Optimizacija procesa: Pogoni sa pumpom

Organizacija predavanja

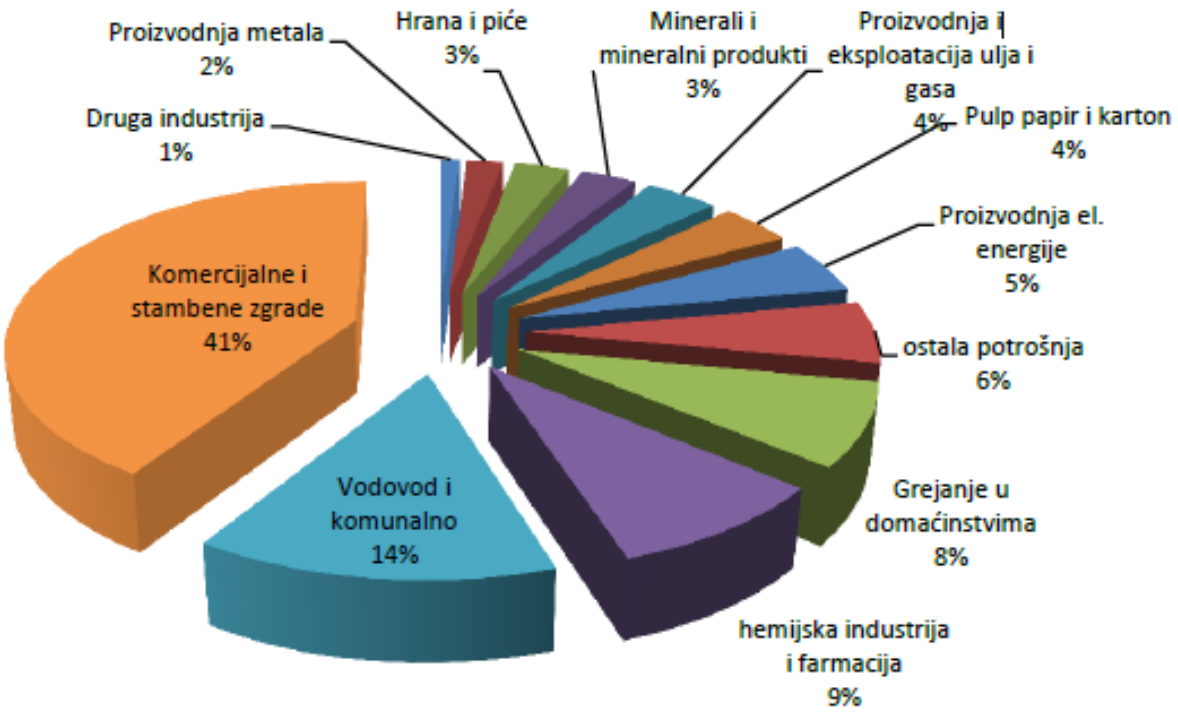
- I deo: tipovi pumpi, hidrauličke karakteristike pumpnog sistema, podešavanje performansi pumpnog sistema, kontrola protoka i pritiska pumpe promenom brzine radnog kola pumpe
- II deo: Pregled pogona pumpnih sistema sa promenljivom brzinom: primena frekventnih pretvarača u pogonu sa pumpom, inteligentni pumpni sistemi, energetska efikasnost, upotreba pumpe kao turbine (PAT)

Uvod – pumpni sistemi

- Fluidi se kroz pogon mogu transportovati prirodnim putem (na primer, slobodnim padom) ili prinudnim (pomoću pumpi).
- Transport tečnih fluida ostvaruje se pumpama. Najveći broj pumpi koristi se za transport vode i to u sledećim oblastima [1]:

• komercijalni i industrijski objekti
• sistemi vodosnabdevanja pijaćom vodom
• hemijska industrija i farmacija

• Oko 65% električne energije koju troše elektromotori koriste pogoni pumpi, ventilatora i kompresora – vrlo je važno obratititi pažnju na energetsku efikasnost [2]!



Podela pumpnih sistema prema potrošnji po sektorima [1]

Mogućnosti uštede, preporuke i ciljevi

https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign/energy-efficient-products/water-pumps_en

Prema studiji rađenoj za Evropsku komisiju (EC) [3]:

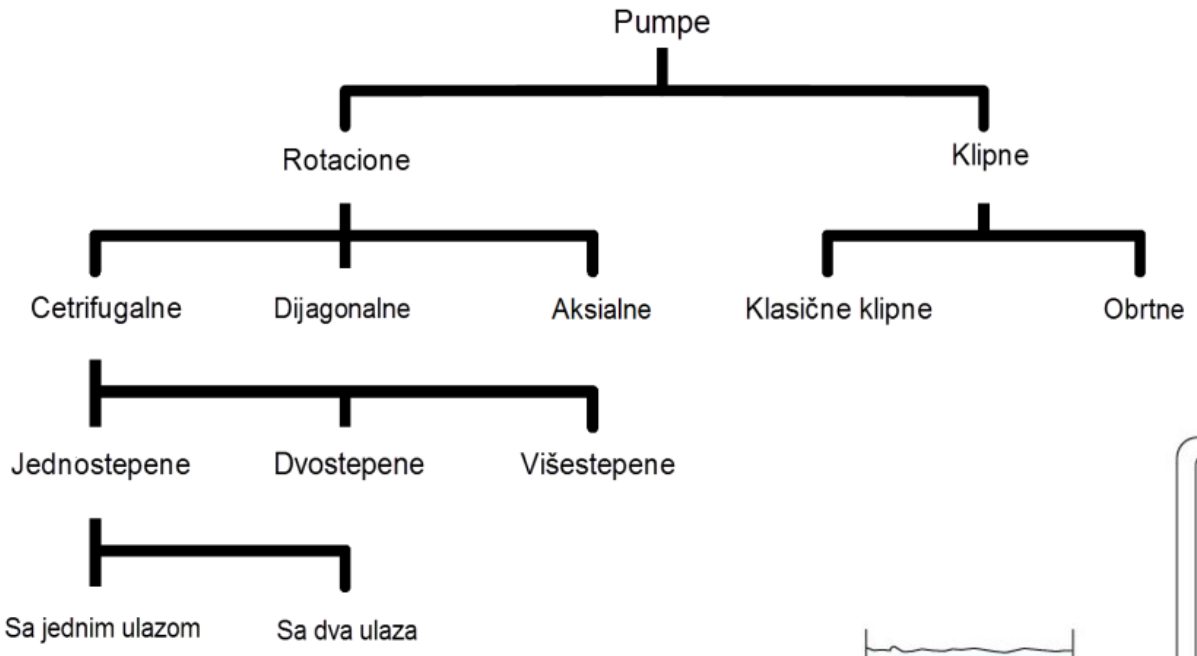
- **Uklanjanje najneefikasnijih pumpi**
- **Izbor pumpi visoke klase energetske efikasnosti za nove pogone**
- Prilikom klasifikacije performansi pumpi, važno je uzeti u obzir da kod većine praktičnih aplikacija, **pumpe provode mnogo radnog vremena van željene radne tačke** (loš stepen efikasnosti).
- Uvedena je **nova metodologija definisanja nivoa efikasnosti za različite tipove pumpi**, (bazirana na 3D ravni), prilagođena proizvođačima pumpi (primenljiva kod najaktuelnijih proizvoda). Pumpa pre svega mora da bude korektno dimenzionisana za sistem u kome se primenjuje, a zatim se vodi računa o njenoj energetskoj efikasnosti.
- **Obeležavanje delimično efikasnih pumpi,** prednosti :
  - definisanje visokih vrednosti efikasnosti bi postao cilj proizvođača pri dizajniranju novih pumpi, što bi dalje vodilo uštedi u potrošnji električne energije.
  - to bi vodilo definisanju standarda performansi visoke efikasnosti (HEPs – High Efficiency Preformance standard) za programe koji žele da promovišu pumpe visokog korisnog dejstva.
  - HEPs je koristan jer bi uticao na dalji razvoj efikasnosti pumpi i pumpnih sistema uopšteno.
- **Preporuka da se HEP standard definiše za pumpe koje se nalaze na tržištu među prvih 20% u pogledu efikasnosti**.

Podela pumpnih sistema na podgrupe [1]

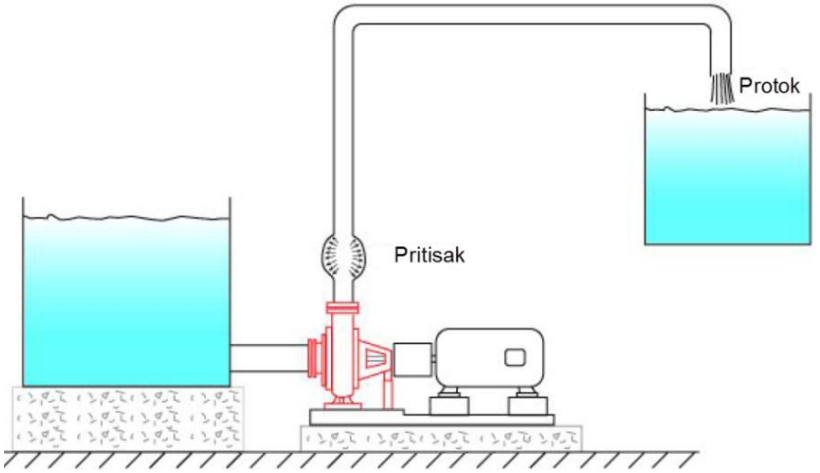
- **U pogledu propisa i standarda u EU**, pumpni sistemi razdvojeni u dve podgrupe:
  - cirkulacione pumpe za zgrade i
  - motorne pumpne sisteme.
- Cirkulacione pumpe za zgrade se koriste za cirkulaciju grejnog ili rashladnog fluida u zatvorenom sistemu zgrade. Postoje dva tipa:
  - samostalne cirkulacione pumpe (koje su odvojene od kotla ili rashladnog sistema)
  - i integrisane pumpe, koje su projektovane da rade zajedno sa kotlom i njegov su sastavni deo.
- Cirkulacione pumpe učestvuju značajno u potrošnji električne energije u grejnim sistemima zgrada, pošto većina ovih pumpi radi i kada grejanje nije neophodno. Definišu se posebni propisi o indeksima energetske efikasnosti za cirkulacione pumpe.

Tipovi pumpi [1]

- **Prema načinu funkcionisanja radnog kola pumpe** izvršena je glavna podela na rotacione („rotodynamic“) i zapreminske, ili klipne („positive displacement“) pumpe.

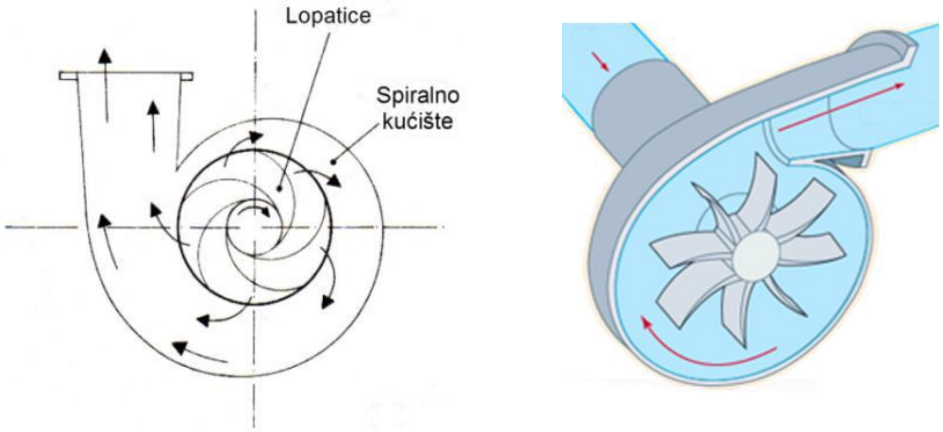


Podela pumpi prema tipovima [1]



Primer industrijskog pumpnog sistema [1]

Rotacione pumpe [1]



Poprečni presek radnog kola rotacione pumpe [1]

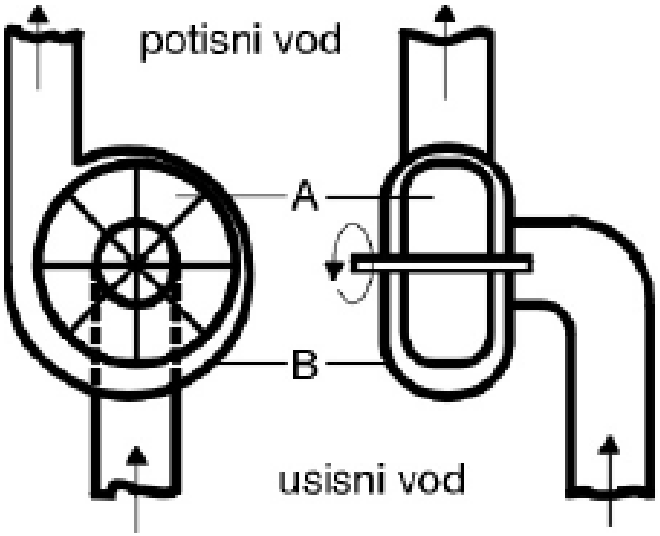
- Fluid ulazi u pumpu preko ulazne grane pod pritiskom i to obično sa nivoa koji se nalazi iznad pumpe. Gonjen lopaticama radnog kola menja pravac iz aksijalnog u radijalni. Usled centrifugalne sile povećava se pritisak u fluidu, a time i brzina. Fluid napušta radno kolo u pravcu tangente na prethodno rotaciono kretanje pod konstantnim uglom i izlazi kroz odvodnu granu sa povećanim pritiskom i obično malim povećanjem brzine.

- Na osnovu strujanja fluida kroz radno kolo, rotacione pumpe se mogu podeliti na [1]:

  - centrifugalne (imaju samo radijalnu komponentu),
  - aksijalne (imaju samo aksijalnu komponentu),
  - dijagonalne pumpe (imaju i radijalnu i aksijlnu komponentu *„mixed flow”)*.

