - hidraulička – geometrija rotora turbine
 - mehanička – debalans rotirajućih masa
 - nesimetrija protočnog trakta (spiralni ili poluspiralni dovod kod Francis ili Kaplan turbina)
 - kavitacija
- vrlo rijetki primjeri u literaturi – nisu posebno obrađeni

- **periodičke sile** zbog promjena strujanja fluida i tlaka uzrokovanih vrtnjom rotora turbine
- **frekvencija oscilacija** sastoji se od osnovne frekvencije i viših harmonika **brzine vrtnje** i **broja lopatica**
- za pobudu oscilacija rotora određene frekvencije presudna je kombinacija broja lopatica rotora i broja lopatica statora
- u frekvencijskom spektru tlakova oscilacije se pojavljuju kao **pojedinačne frekvencije** – efekti interakcije između rotora i statora mogu se jasno razlučiti od nestabilnosti protoka
- ukoliko se frekvencija periodičke pobude poklapa s odgovarajućom vlastitom frekvencijom konstrukcije pojavljuju se **rezonantne vibracije**

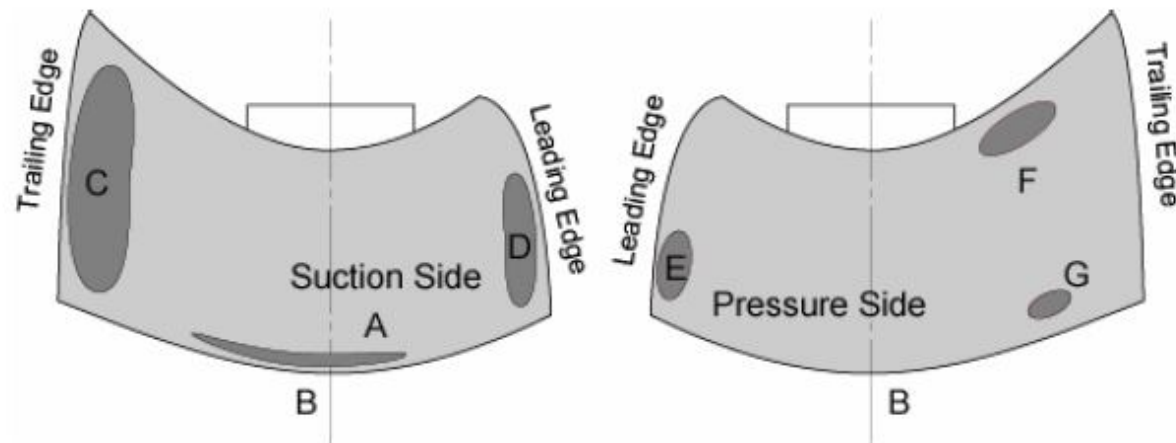
Mogući uzroci rezonancije



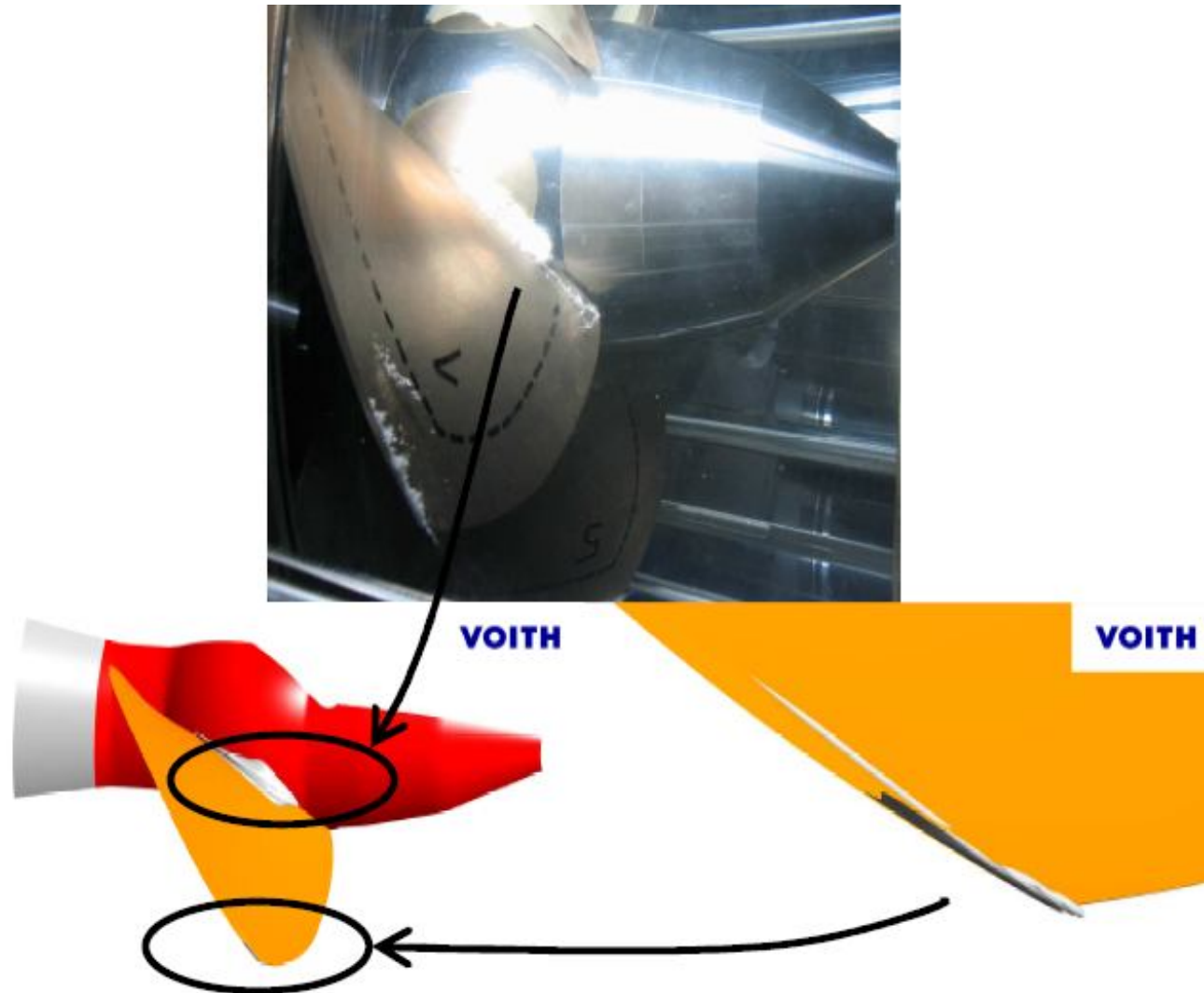
		vrtnog u difuzoru	nesimetrija rotora	lopaticice rotora	lopaticice privodnog aparata	Karmanovi vrtlozi
	frekvencija	$(0.2-0.4) \cdot n$	n	$k \cdot n \cdot Z_r$	$m \cdot n \cdot Z_s$	$St \cdot v / d$
vlastita frekvencija	protočni trakt	X				
	savijanje vratila		X			
	generator	X	X			
	pretprivodne lopaticice			X		X
	lopaticice privodnog aparata			X		X
	lopaticice rotora				X	X