Centrifugalne pumpe [1]

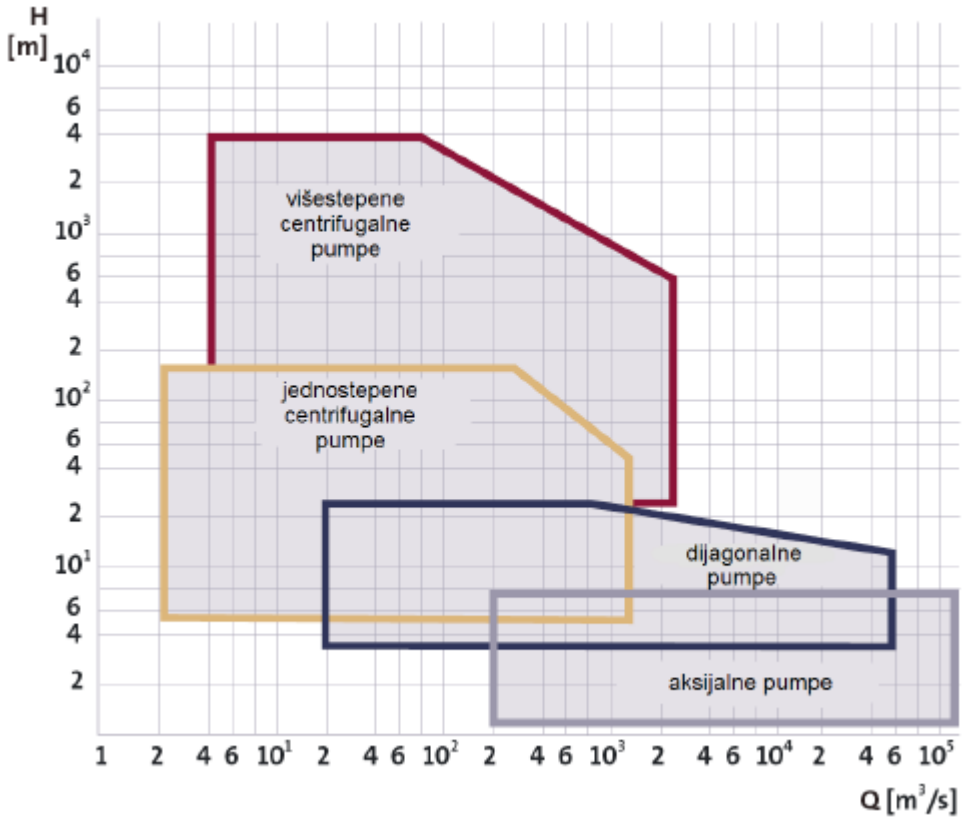
- Centrifugalne pumpe su najzastupljenije u pumpnim sistemima:
  - mogu prenositi velike zapremine fluida na relativno efikasan način,
  - pouzdane,
  - jednostavne za održavanje,
  - dostupne su u različitim veličinama.



Radno kolo centrifugalne pumpe [1]

- Centrifugalne pumpe se dele prema broju stepeni (nivoa, sekcija) radnog kola na:
  - jednostepene
  - dvostepene
  - višestepene.

Centrifugalne pumpe [1]

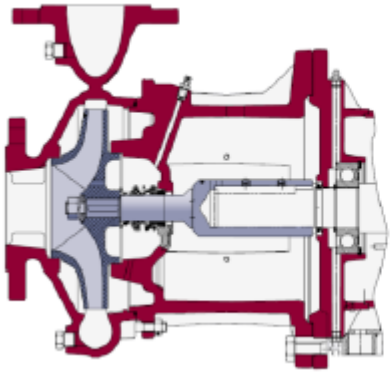


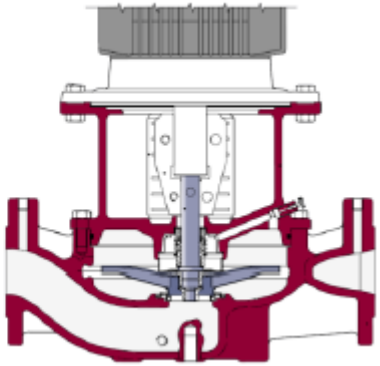
Oblasti pokrivanja HQ ravni kod nekih tipova pumpi [1]

- Jednostepene centrifugalne pumpe se koriste u aplikacijama sa H ≤ 200m; projektuju se i za vertikalan i za horizontalan rad.

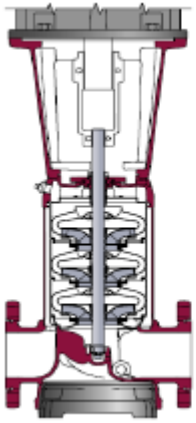
- Višestepene centrifugalne pumpe se koriste u aplikacijama sa velikim H; projektuju se i za vertikalan i za horizontalan rad.

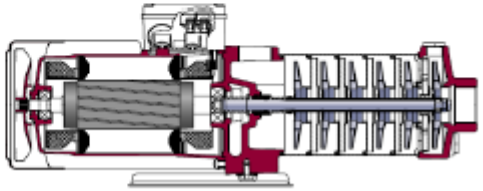
Centrifugalne pumpe [1]





Jednostepene centrifugalne pupme za vertikalnu i horizontalnu instalaciju [1]





Višestepene centrifugalne pupme za horizontalnu i vertikalnu instalaciju [1]

Podela centrifugalnih pumpi prema načinu protoka fluida kroz pumpu, odnosno prema položaju dovodne i odvodne cevi:

1. „*End suction*” pumpe (krajnja usisna pumpa) - fluid ulazi direktno u radno kolo. Ulazna i izlazna cev montiraju se pod uglom od 90°, tako da fluid prolazeći kroz pumpu menja pravac.
2. „*In-line*” pumpe (linijske pumpe) - fluid kroz pumpu prolazi u jednom pravcu. Ulazna i izlazna cev postavljaju se jedna naspram druge u istom pravcu te se kao takve mogu montirati direktno na pravolinijski sistem.

Klipne pumpe [1]

- Klipne pumpe su složenije i mada imaju bolji stepen iskorišćenja u odnosu na rotacione, nisu konkurentene rotacionim zbog visoke cene.

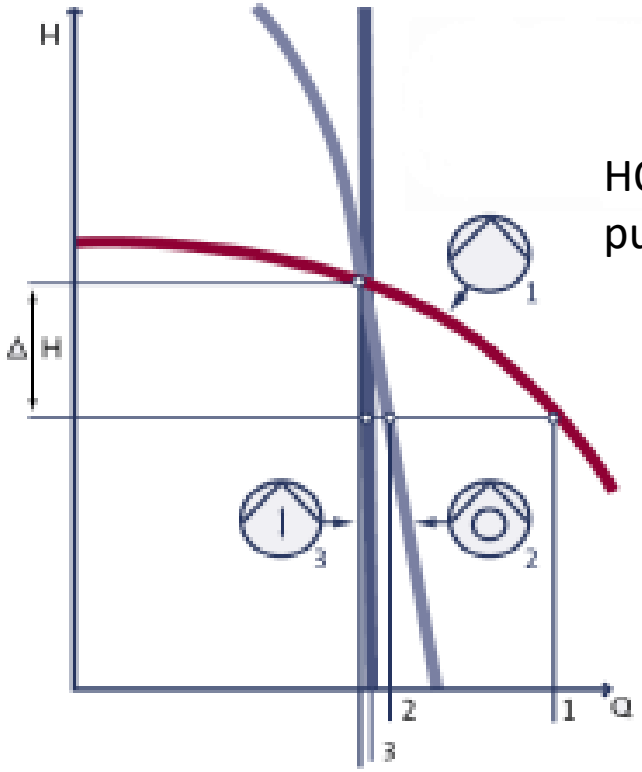
– U slučaju klipnih pumpi, tečnost dobija energiju od krutog tela (klipa) koje ima pravolinijsko povratno kretanje u jednom zatvorenom prostoru (cilindru).

– Dele se na [1]:

- obrtno-klipne pumpe (pulsacione - njihov protok u okviru jednog ciklusa nije konstantan. Varijacije protoka i brzine uzrokuju varijacije pritiska usled otpora trenja u sistemu (zidovi cevovoda, ventili itd.) [4].
- klasične klipne pumpe (pumpe sa naizmeničnim pravolinijskim kretanjem klipa – klipno kretanje). Obezbeđuju približno konstantan protok sa konstantnom brzinom bez obzira na promene pritiska.

Hidrauličke karakteristike pumpnog sistema [1]

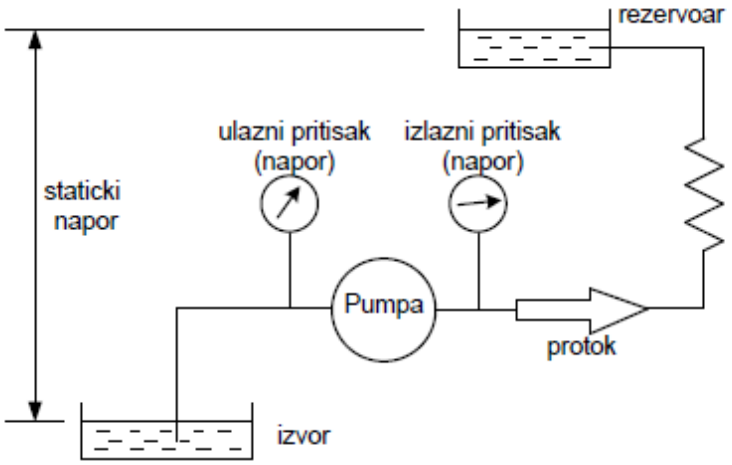
- **Napor (pritisak, visina dizanja) predstavlja izvršen rad na jedinici zapremine fluida u radnom kolu pumpe. Napor je mera razlike pritisaka između usisne i odvodne cevi i predstavlja se u metrima.**
- Karakteristike i performanse pumpe se najbolje mogu iskazati grafički preko H-Q karakteristika odnosno zavisnost napora H u funkciji protoka Q pumpe pri konstantnoj brzini radnog kola.



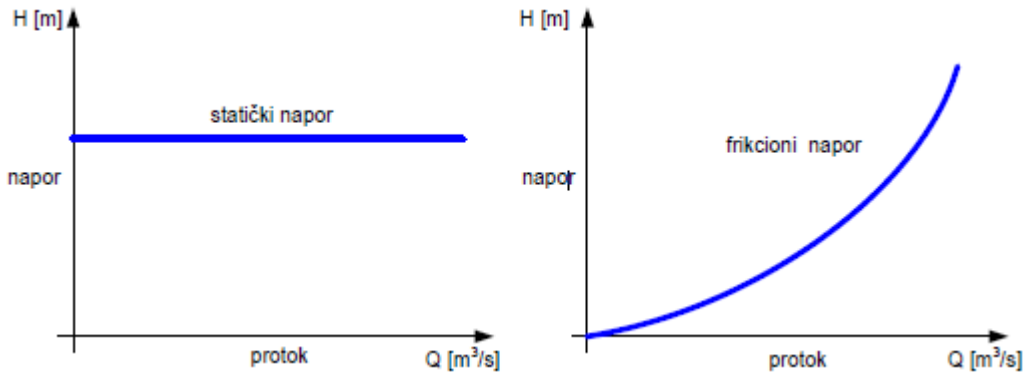
HQ karakteristike za centrifugalne (1) i klipne pumpe: obrtne (2) i klasične klipne (3).

Hidrauličke karakteristike pumpnog sistema [1]

- Da bi se odredila radna tačka na H-Q karakteristici u kojoj se nalazi pumpa potrebno je poznavati i karakteristiku radnog sistema na koji je pumpa priključena.
- Glavna karakteristika pumpe je predavanje energije fluidu, odnosno stvaranje napora koji će omogućiti transfer fluida kroz sistem. Taj napor mora imati vrednost koja će savladati gubitke u sistemu.
-U sistemu figurišu dva tipa gubitaka: statički i frikcioni napor (gubici usled trenja).



Ilustracija otvorenog pumpnog sistema

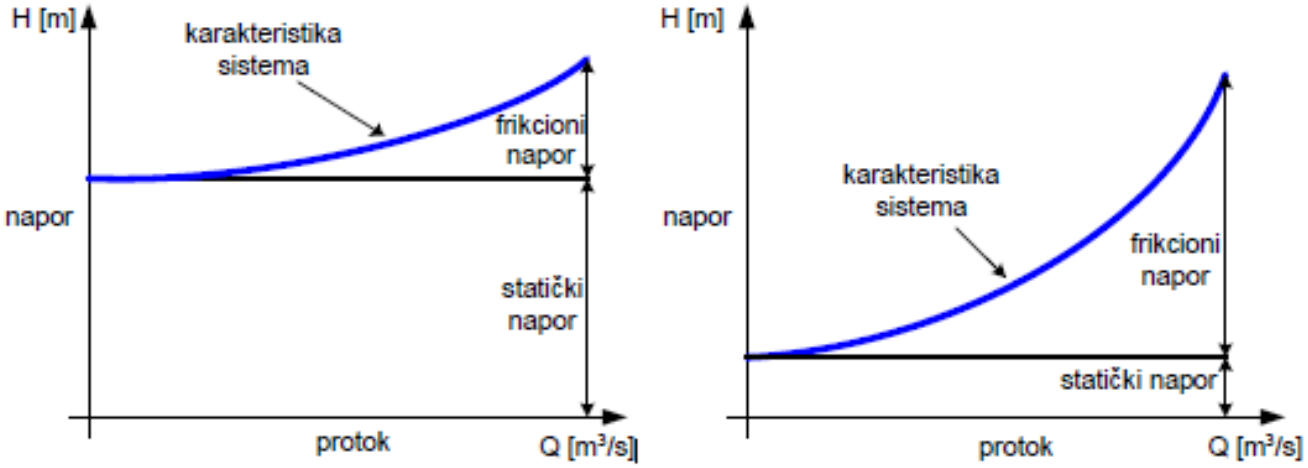


HQ karakteristike statičkih i frikcionih karakteristika pumpnog sistema.