- **kavitacija** je pojava formacije mjehurića na mjestima gdje tlak tekućine u protjecanju pada ispod tlaka isparavanja
- pojave kavitacije uzrokuju buku, vibracije, odnošenje materijala s radnih površina i smanjenje korisnosti
- zbog raznih oblika i tipova kavitacije, može nastati širok spektar intenzivnih **vibracija** i **oscilacija**
- područja nastanka **erozivne kavitacije** kod Kaplan turbina (vertikalnih i cijevnih)
 - glavina rotora – ovaj tip kavitacije bitno utječe na korisnost i osjetljiv je na Thomin broj
 - raspor između lopatice i obloge
 - ulazni brid (tlačna i usisna strana)
 - izlazni brid (usisna strana)

Kavitacija Kaplan i cijevnih turbina

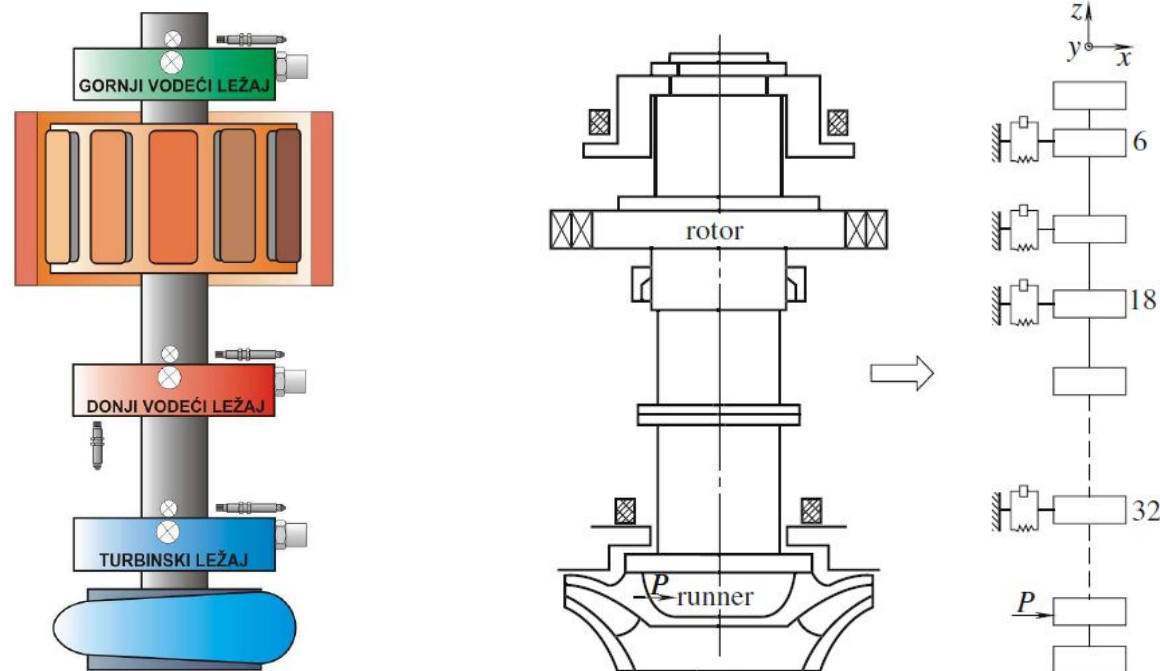


Kavitacija Kaplan i cijevnih turbina



Vibracije rotora

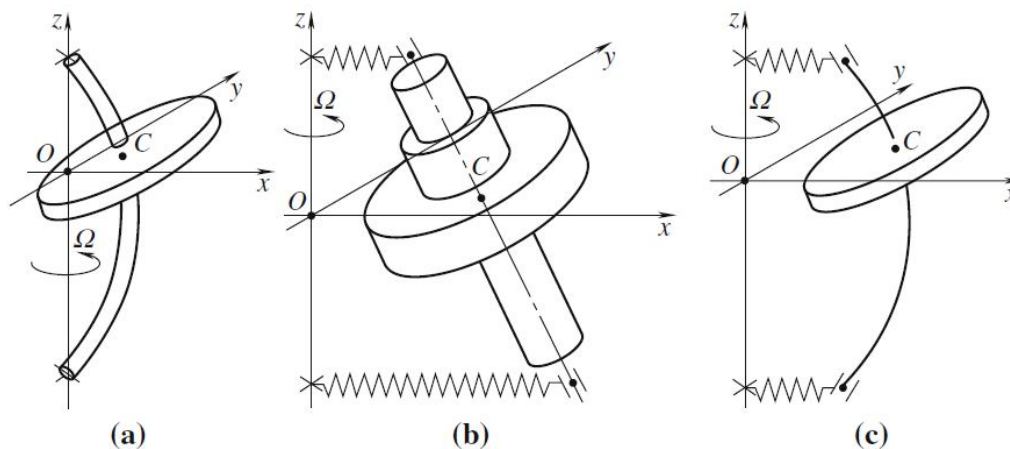
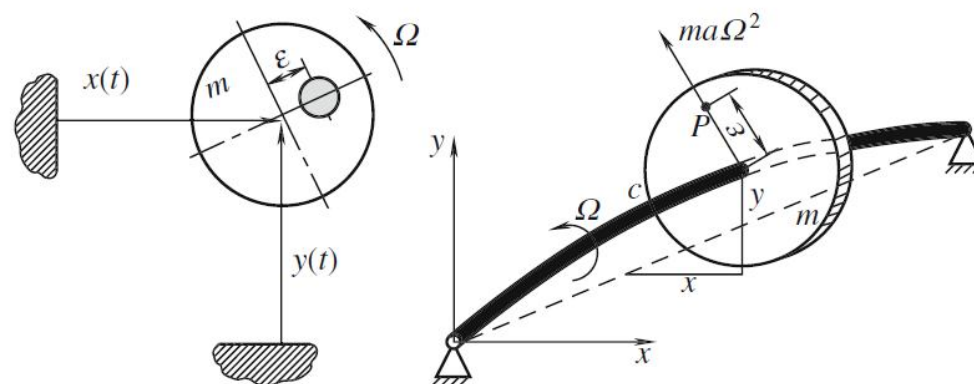
- analiza vibracija rotora mora obuhvatiti utjecaje pogonskog stroja i generatora spojenog na elektroenergetsku mrežu
- agregat koji čine turbina kao pogonski stroj i sinkroni generator sadrži više spremnika energije (rotirajuće mase, induktiviteti namota)