Napor pumpe = (izlazni napor – ulazni napor) = (statički napor + frikcioni napor)

Hidrauličke karakteristike pumpnog sistema [1]

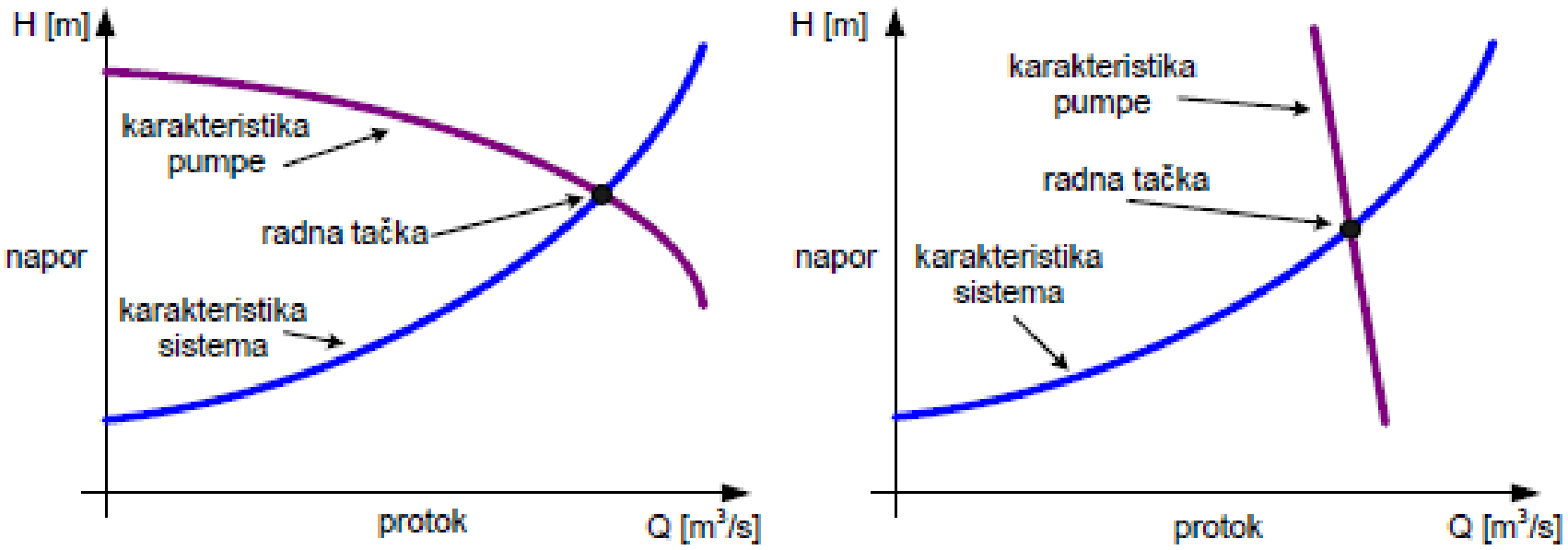
- Frikcioni (dinamički) su gubici koji se javljaju usled trenja između zidova cevi, ventila i fluida pri njegovom proticanju kroz sistem. Ovi gubici rastu sa kvadratom protoka.
- U zatvorenom kružnom pumpnom sistemu, bez otvorene površine na koji deluje atmosferski pritisak, postoje samo frikcioni gubici.
- U većini sistema postoji kombinacija statičkih i frikcionih gubitaka. Odnos statičkih i frikcionih gubitaka (napora) u sistemu definiše mogućnosti uštede energije u pogonima sa promenljivom brzinom.



Različiti odnosi statičkih i frikcioinih gubitaka u pumpnim sistemima

Radna tačna nalazi se u preseku *H-Q* karakteristika pumpe i ostatka pumpnog sistema.

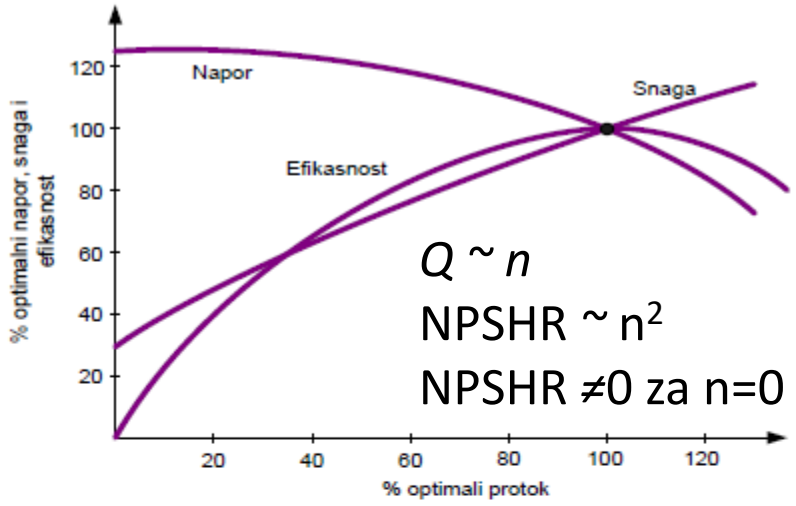
Hidrauličke karakteristike pumpnog sistema [1]

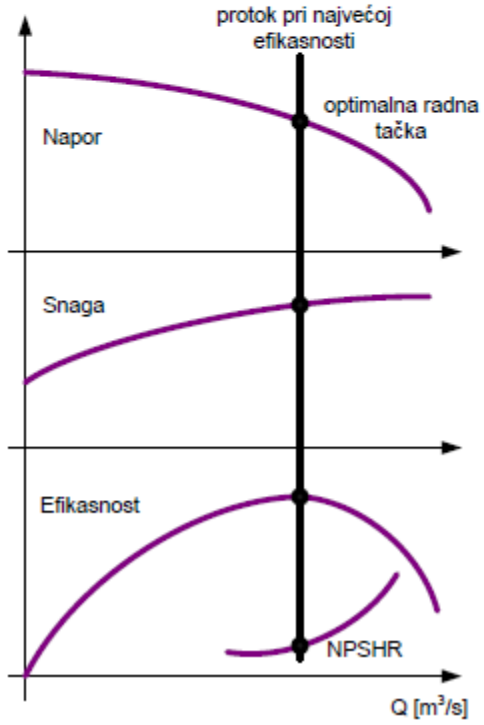


Položaj radne tačke kod sistema sa rotacionim (levo) i klipnim pumpama (desno).

- Pumpa generiše isti napor (pritisak) tečnosti bez obzira na gustinu tečnosti koja se pumpa. Unutrašnja struktura pogonskog radnog kola i kućišta su veoma važni u cilju obezbeđivanja što većeg stepena iskorišćenja pumpe.

Usisne performanse pumpe [1]





Zavisnosti karakterističnih veličina pumpe od protoka

Za ispravan rad pumpe neophodno je da bude **NPSHA>NPSHR.**

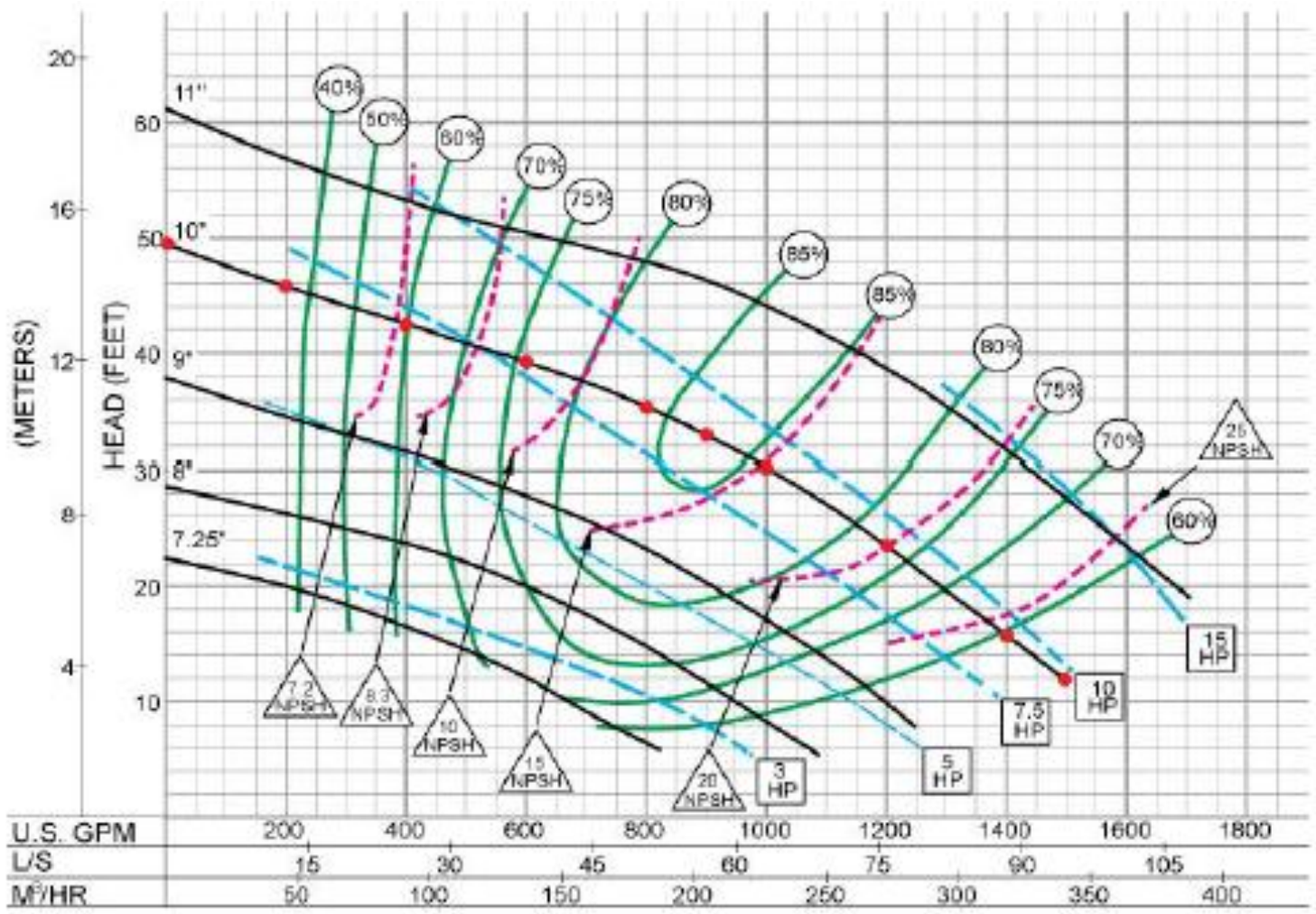
-Stepen skorišćenja η, snaga P i **potrebna kavitacijska rezerva NPSH** (Net NPSH Required – Net Positive Suction Head Required) se takođe standardno daju u zavisnosti od protoka, pored osnovne Q H karakteristike pumpe.

- Ako je ulazni pritisak tečnosti nedovoljno iznad pritiska zasićene pare tečnosti dolazi do pojave mehurova duž celog propelera radnog kola neposredno iza ulaza u pumpu. Ova pojava je poznata pod nazivom **kavitacija i ima više neželjenih efekata** .

- Vrednost pritiska za koji je pritisak tečnosti na ulaznoj grani u pumpu veći od pritiska pare te tečnosti je izražen preko visine i poznat je kao **raspoloživa kavitacijska rezerva NPSHA** (Net Positive Suction Head Available).

-Vrednost NPSH potrebne za izbegavanje pojave kavitacije poznata je kao potrebna kavitacijska rezerva NPSHR (Net Positive Suction Head Required).

Podešavanje performansi pumpnog sistema – izbor optimalne pumpe za datu primenu



Familije karakteristika pri promeni brzine i pri promeni prečnika radnog kola [5].

Podešavanje performansi pumpnog sistema

- Najzastupljenije metode prilagođavanja su:
  - start – stop kontrola
  - prigušnim ventilom
  - bajpasom
  - promenom prečnika radnog kola
  - pumpe u paralelnom radu
  - pumpe u rednom radu
  - promenom brzine

Start – stop kontrola

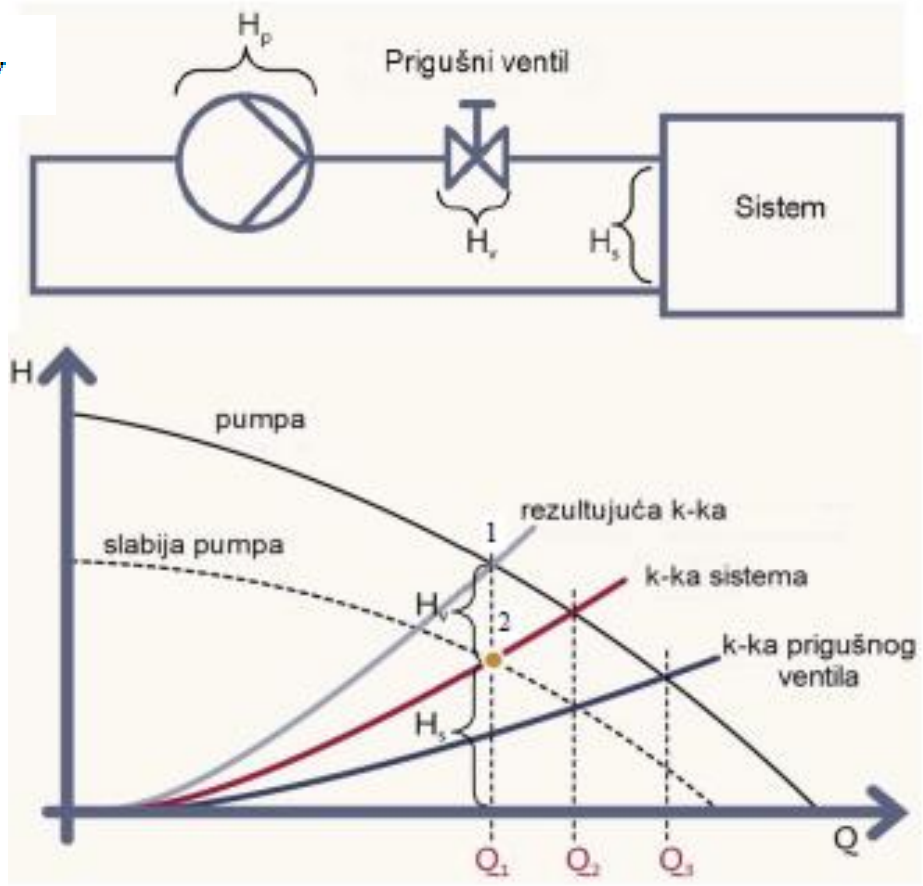
- Upotrebom kontrole start – stop**, protok se kontroliše jednostavnim uključivanjem i isključivanjem pumpe**.
- **Da bi bila izvodljiva mora postojati rezervoar za skladištenje u sistemu**.
- Rezervoar omogućava kontinualan tok u sistemu dok je rad pumpe intermitentan. **Za vreme rada pumpe**, dok se puni rezervoar, pumpa je izabrana tako da **radi u svom optimalnom režimu**, **a kada se isključi ne postoji potrošnja električne energije**. Ako je ovakav rad sistema dozvoljen, prvenstveno se misili na intermitiran rad pumpi i start – stop kontrolu, ovaj način predstavlja jedno jednostavno i efikasno rešenje.
- Može se iskoristi i vreme kada je jeftina tarifa električne energije i vršiti punjenje rezervoara. Na smanjenje troškova može se uticati izborom pumpe koja ima manji protok, ako dozvoljava konkretna situacija. Korišćenjem pumpe sa manjim protokom umanjuju se gubici usled trenja kroz cevovode i smanjena je potrošnja same pumpe.
- **Loša strana ove kontrole, je povećano zagrevanje motora i potreba za motorom koji je sposoban za intermitirani pogon. Uključivanje i isključvanje izaziva hidrauličke udare u cevovodu** i utiče na povećanje troškova održavanja.

Prigušni ventil [1]

- Prigušni ventil se postavlja na red sa pumpom. Pumpa radi kontinualno, a prigušni ventil se po potrebi otvara i zatvara. Na taj način se ostvaruje smanjenje protoka, dodavajući dodatni otpor i pomerajući radnu tačku na levo.

$$H_P = H_S + H_V$$

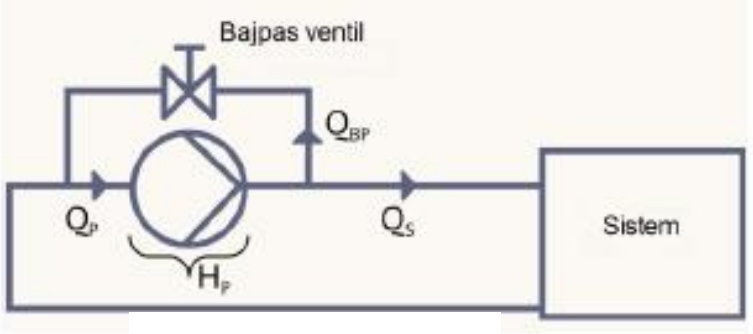
- Ako se pumpa i ventil zamene manjom pumpom, pumpa će biti u stanju da obezbedi potreban protok Q_1, ali nižu visinu dizanja i naravno manju potrošnju električne energije.



Podešavanje karakteristike sistema prigušnim ventilom

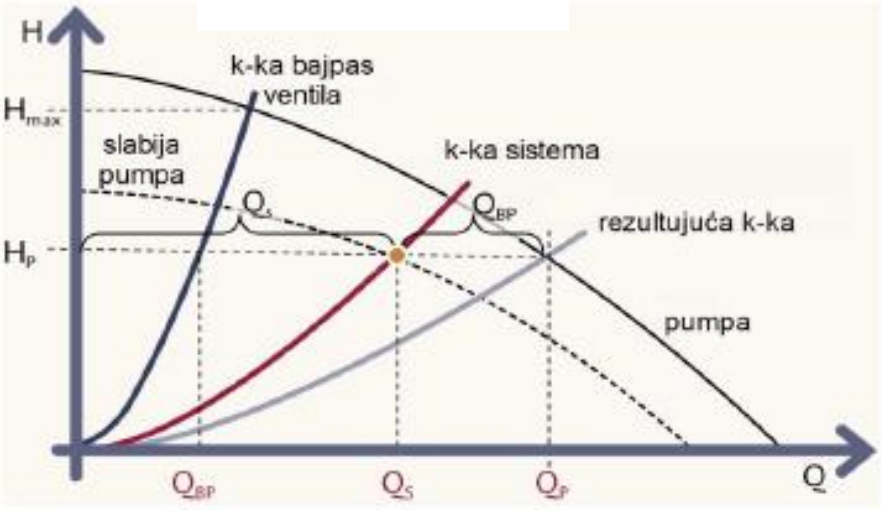
Bajpas kontrola [1]

-Kada se postavi ventil paralelno pumpi, ostvaruje se bajpas kontrola. U ovom režimu rada pumpa radi punim kapacitetom**. Kada je potrebno ostvariti manji protok, otvaranjem bajpas ventila deo tečnosti se vraća izvoru**. Često se koriste male bajpas linije čija je **namena da zaštite pumpu od rada na suvo**.



$$Q_P = Q_S + Q_{BP}$$

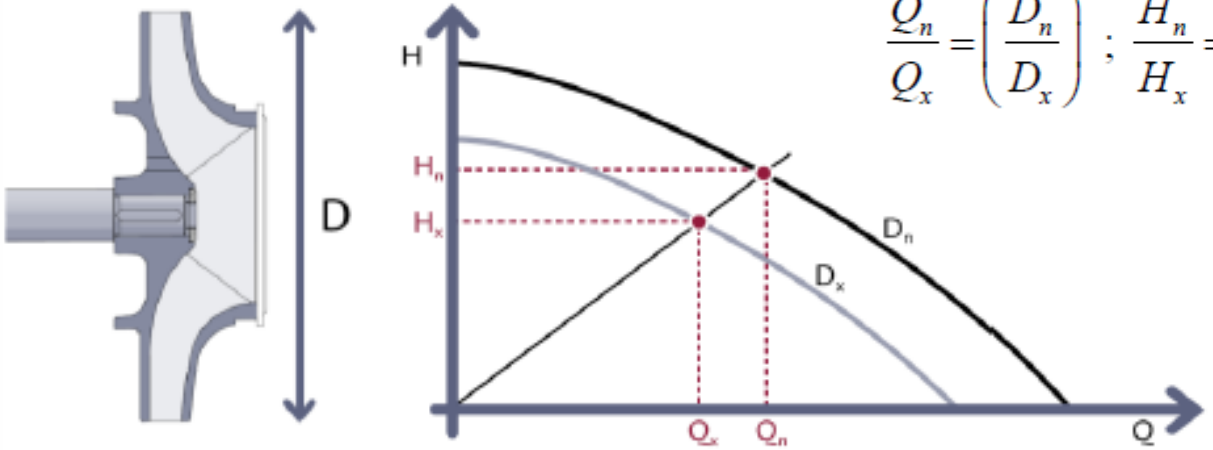
- Bajpas ventil će uvesti ograničenje maksimalne visine dizanja sistema H_{max}. Kada se zahteva da protok u sistemu bude jednak nuli, pumpa neće raditi i ventil će biti zatvoren, kao što je to slučaj sa prigušnim ventilom. Takodje, zahtevani protok Qs se može ostvariti manjom pumpom bez bajpas ventila, a kao rezultat toga će biti manji protok i manja potrošnja električne energije.



Podešavanje karakteristike sistema bajpas ventilom

Promena prečnika radnog kola [1]

- Promenom prečnika radnog kola unutar pumpe dolazi i do smanjenja performansi sistema.



$$\frac{Q_n}{Q_x}=\left(\frac{D_n}{D_x}\right)^2;\ \frac{H_n}{H_x}=\left(\frac{D_n}{D_x}\right)^2;\ \frac{P_n}{P_x}=\left(\frac{D_n}{D_x}\right)^4;\ \frac{\eta_n}{\eta_x}=1;$$

Prilagođavanje karakteristike smanjenjem prečnika radnog kola

Smanjivanje prečnika radnog kola **se ne može vršiti dok je pumpa u funkciji**, kao što je to slučaj sa prigušnim ventilom i bajpas ventilom.

Kontrola brzine pumpe [1]

- Korišćenjem izraza za snagu P =Q·H, pri promeni protoka sa 100% na 70%, dobijeni rezultati pri različitim metodama, prikazani su u tabeli.

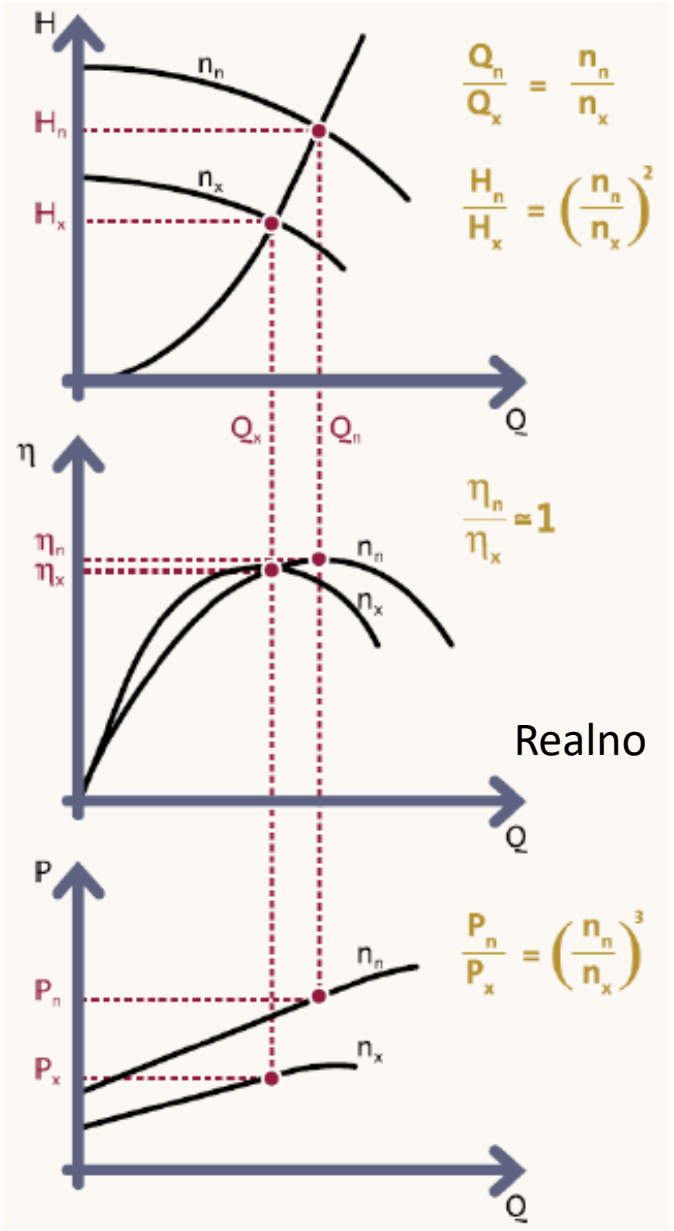
Metod	Kontinualno podešavanje	Ukupna efikasnost pumpnog sistem
Prigušnim ventilom	Da	Značajno smanjena
Bajpas ventilom	Da	Značajno smanjena
Promenom prečnika vodenog kola	Ne	Neznatno smanjena
Kontrola brzine	Da	Neznatno smanjena

Realno

$$\eta_x = 1 - (1 - \eta_n) \cdot \left(\frac{n_n}{n_x}\right)^{0.1}$$

-Zaključak: najpogodnije je koristiti metod pumpe kontrolisane promenom brzine. Jedino u slučaju gde se ne zahteva promenljiva brzina, pogodnije je koristiti metodu smanjenja prečnika radnog kola.

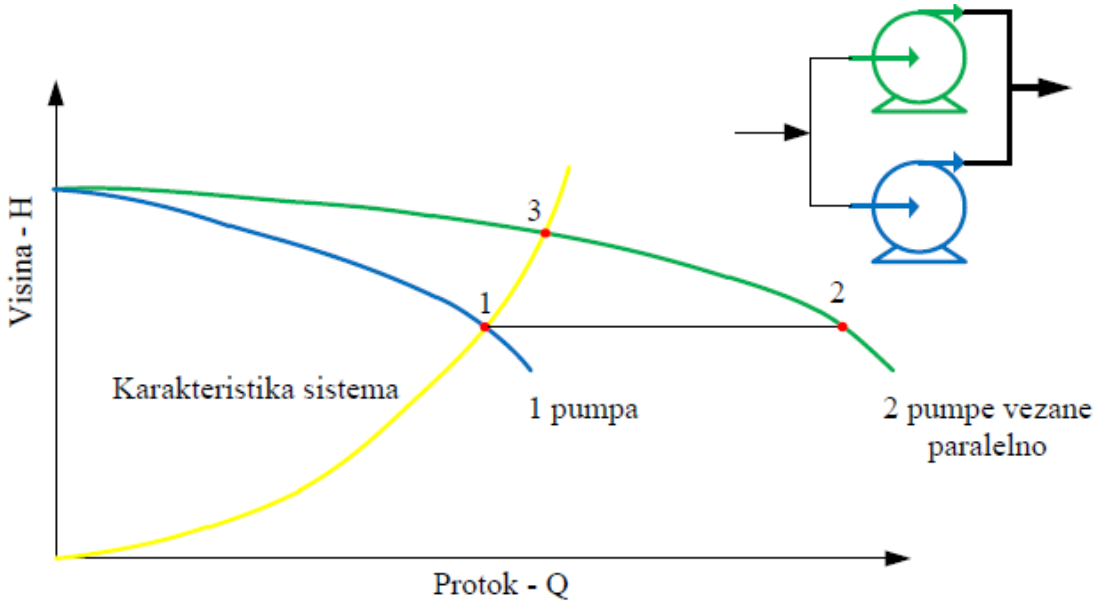
- Ako je potrebno da se poveća protok ili visina dizanja mogu se koristiti pumpe vezane paralelno ili redno.



Prilagođavanje karakteristike promenom brzine

Pumpe u paralelnom radu[1]

- Kada se dve ili više pumpi veže paralelno njihova rezultantna karakteristika predstavlja karakteristiku sa istom visinom dizanja ali sa većim protokom. Koliko puta će se protok povećati zavisi od karakteristike sistema.
- Ako je karakteristika sistema statičkog tipa tada će protok biti srazmeran broju pumpi.

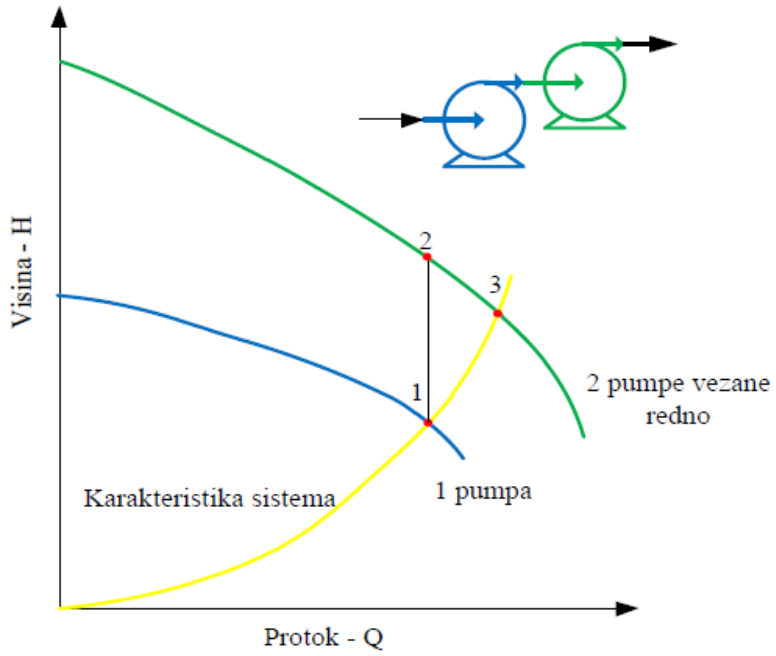


Karakteristike pumpi koje su vezane paralelno

- Moguće je vezati paralelno pumpe koje poseduju različite protoke i na taj način ostvariti širok opseg protoka koji se mogu uspostaviti.
-Postavljanjem dve pumpe u paralelu povećava se pouzdanost sistema.