- vibracije rotacijskih strojeva
 - torzijske vibracije
 - poprečne (radijalne) vibracije
- **poprečne vibracije** uzrokuju radijalne sile – na rotor hidroagregata u stacionarnom stanju djeluju uravnotežene konstantne sile (u idealnom slučaju)
- mogući uzroci **radijalnih sila** na rotor hidroagregata
 - neuravnotežena mehanička sila
 - nelinearna i neuravnotežena magnetska sila
 - neuravnotežena hidraulička sila na rotoru turbine
 - sile u ležajevima
 - sile u brtvama

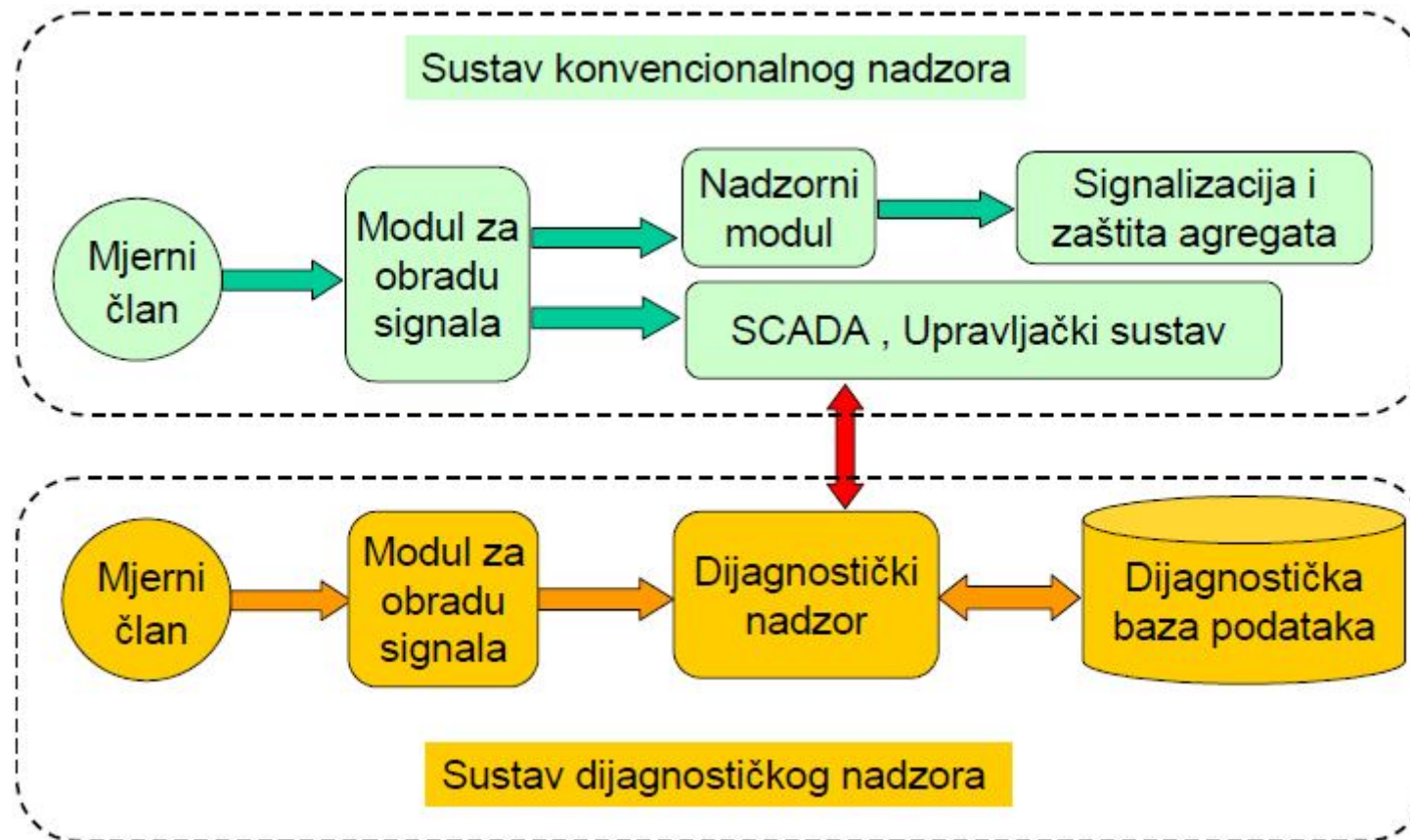
Vibracije rotora

- osnovni model rotora (Jeffcott-rotor)



- sustavi za trajni nadzor stanja agregata koriste raznovrsne senzore i modernu računalnu tehnologiju, mjere i obrađuju veliki broj veličina agregata
- funkcije sustava
 - nadzor rada u realnom vremenu
 - zaštita u slučaju smetnji i kvarova
 - dijagnosticiranje stanja opreme
- podjela sustava za trajni nadzor
 - sustavi za konvencionalni nadzor
 - signalno-zaštitne funkcije
 - nadzorno-upravljačke funkcije (SCADA)
 - sustavi za dijagnostički nadzor (monitoring)