Pumpe vezane na red [1]

- Kada se dve ili više pumpi vežu na red, njihova rezultantna karakteristika predstavlja karakteristiku sa istim protokom, a sa većom visinom dizanja.
- Ako je karakteristika sistema statičkog tipa tada će pritisak biti srazmeran broju pumpi.

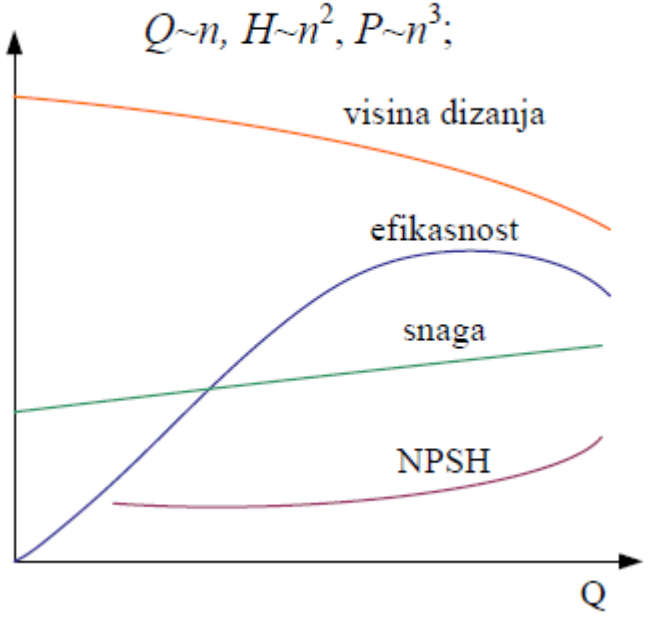


Karakteristike pumpi vezanih na red

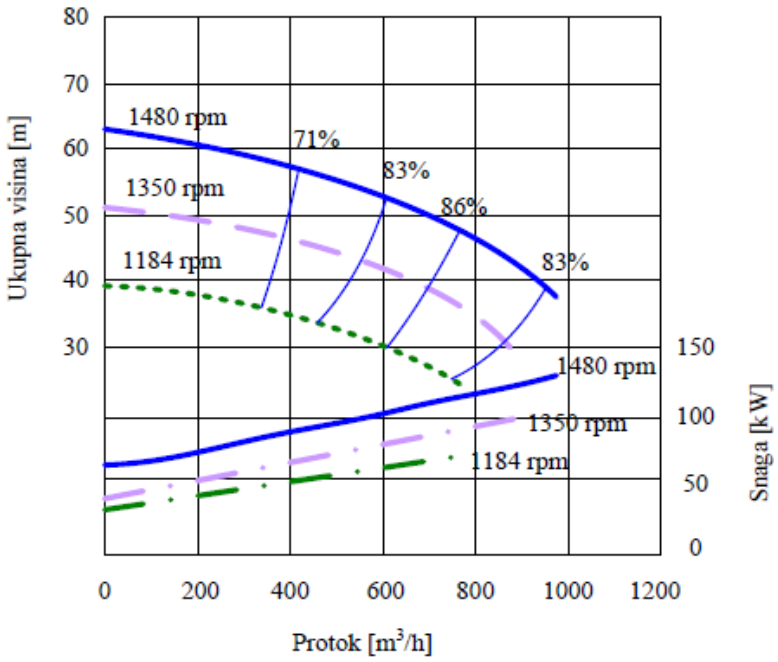
- Centrifugalne pumpe vezane na red se koriste da postignu zahtevane visine dizanja koje se ne mogu ostvariti jednom pumpom. Ređe se koristi ovo rešenje. Češće se primenjuju pumpe sa više vodenih kola na red, poznate kao višestepene pumpe, mada u poređenju sa višestepenim pumpama, pumpe vezane na red imaju veću pouzdanost i fleksibilnost.

Kontrola protoka i visine promenom brzine pumpe [1]

- Prednosti koje uvodi kontrola promenom brzine su:
  - Štednja energije,
  - Povećanje pouzdanosti,
  - Uprošćavanje cevnog sistema izbacivanjem prigušnih i bajpas ventila,
  - Mogućnost mekanog starta i zaustavljanja



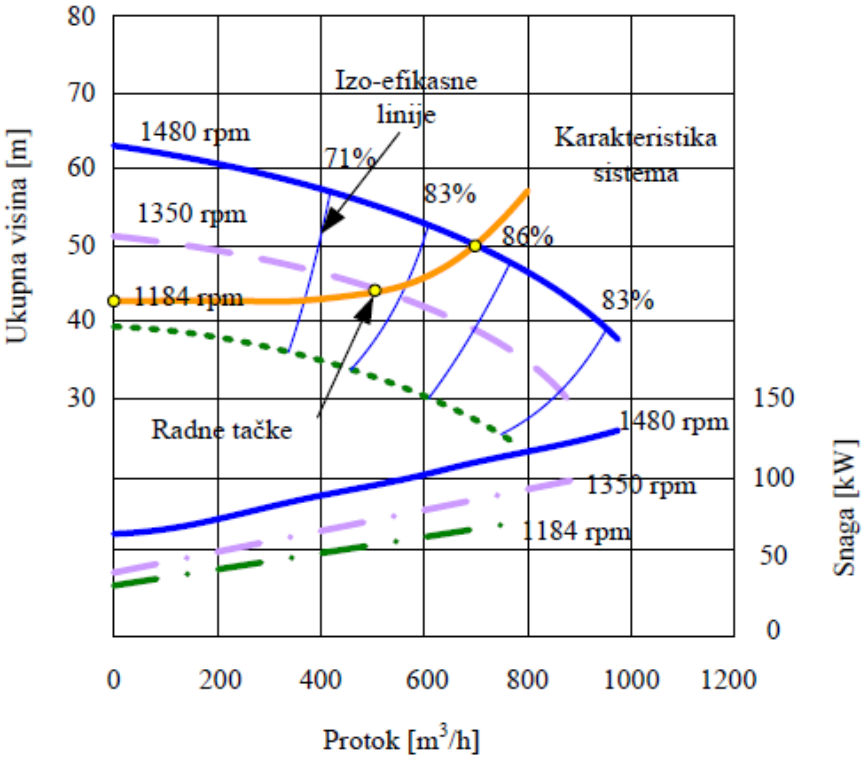
Standardne karakteristike pumpi



Promena brzine pumpe (centrifugalne)

- Tačke iste efikasnosti na karakteristikama za tri različite brzine su povezane i predstavljaju izo-efikasne linije, pokazujući da efikasnost ostaje konstantna pri malim promenama brzine.

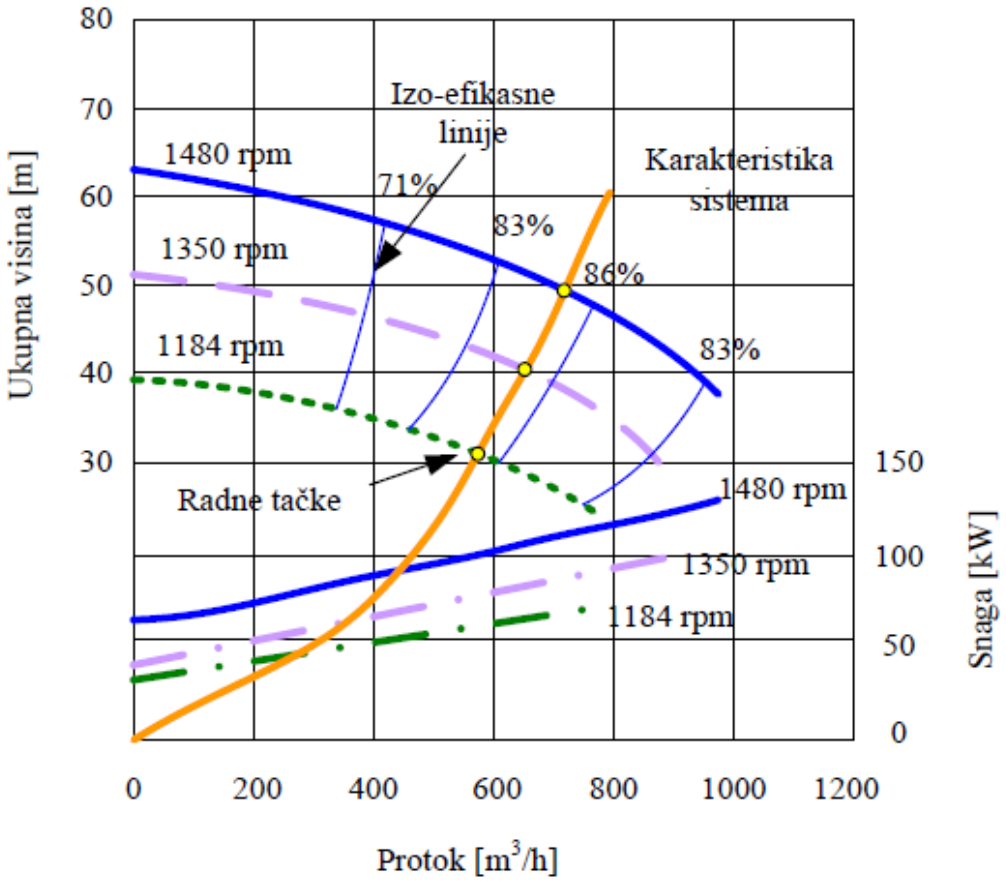
Kontrola protoka i visine promenom brzine pumpe [1]



Promena brzine u sistemima sa statičkom visinom

- Smanjenje protoka nije više proporcionalno sa brzinom. Mala promena brzine će dati velike promene protoka i efikasnosti, što može dovesti do toga da pumpa radi u oblasti u kojoj može biti oštećena ako radi duži vremenski period pri manjoj brzini. Na primer pri najmanjoj prikazanoj brzini (1184 o/min) na slici pumpa ne proizvodi dovoljnu visinu dizanja pa je protok jednak nuli kao i efikasnost, a energija se i dalje isporučuje pumpi. Pumpa se pregreva i može biti uništena.

Kontrola protoka i visine promenom brzine pumpe [1]



Promena brzine u sistemima bez statičke visine

- Na gornjoj slici je prikazano da u sistemu sa gubicima samo usled trenja radna tačka se pomera duž krive konstantne efikasnosti. Zakoni sličnosti su zadovoljeni što znači da je ostvareno smanjenje snage koje ima za posledicu smanjenje protoka i visine, pokazujući tako da su sistemi sa gubicima usled trenja idealni za metodu kontrole brzinom.

Kontrola protoka i visine promenom brzine pumpe [1]

- Smanjenje efikasnosti pumpe prilikom smanjenja brzine u sistemu sa statičkom visinom, umanjuje isplativost metode promenljive brzine. Prednosti se ipak mogu desiti ali to zavisi od slučaja do slučaja.
- Bitno je naglasiti da je kontrola protoka promenom brzine uvek efikasnija nego kontrola sa ventilima.
-Takođe, treba naglasiti da pored energetske efikasnosti postoje i druge prednosti koje uvodi metoda sa promenljivom brzinom:

- Hidraulični udar na radno kolo, prouzrokovano pritiskom unutar samog kućišta pumpe se umanjuje približno sa kvadratom brzine. Ove sile utiču na ležajeve pa tako da smanjenje brzine utiče na radni vek ležajeva. Utvrđeno je da je radni vek ležajeva inverzno proporcionalan sedmom stepenu brzine.
- Vibracije i buka su umanjene, a radni vek semeringa (zaptivača) je znatno produžen [1].

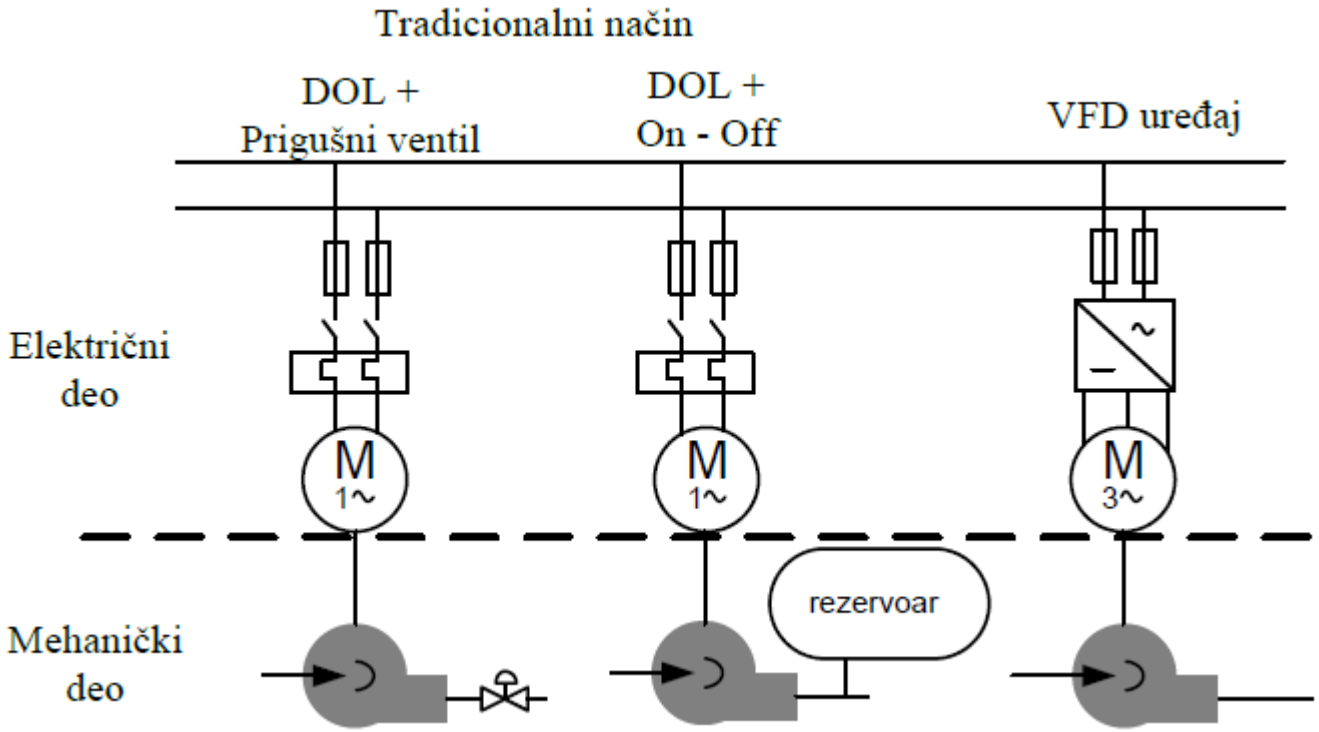
Pregled pogona pumpnih sistema sa promenljivom brzinom [1]

- Podešavanje brzine pumpe, predstavlja najefikasniji način kontrole protoka. Smanjenjem brzine smanjuje se količina energije koja se predaje fluidu, a samim tim smanjuje se i količina električne energije koju treba dovesti električnom motoru. Postoje dva glavna načina kontrole brzine pumpe:
1. višebrzinske pumpe i
2. uređaji sa promenljivom brzinom (VSD (variable speed drive) uređaji).

-Mehanički VSD uređaji obuhvataju: hidrauličke spojnice, podesive kaiševe i remenice.

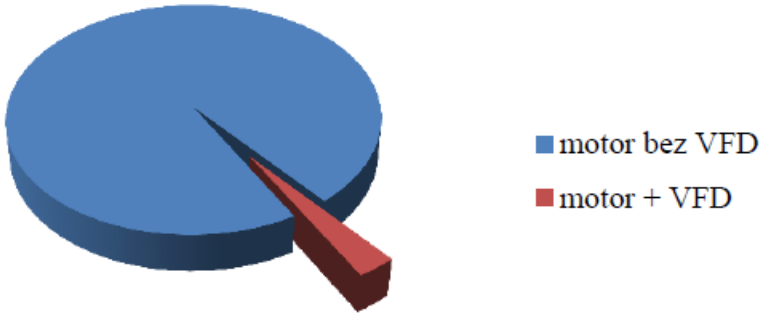
- Električni VSD uređaji obuhvataju: spojnice na principu vrtložnih struja, upuštače za motore sa namotanim rotorom i uređaje sa promenljivom frekvencijom VFD uređaje (VFD – variable frequency drives).
- VFD uređaji podešavaju frekvenciju i napon napajanja motora i na taj način menjaju brzinu motora. VFD uređaji su najpopularniji predstavnici VSD uređaja.

Pregled pogona pumpnih sistema sa promenljivom brzinom [1]



Mehanički i električni deo pumpnog sistema

Pregled pogona pumpnih sistema sa promenljivom brzinom [1]



Odnos broja prodatih motora sa i bez VFD uređaja (opseg snaga do 2,2 kW)

- Veoma je bitno naglasiti da se u svetu frekventni pretvarači uvode u 2/3 slučajeva radi povećanja energetske efikasnosti, dok u 1/3 slučajeva su razlozi upravljanje i regulacija. Što se tiče stanja u Srbiji, situacija je obrnuta.

Izgled pumpe sa integrisanim VFD uređajem (samo 3% ovakvih pumpi se proda u opsegu snaga do 2,2 kW)

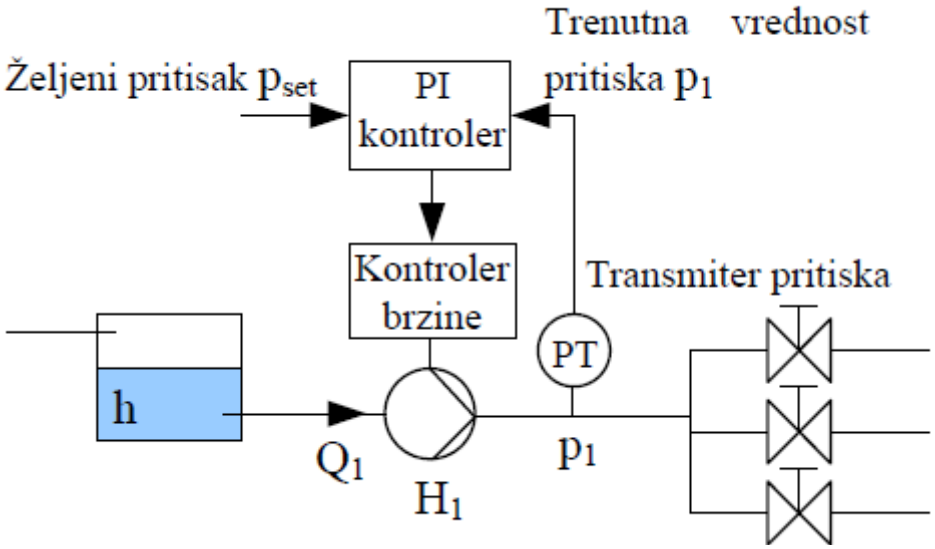
- U mnogim slučajevima primene, motori su predimenzionisani i rade kontinualno sa parcijalnim opterećenjem (sa 50% ili manje). Primenom VFD uređaja može se poboljšati energetska efikasnost smanjenjem ulaznog napona odnosno frekvencije. Upotrebom frekventnih pretvarača, moguće je izbeći predimenzionisanje motora za retke slučajeve velikog polaznog momenta, koji ostavlja motor da radi najveći deo vremena sa malom efikasnošću i malim faktorom snage.

Primena VFD-a na pumpnim aplikacijama[1]

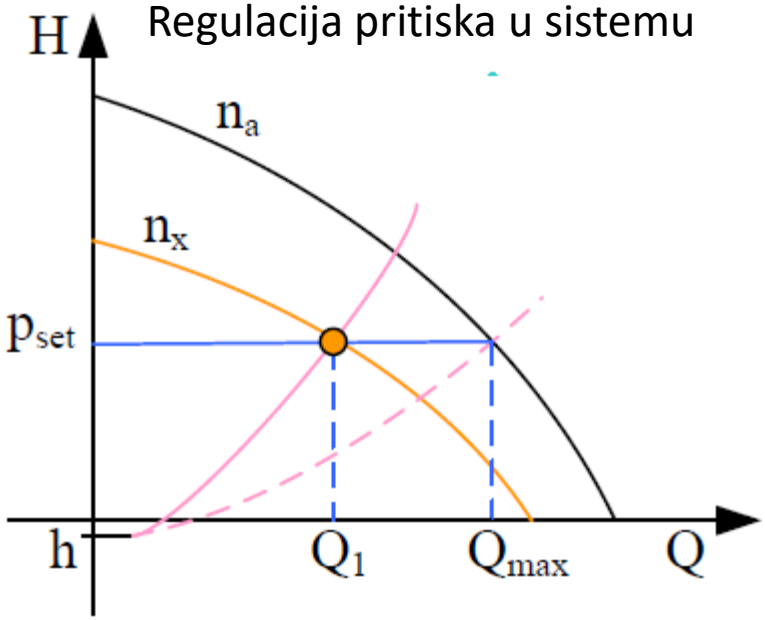
- Metod kontrolisanja pumpe promenom brzine je jedan efikasan način prilagođavanja pumpe sistemu.
- **Upotrebom VFD uređaja moguće je ostvariti upravljanje pumpama, ako se upotrebi PI regulator u kombinaciji sa odgovarajućim senzorima moguće je ostvariti upravljanje po pritisku, po protoku, temperaturi itd. Pored ovih načina upravljanja moguće je primeniti i inteligentne sisteme tako da se dobiju autonomni sistemi koji —"brinu" sami o svom stanju**.

- Projektovanje pumpnih sistema sa VFD uređajima zahteva poznavanje parametara sistema kojim se upravlja, bolje upoznavanje procesa kojim se upravlja može dovesti do optimizacije sistema.
- Parametri koji se nadgledaju u pumpnim sistemima:
    - ulazni parametri: potreban napor i pritisak, protok i varijacije protoka, zahtevani nivo tečnosti, temperatura, pH vrednost.
    - izlazni parametri: ostvareni pritisak, ostvareni protok, ostvareni nivo, ostvarena temperatura ili pH vrednost.
    - spoljašnji uticaji: promene temperature, promene u protoku, promene osobina tečnosti, pucanje ili zapušenje cevovoda, promene u potrebama za vodom.
    - VFD uređaji poseduju analogne i digitalne ulaze/izlaze kao i podršku za različite komunikacione protokole na taj način se sprežu sa pumpnim sistemom kojim se upravlja i vrši nadzor.

Upravljanje po pritisku [1]

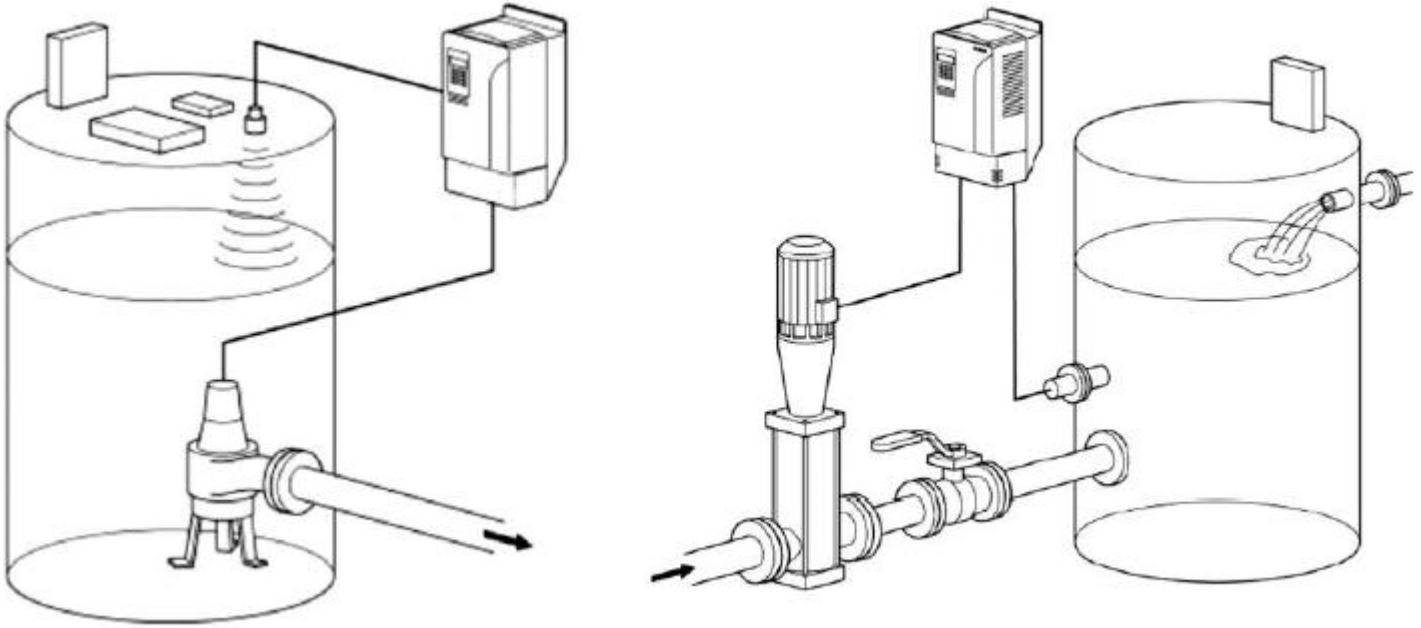


Regulacija pritiska u sistemu



- Ako je trenutni pritisak veći od podešenog, kontroler pritiska smanjuje brzinu pumpe, a sa tim i protok sa Q_{max} na Q_1. Kontroler brzine vidi da je došlo do smanjenja brzine sa n_a na n_x u cilju da se obezbedi zahtevani pritisak. Pumpna instalacija obezbeđuje da je dolazni pritisak konstantan u opsegu od 0 do Q_{max}. Dolazni pritisak je nezavisan od visine h u rezervoaru. Ako se h promeni, PI kontroler brzine podešava brzinu pumpe tako da p_1 uvek odgovara zadatoj referenci pritiska.

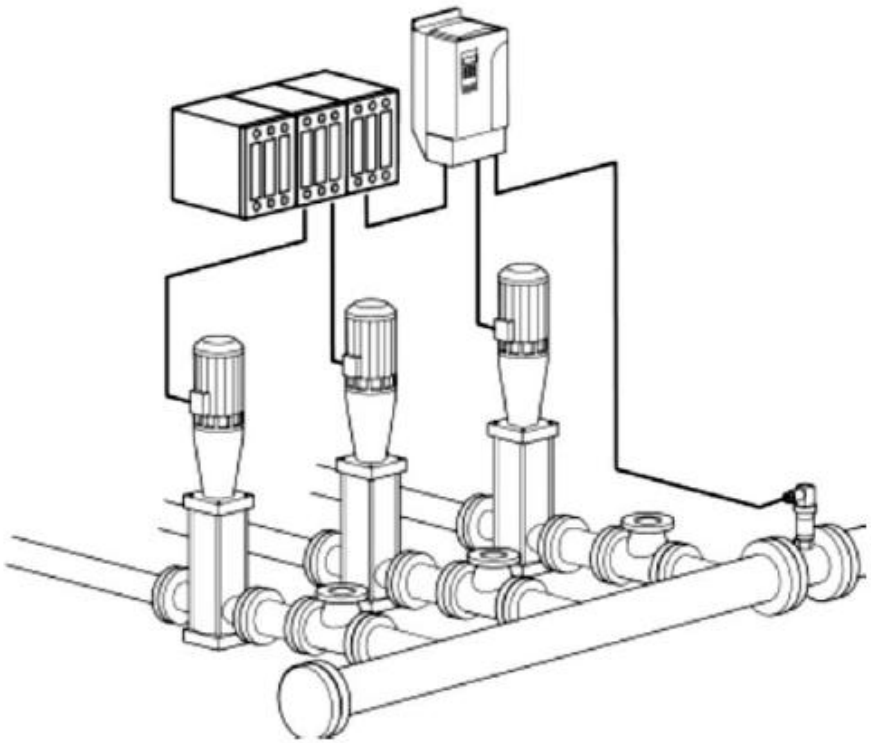
Kontrola nivoa i temperature [1]



a) Regulacija nivoa b) Regulacija temperature

- U tipičnim petljama za kontrolu nivoa, nivo u rezervoarima se kontroliše prigušnim ventilom na izlazu pumpe. Protok kroz pumpu će biti od 25% do 75%. Značajna energija će se utrošiti na savlađivanje gubitaka preko ventila. Primenom VFD uređaja u petlji, pumpa će generisati samo onoliko hidraulične energije koliko je potrebno. Ovaj način kontrole umanjuje troškove električne energije, a sa druge strane produžava životni vek pumpe i smanjuje troškove održavanja. Konačni rezultat, je sistem koji smanjuje operativne i troškove održavanja izbegavanjem korišćenja ventila. Nivo vode u rezervoaru se može kontrolisati korišćenjem PI regulatora i na taj način obezbediti kontinualan i precizan način kontrole nivoa, nebitno da li je u pitanju jedna pumpa ili je u pitanju više pumpi povezanih paralelno.