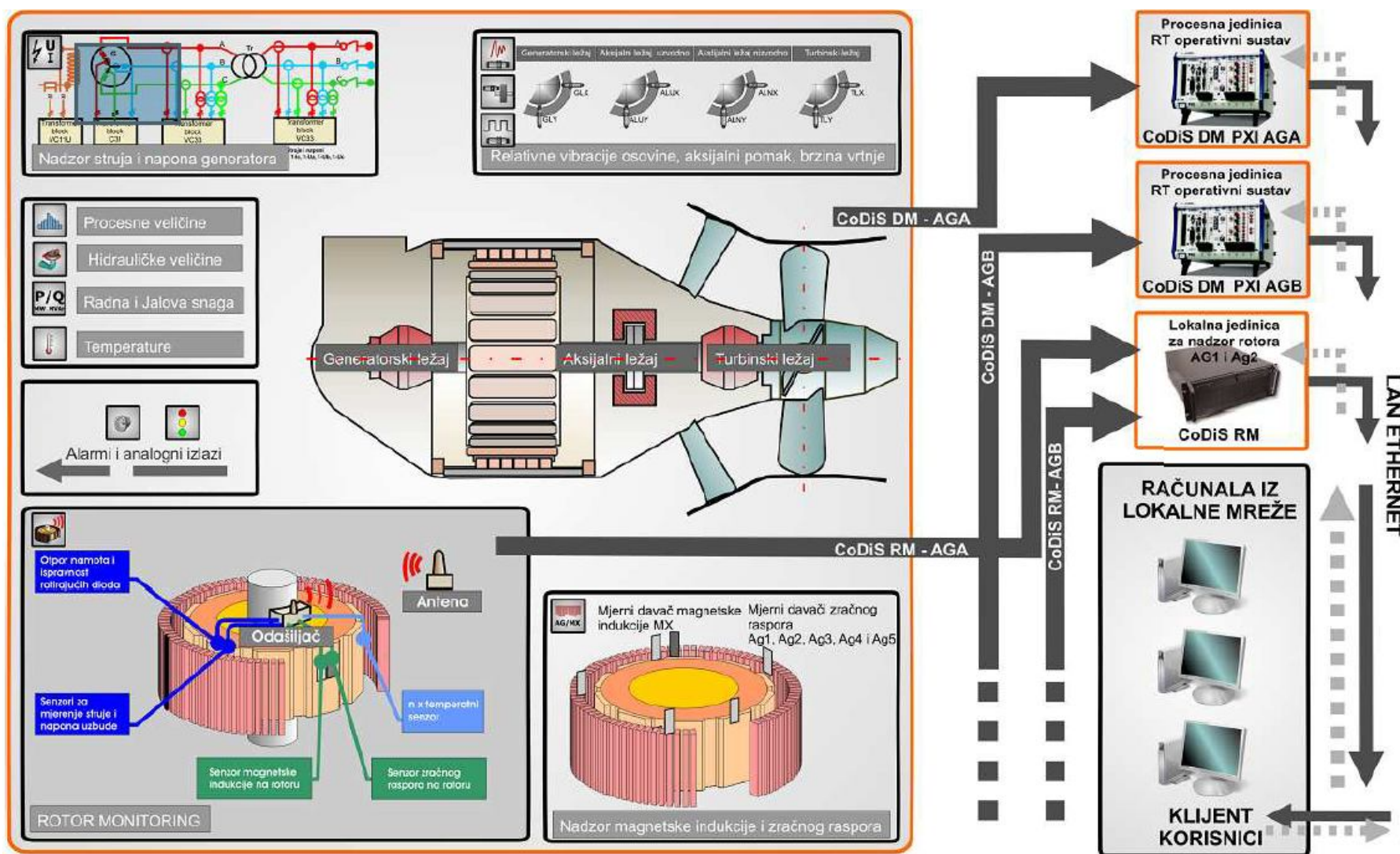
Sustavi za trajni nadzor



- osnovni opseg veličina koje su uključene u današnje sustave dijagnostičkog nadzora hidroagregata
 - vibracijske veličine
 - relativne vibracije vratila rotora u kliznim ležajevima
 - apsolutne vibracije kućišta ležajeva
 - aksijalni pomak rotorskog sustava
 - apsolutne vibracije statorskog paketa
 - vibracije glava statorskog namota
 - vibracije štapova statorskog namota
 - magnetska indukcija u zračnom rasporu
 - zračni raspor
 - osovinski naponi i struje
 - parcijalna izbijanja u izolaciji statorskog namota
- dodatno se razvijaju sustavi za nadzor kavitacije i korisnosti

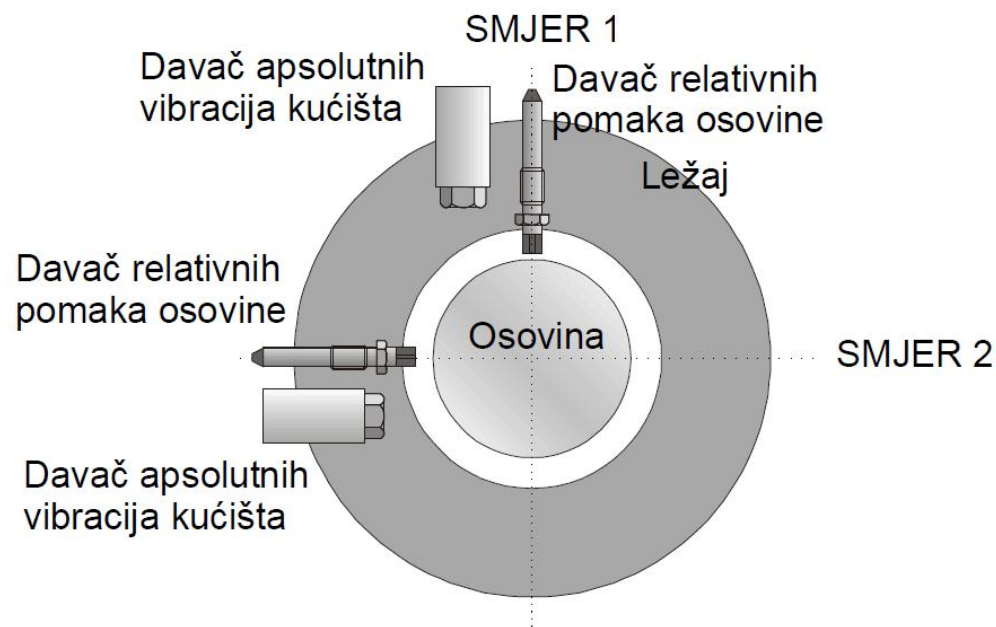
- veličine konvencionalnog nadzora koje se danas najčešće uključuju u sustave dijagnostičkog nadzora hidroagregata
 - naponi i struje armaturnog i uzbudnog namota
 - radna i jalova snaga
 - brzina vrtnje
 - temperature (statorskog namota, statorskog paketa, ležajeva rashladnog sredstva i sl.)
 - tlakovi (rashladnog sredstva, ulja za podmazivanje, ulja za brtvljenje, itd.)
 - protoci (vode kroz turbinu, rashladne vode)
 - otvori (privodno kolo, radno kolo)
 - razine vode
- današnji sustavi omogućavaju nadzor rotorskih veličina (napon i struje uzbude, otpor namota, temperature)

Sustavi za dijagnostički nadzor



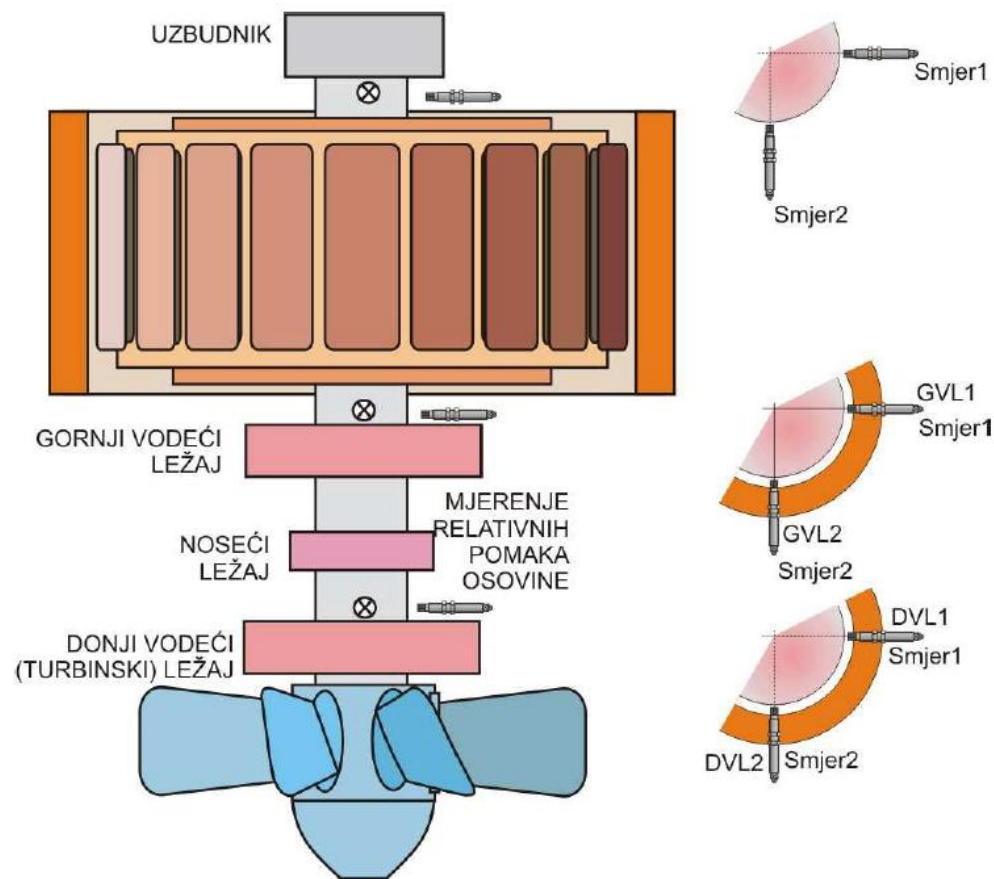
Monitoring vibracija agregata

- ležajevi su osnovna mjerna mjesta za ocjenu dinamike rotora
- mjerenja vibracija:
 - mjerenje relativnih pomaka osovine prema kućištu ležaja
 - mjerenje apsolutnih vibracija kućišta ležaja
- tipični raspored mjernih davača na ležaju