Primena VFD uređaja na paralelno vezanim pumpama [1]

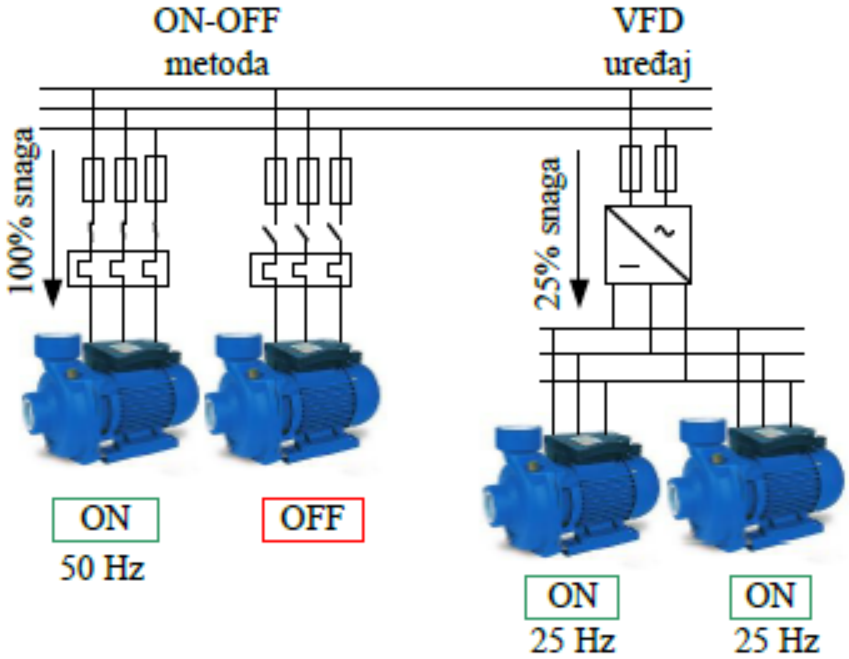


Paralelno vezane pumpe upravljane jednim VFD uređajem [6]

- Nekoliko pumpi vezanih paralelno može pogoniti jedan VFD, ili može glavnu pumpu da pokreće VFD, a ostale (pomoćne) da se uključuju prema potrebi, logikom koju zadaje frekventni pretvarač ili neka viša logika.
- Potrebno je obezbediti i redudantnost sistema. Kod paralelno povezanih pumpi, kvar na jednoj pumpi neće prouzrokovati prestanak rada celog sistema već će sistem nastaviti sa radom, ali sa smanjenim kapacitetom. U cilju zamene jedinice u kvaru, paralelni sistem je neophodan.

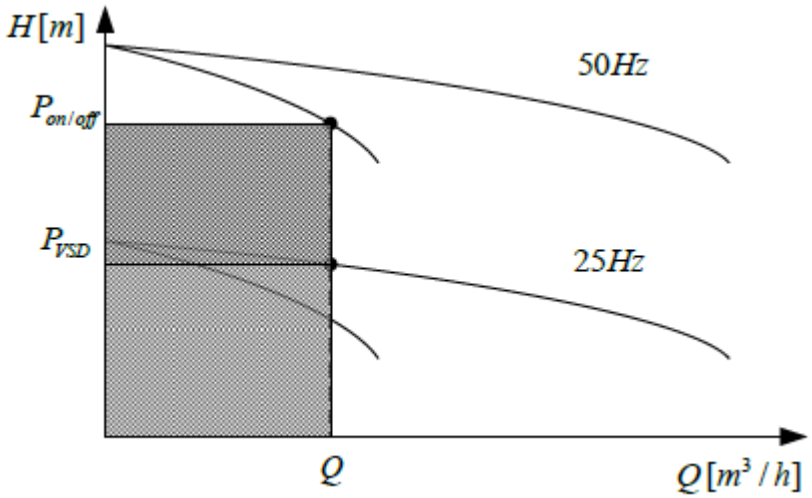
- Najbolja varijanta je kad se svaka od paralelnih pumpi pogoni sopstvenim VFD uređajem. Pojedini proizvođači VFD uređaja imaju specijalne ugrađene funkcije za pumpne sistema tako da nije potrebno sistem voditi nekom višom logikom (npr. PLC) već VFD uređaji međusobno komuniciraju i na taj način razmenjuju podatke o radu pumpi, vremenu rada, vrednosti povratne sprege.

Primena VFD uređaja na paralelno vezanim pumpama [1]



Načini upravljanja pumpama
a) on – off način b) VFD kontrola

- Prikazan je slučaj kada se koristi ON/OFF metoda i kada se koristi VFD uređaj na dve pumpe. Može se videti da u prvom slučaju ne postoji veliki izbor stanja. Dve pumpe se mogu naći u četiri stanja, da su obe isključene, jedna ili druga uključena ili obe uključene i može se primeniti samo start-stop metoda. Dok nasuprot ovoj metodi, upotrebom VFD bilo na jednoj ili na obe pumpe može da se ostvari širok opseg brzina, a samim tim i protoka. Može se postići fino prilagođavanje pumpe potrebama sistema.

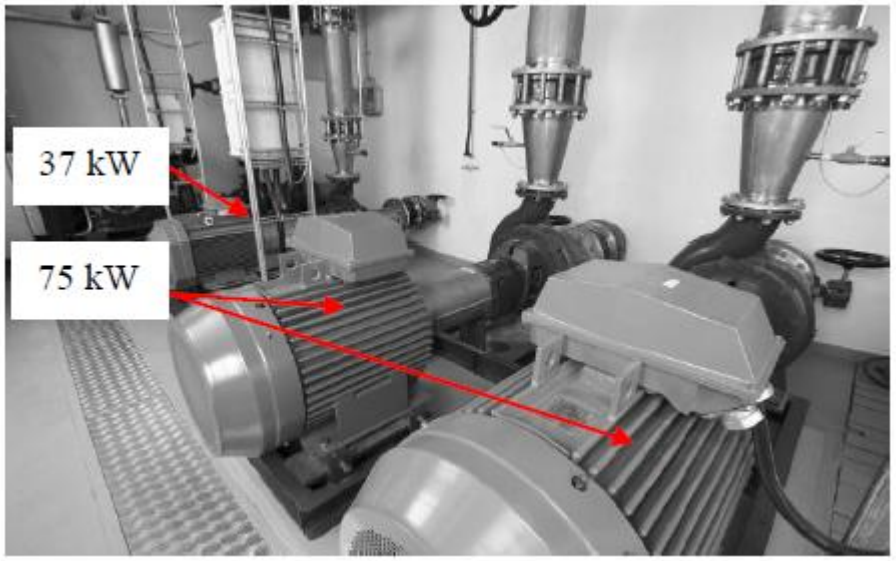


Ušteda primenom VFD uređaja

Primena VFD uređaja na paralelno vezanim pumpama [1]

- **Regulisanje broja obrtaja u mnogim slučajevima može da smanji broj startovanja. Svaki neregulisani start elektromotora zahteva dodatnu energiju za pokretanje motora i ponovna ubrzanja opterećenja. Kod pumpi potrošnja energije za start iznosi 5-10 % ukupne potrošnje energije, ali postoje primeri gde je za start potrebno i do 40% energije.** Uz to se smanjuju vrhovi struje i mehanička opterećenja uzrokovana udarima pri startu. Regulacija broja obrtaja donosi i druge prednosti, zahvaljujući smanjenju mehaničkog opterećenja uređaja i delova uređaja, kao i integrisanim softverskim funkcijama, koje moderni frekventni pretvarači stavljaju na raspolaganje.

PRIMER:



Paralelan rad pumpi u pumpnoj stanici [6]

Na slici je prikazan sistem sa tri paralelne pumpe u stanici za podizanje pritiska u jednom gradu u Finskoj. Sistem za podizanje pritiska se sastoji od dve pumpe od po 75 kW i pumpe od 37 kW. Paralelni sistem omogućava 100% redudantnost. Ako problem, kvar nastane na jednoj pumpi, ostale pumpe nastavljaju sa radom bez ikakvog prekida. Kako su pumpne stanice često udaljene i potrebno je puno vremena da bi se do njih došlo u slučaju potrebe za otklanjanjem kvara, sa redudancijom ovaj problem se ublažava.

Inteligentni pumpni sistemi [1]

-Inteligentni pumpni sistemi predstavljaju budućnost i sledeći korak u realizaciji pumpnih sistema.

- **Inteligentni pumpni sistemi koriste standardne VFD uređaje koji u sebi imaju implementiran algoritam specijalno namenjen pumpnim sistemima. Primenom ovakvih inteligentnih sistema postiže se optimizacija pumpnih sistema, automatsko prilagođavanje promenama u toku rada, automatsko prilagođavanje stanju pumpe kao i zaštita od neregularnih i opasnih stanja koja su karakteristična za pumpne sisteme**.
- U okviru zaštite su obuhvaćena sledeća stanja:
    - Zapušenost usisne grane/zatvoren usisni ventil
    - Zapušenost izlazne grane/zatvoren izlazni ventil
    - Kavitacija
    - Minimalni protok
    - Rad na suvo
    - i druga stanja kao što su prevelika struja, brzina, temperatura.
- Primena senzora, bilo da se radi o pritisku, protoku, momentu poskupljuje i usložnjava instalaciju nekog sistema. Iz tog razloga se teži, gde god je to moguće izostavljanje davača, a **pribegava se estimaciji veličina i njihovom indirektnom određivanju na osnovu parametara koji su već dostupni i lako merljivi u sistemu, a ne zahtevaju dodatne intervencije.**

Inteligentni pumpni sistemi[1]

-**Upotreba VFD uređaja uvodi sa sobom i dostupna merenja struja, napona, a na osnovu njih i brzine i momenta**.

- Upotrebom VFD uređaja u inteligentnim pumpnim sistemima moguće je **na osnovu veličina brzine i momenta estimirati i sam protok i to sa tačnošću od ±5%** [1].

- Isto tako na osnovu poznatih veličina brzine i momenta i algoritma u VFD, moguće je odrediti sa zadovoljavajućom tačnošću **gde se nalazi radna tačka sistema**.

-**Nizak nivo usisnog pritiska vodi ka nastajanju kavitacije**, prouzrokujući smanjenje protoka i smanjenje efikasnosti pumpe. Duže trajanje ovog stanja može prouzrokovati i totalno uništenje pumpe. Primenom inteligentnih pumpnih sistema moguće je zaštiti se od ovakvih stanja.

-Pored ovih funkcija postoji mogućnost **zaštite od sedimentacije i zapušavanja u pumpi i cevovodima.** Dobar primer su pumpe koje se koriste za tretman otpadnih voda. Po prirodi u otpadnim vodama se nalazi veliki broj čestica i otpadaka koji mogu izazvati taloženje, kako na samoj pumpi tako i u cevovodima i dovesti u krajnjem slučaju do zapušenja. Da bi se ovakvo stanje sprečilo, inteligentni pumpni **sistem raspolaže sa algoritmom koji po unapred definisanoj sekvenci uključuje pumpu i zavrti je većom brzinom, zatim isključi i pokrene u kontra smeru proizvodeći tako efekat ispiranja kako pumpe tako i cevi**. Ova sekvenca se ponavlja zahtevani broj puta. Ova funkcija predstavlja dobar primer preventivne zaštite pumpnog sistema [6].

Inteligentni pumpni sistemi[1]

-**Bitno je pomenuti funkciju rada više pumpi paralelno, pri čemu nema potrebe za nekom višom logikom (PLC) već sve izvodi algoritam koji je već ugrađen u samom VFD uređaju**. Na taj način se vrši praćenje rada pumpi, obezbeđuje podjednak broj radnih časova pumpi, pumpe se ne tretiraju po brzini već po protoku [1].

-Pumpne stanice su često na udaljenim lokacijama u odnosu na kontrolni centar. U ovom slučaju **pumpne stanice se mogu opremiti sa inteligentnim komunikacionim modulima koji omogućavaju jednostavan pristup VFD uređajima**. Ovaj vid pristupa omogućava udaljeno praćenje parametara sistema, podešavanje, dijagnostiku, a po potrebi i kontrolu.

- Komunikacioni moduli **mogu obezbediti i alarmna stanja** u slučaju nekih neregularnosti koje mogu nastati na pumpnom sistemu. **Na ovaj način se prelazi sa lokalnog upravljanja na distribuirano.** Akvizicijom podataka, na dužim vremenskim periodima mogu se uočiti pojave koje se ponavljaju u sistemu i na taj način sistem još bolje prilagoditi potrebama. Korišćenjem unapred programiranih režima moguće je napraviti velike uštede u pogledu električne energije. Na osnovu prethodnih iskustava i opažanja mogu se vršiti i preventivne mere. Upotrebom fazi logike i neuronskih mreža uloga čoveka kao operatera se može svesti na minimum.

Energetska efikasnost sistema [1]

-Pumpni sistem kod koga se vrši promena brzine je složen sistem koji se sastoji iz sledećih komponenti:

-pumpe,
-motora,
-frekventnog pretvarača,
-cevovoda, ventila itd.

-Svaka od ovih komponenti ima svoj stepen efikasnosti. Proizvod efikasnosti ovih komponenti daće ukupnu efikasnost pumpnog sistema.