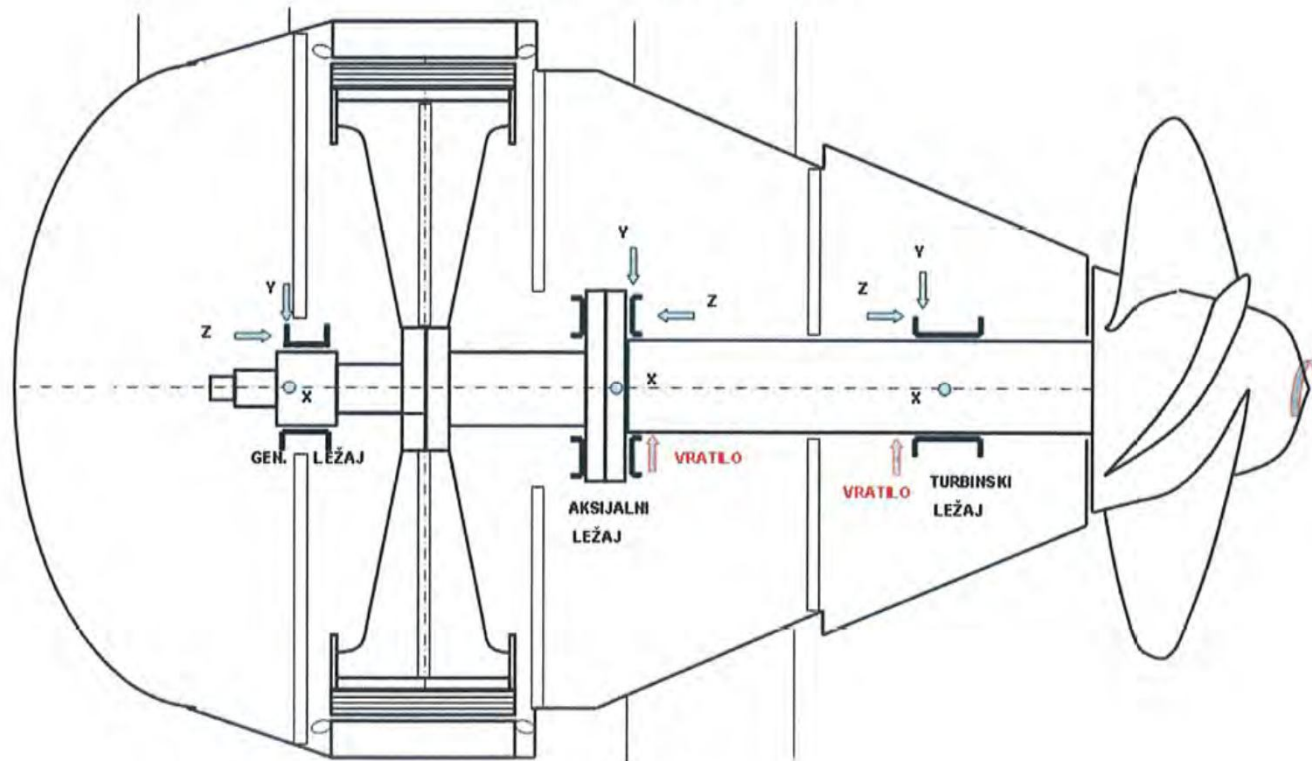
Monitoring vibracija agregata

- primjer rasporeda mjernih davača relativnih pomaka vratila kod vertikalnog agregata



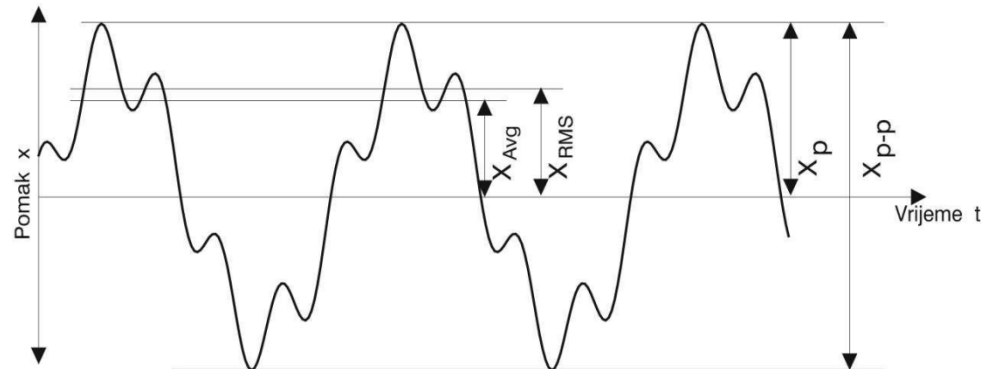
Monitoring vibracija agregata

- primjer rasporeda mjernih davača relativnih pomaka vratila kod horizontalnog agregata



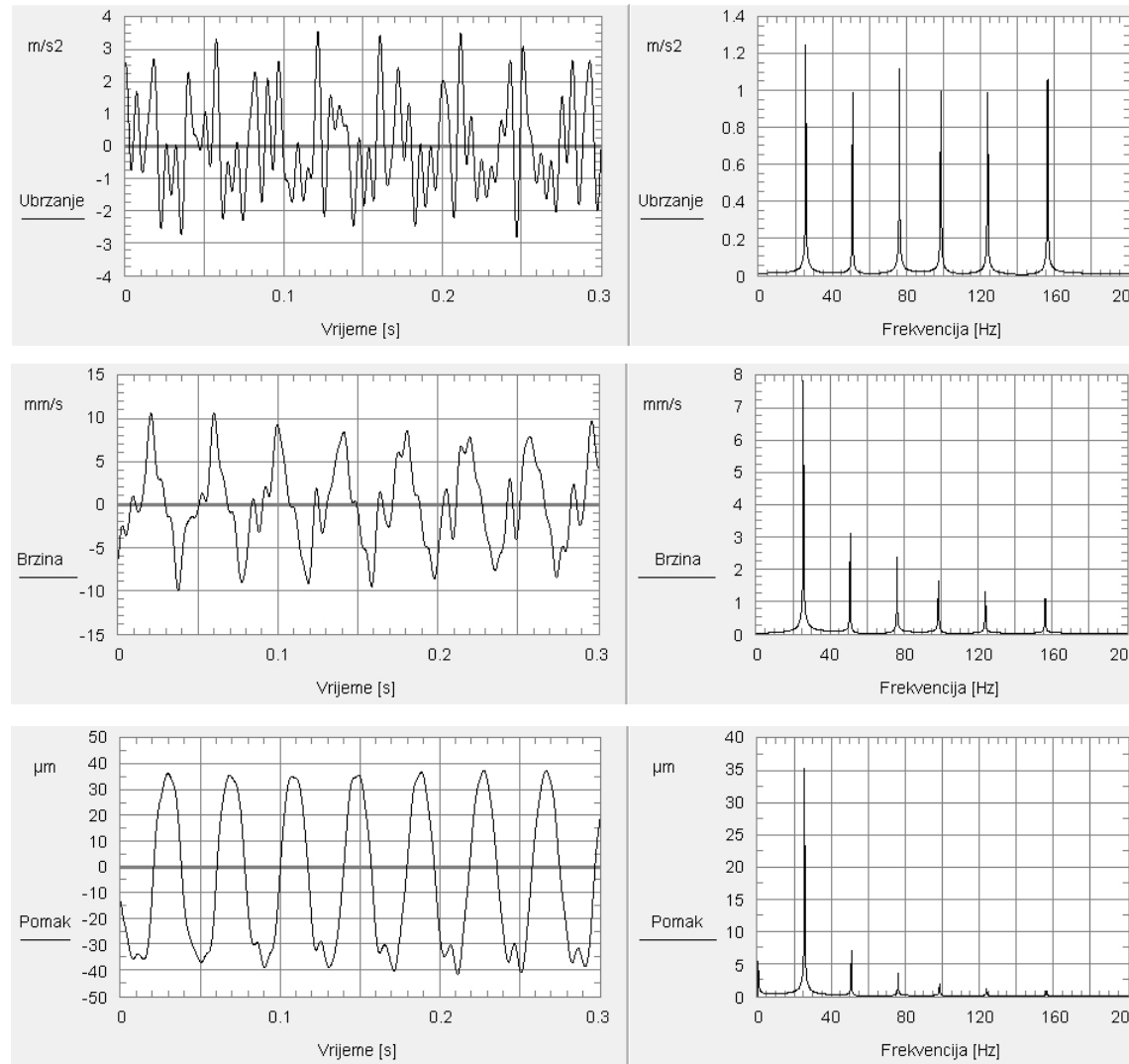
Monitoring vibracija agregata

- značajke signala vibracija



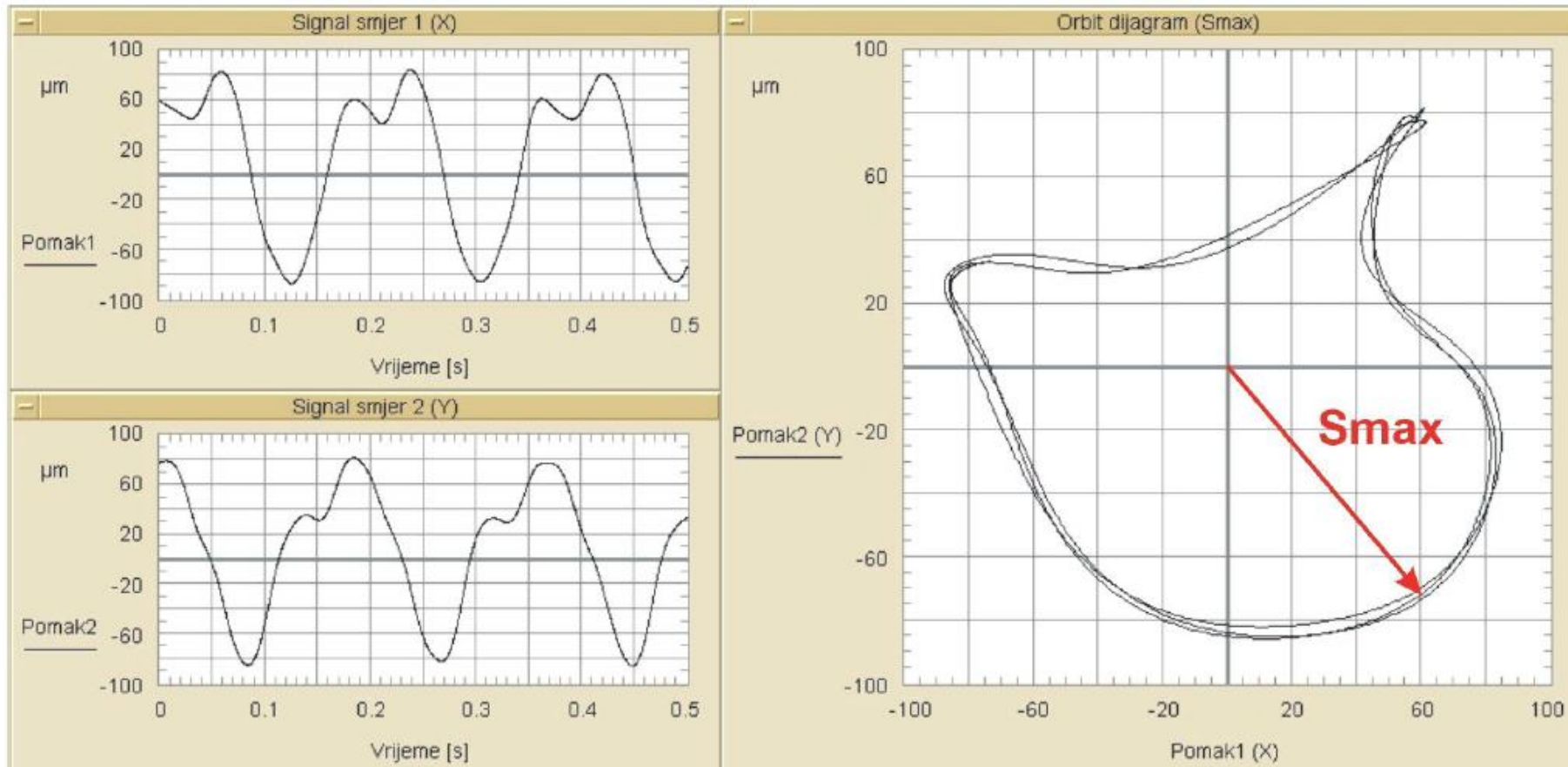
- u mjerenjima i analizi vibracija koriste se sljedeće veličine
 - vibracijski pomak
 - vibracijska brzina
 - vibracijsko ubrzanje
- svi ti pojmovi se odnose na različite opise iste fizikalne pojave i podjednako su važni u području analize vibracija koje se provode u vremenskoj i frekvencijskoj domeni

Monitoring vibracija agregata

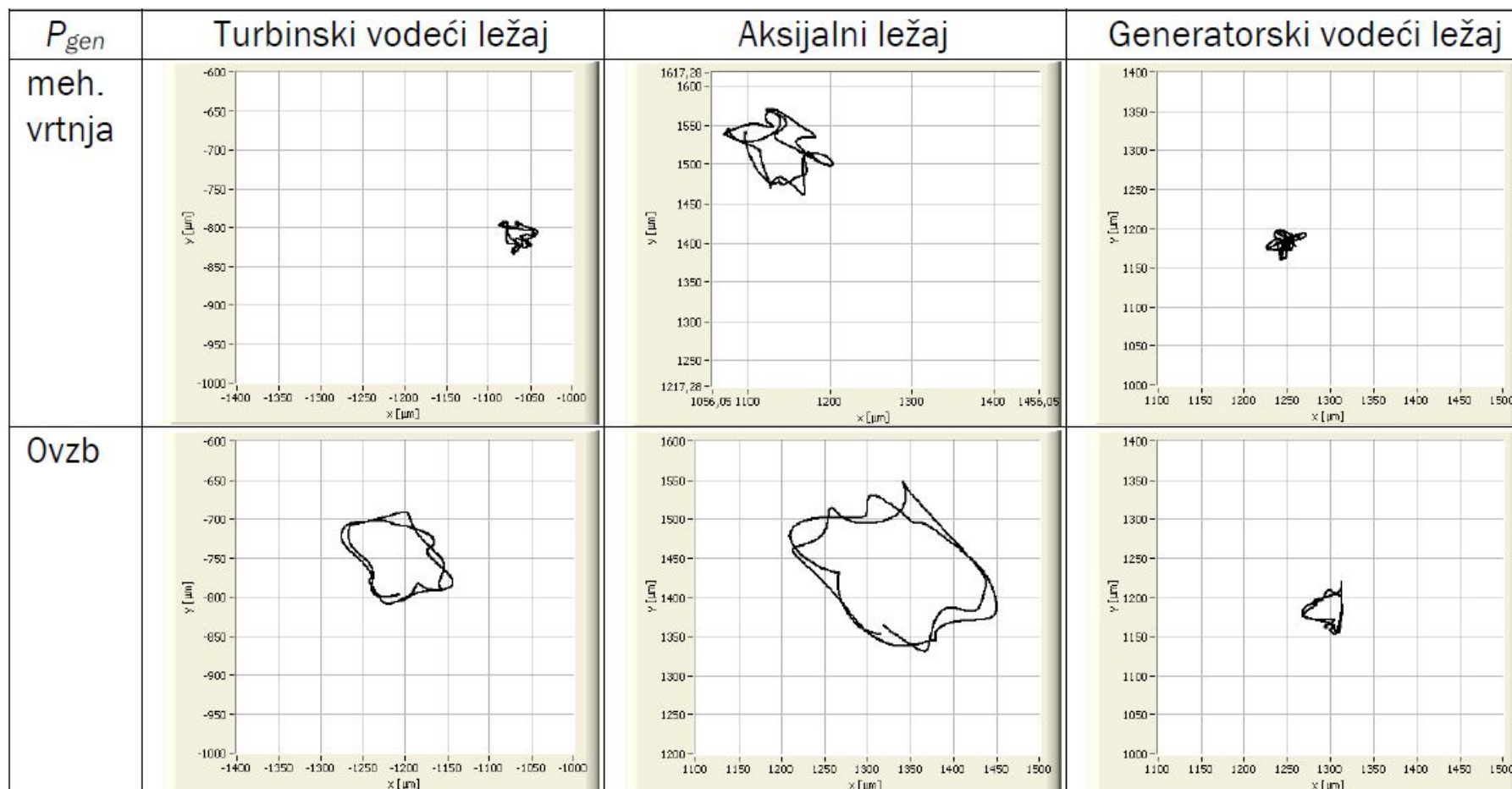


Monitoring vibracija agregata

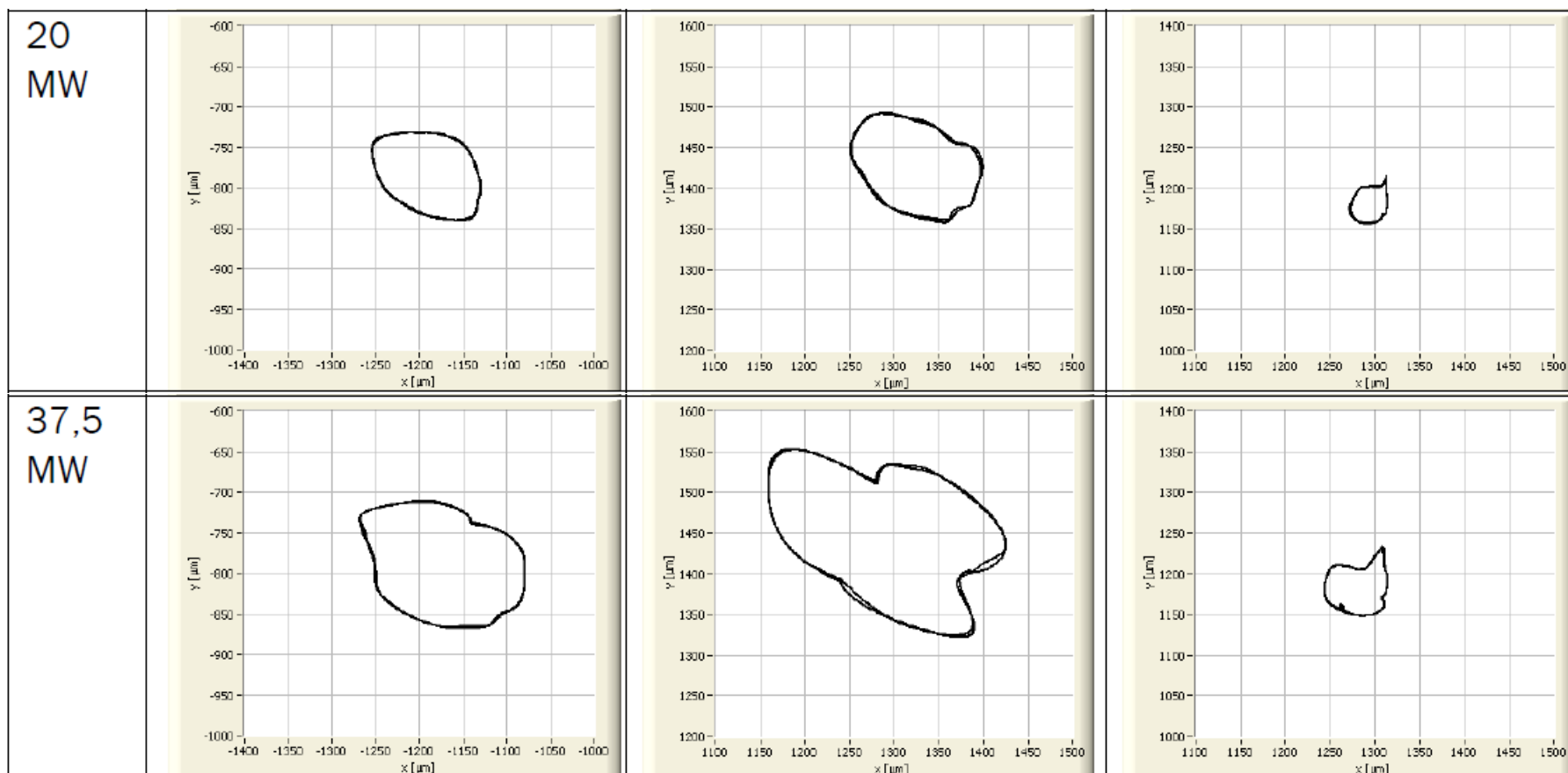
- orbit dijagram i najveće opletanje S_{max}



Opletanja vratila na ležajevima



Opletanja vratila na ležajevima





HVALA NA PAŽNJI!

Fakultet elektrotehnike i računarstva - Zavod za visoki napon i energetiku

Unska 3, HR-10000 Zagreb Tel: 01/ 6129 907, Fax: 01/ 6129 890 E-mail: zvne@fer.hr URL: <http://www.zvne.fer.hr/>