- Ulazna snaga pumpe (snaga koju elektromotor predaje pumpi) se može izraziti kao:

$$P_{\text{in,pump}} = \frac{\rho g H Q}{\eta_{\text{p}}},$$

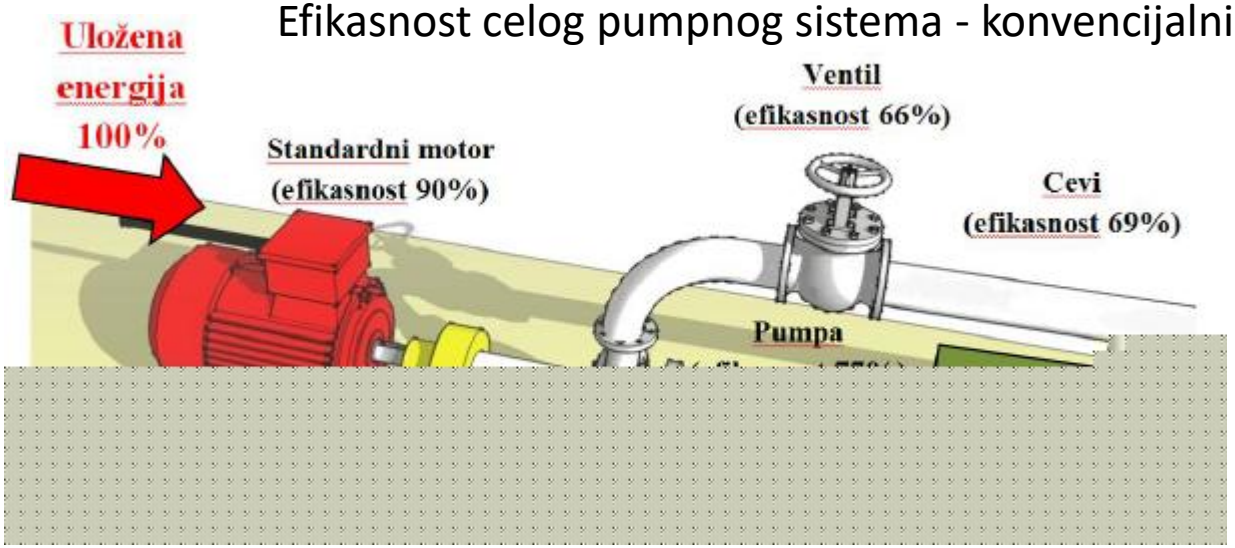
-gde je $P_{in,pump}$ - ulazna snaga pumpe, (kW) i η_p - efikasnost pumpe.

-Ukupna energetska efikasnost može sadržati i druge činioce kao što su efikasnost spojnice između motora i pumpe (ukoliko postoji), zatim efikasnost cevnog sistema, ventila, kolena itd.

-Ukupna efikasnost će tada biti proizvod svih efikasnosti. Na narednim slikama je dat prikaz jednog takvog sistema sa konvencijalnim pumpnim sistemom i sa efikasnim pumpnim sistemom.

Energetska efikasnost sistema [1]

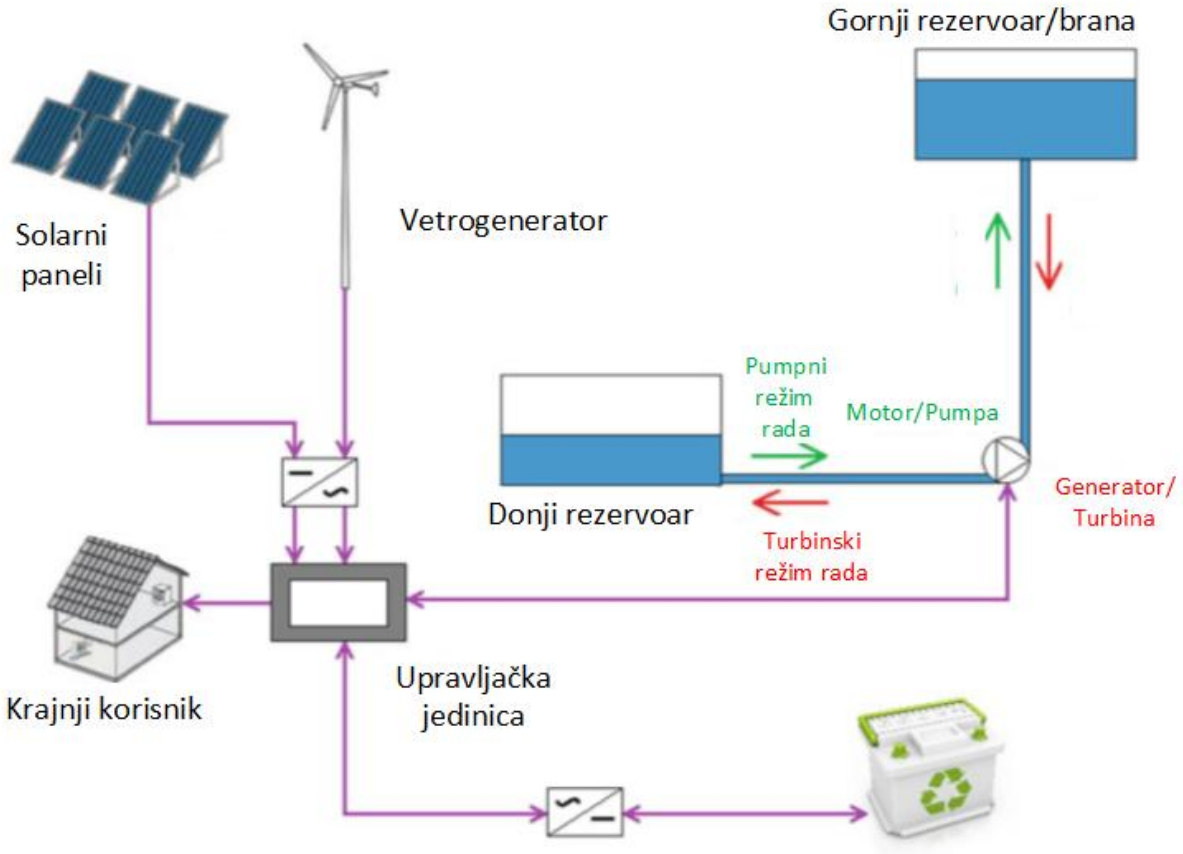
Efikasnost celog pumpnog sistema - konvencijalni pumpni sistem



Energetski efikasan pumpni sistem

Upotreba pumpe kao turbine (PAT)

- Institucije uključene u snabdevanje električnom energijom ruralnih područja nedavno su preporučile koncept korišćenja pumpe kao turbine u mikro mrežama, uglavnom zbog njegove ekonomske prednosti [8].



Upotreba pumpe kao turbine za povećanje energetske efikasnosti hibridnog sistema [9]

Upotreba pumpe kao turbine (PAT)

- Sistemi za vodosnabdevanje su veoma složeni sistemi koji imaju za cilj da obezbede potrošačima vodu odgovarajućeg protoka i pritiska na ekonomski efikasan način. Ovi zahtevi, zajedno sa unapred definisanom topografijom sistema za vodosnabdevanje vrlo često dovode do toga da se u nekim delovima mreže, posebno u brdovitim krajevima gde je velika razlika između izvora i potrošača, pojavi veći pritisak u cevima nego što je to potrebno.
- Posledice velikog pritiska su češća oštećenja i pucanja cevi, povećano curenje i troškovi održavanja. Do sada se ovaj problem u vodosnabdevanju rešavao instalacijom prigušnih ventila ili bazena.
- Novi način za rešavanje ovog problema je da se ne dispira povećani pritisak, već da se koriste mikro-hidroenergetske turbine, ili pumpe u turbinskom radu (PAT). Na ovaj način se pored dovođenja pritiska na potreban nivo u cevi, dodatno proizvodi električna energija i na taj način se regeneriše deo energije koji se gubio dosadašnjim načinom rešavanja problema.
- Ova energiju mogu koristiti potrošači na mestu na kome se ona generiše, ili se može vratiti u mrežu i prodati distributeru električne energije.
- Upotreba PAT-a je pametno rešenje, koje takođe omogućava značajno smanjenje troškova projektovanja i održavanja u poređenju sa klasičnim turbinama. Masovna proizvednja centrifugalnih pumpi čini da one pokrivaju širok opseg pritisaka i protoka i lako se instaliraju. Zato je njigova osnovna cena niža nego cena turbina, a njihovo održavanje je lakše i jeftinije zbog dostupnost rezervnih delova na tržištu. Centrifugalne pumpe takođe pokrivaju širok opseg snage, od manje od 1 kW do više od 1000 kW [10].

Upotreba pumpe kao turbine (PAT)

- Motori spregnuti sa pumpama se koriste u generatorskom režimu rada kada pumpa radi kao turbina. Najčešće se koriste asinhroni motori zbog njihove niske cene, robusnosti i relativno jednostavnog načina rada u generatorskom režimu, bilo da su vezani na mrežu, bilo da rade u ostrvskom režimu rada.
- Performanse asinhrone mašine u motornom i generatorskom režimu rada se neznatno razlikuju. Generalno, klizanje i faktor snage će biti manji u generatorskom režimu rada za istu vrednost momenta, dok efikasnost u mnogome zavisi od klase efikasnosti motora.
- Istraživački rad u ovoj oblasti se fokusira na realne uštede energije koje se mogu ostvariti PAT konceptom.
- Postoje dva osnovna tipa mikro-hidroenergetskog sistema u zavisnosti od toga kakva je veza generatora sa opterećenjem:
  1. Preko mreže (direktno ili preko frekventnog pretvarača), ili
  2. Asinhroni samopobudni generator napaja trofazno ili monofazno opterećenje u mikro elektroenergetskoj mreži.
- Primenu asinhronog generatora sa samopobudom treba detaljno ispitati u smislu kompleksnosti aplikacije, upravljanja i realnih ušteda koje se mogu ostvariti na ovaj način.

Primer inteligentnog pumnog sistema: VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

-VLT AQUA Drive danskog proizvođača “Danfoss” je serija pretvarača specijalizovanih za napajanje pumpnih sistema. Izrađuje se u opsegu snage od 0,25 do 1400 kW.

- Karakteristike VLT AQUA Drive FC202 iz Lab. za elektromotorne pogone ETF-a:

Aktivna snaga	0.55 kW	max. izlazna frekvencija	590 Hz
Napon (fazni)	200 – 240 V	Izlazni napon	0 – 100% ulaznog
Faktor snage	> 0.98	Broj digitalnih ulaza	6
Frekvencija napajanja	50 Hz	Broj analognih ulaza	2

- Može da koristi jedan od dva algoritma: U/f ili VVC^{+} (mogućnost kompenzacije klizanja).
- Pretvarač FC202 ima četiri načina upravljanja momentom motora:
  - konstantan moment (aksijalne pumpe i kompresori),
  - promenljiv moment (prilagođen sistemima čiji moment opterećenja raste sa kvadratom brzine, kao što su centrifugalne pumpe i ventilatori),
  - konstantan moment sa automatskom optimizacijom potrošnje energije (AEO)
  - promenljiv moment sa automatskom optimizacijom potrošnje energije (AEO).

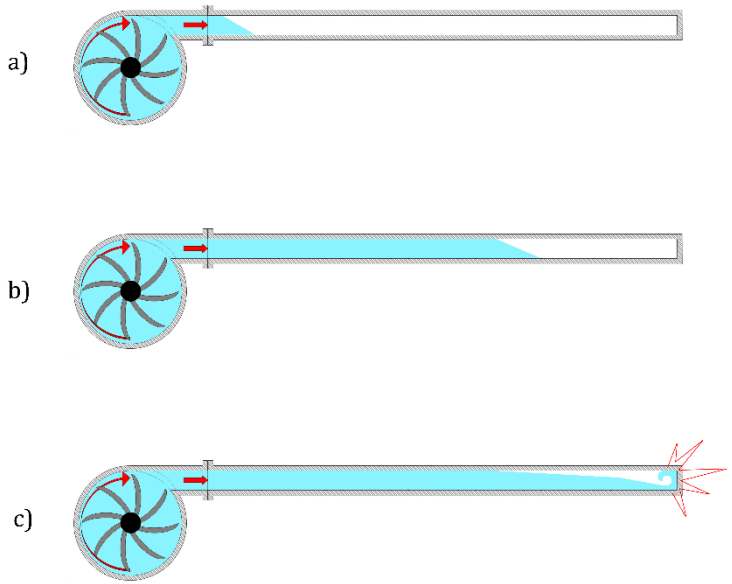
Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

- Specijalne funkcije pretvarača prilagođene nameni u pumpnim sistemima:

Pipe Fill	Postepeno ispunjavanje cijevi
Deragging	Automatsko otčepljenje pumpe
No Flow Detection	Detekcija prestanka protoka
Dry Run Detection	Prepoznavanje rada pumpe na suvo
End Of Curve Detection	Detekcija pucanja cevi
Automatic Energy Optimisation	Automatska optimizacija potrošnje energije
Sensorless Control	Upravljanje bez senzora
Flow Compensation	Automatsko podešavanje protoka

- **Postepeno ispunjavanje cevi (Pipe Fill):** Pri prvom puštanju pumpnog sistema u pogon ili posle pauze u radu, izvesno je da će cevi biti prazne. U trenutku pokretanja pogona, u slučaju rada u zatvorenoj sprezi po pritisku, pumpa će se zaletiti do maksimalne brzine, nastojeći da ostvari zadati pritisak. Ukoliko sistem sadrži horizontalne cevi, može doći do formiranja talasa vode i efekta poznatog kao „vodeni udar“ (Water hammer) [1].

Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a



Pojava „vodenog udara“

a) formiranje udarnog talasa vode u cevi neposredno po pokretanju pumpe.
b) propagacija ovog talasa duž cevi
c) udar talasa u kraj cevi.

-Zavisno od dužine cevi, masa vode koja formira talas može biti značajna. Situacija je još gora ukoliko cev ima i negativan nagib jer tada, pored pumpe i sila zemljine teže dodatno ubrzava udarni talas. U trenutku kada talas dođe do kraja cevi, dolazi do naglog zaustavljanja velike mase vode i ogroman impuls energije se prenosi na samu cev. Posledica je najčešće pucanje cevi na mestu udara talasa.

- Prethodni problem se može izbeći postepenim popunjavanjem cevi. Umesto da pumpa odmah startuje u zatvorenoj sprezi, može se zadati poseban režim u kome će se cev popuniti bez formiranja udarnih talasa. Funkcija ugrađena u pretvarač FC202 namenjena ovome se zove *Pipe Fill*.

Primer inteligentnog pumnog sistema: VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Automatsko otčepljenje pumpe (deragging):

- Pri radu sa otpadnim vodama, moguće je prisustvo čestica čvrstog otpada u vodi, zbog čega u toku rada pumpe može doći do nakuplanja čestica otpada u samoj pumpi. Ovo može dovesti do otežanog rada pumpe, većeg opterećenja, a samim tim i veće potrošnje energije, a u krajnjem slučaju, do potpunog zaglavljivanja.
- Ukoliko pumpa radi u režimu u kome se imaju velike pauze između perioda rada, može doći do taloženja čestica unutar pumpe, međusobnog slepljivanja i gomilanja na radnim dijelovima pumpe, što čini situaciju još gorom, a do zaglavljenja pumpe najčešće dovode otpaci u vidu vlakana koji se umotaju oko radnih dijelova pumpe.
- **Kako bi se prevazišao problem zaglavljivanja usled kontinualnog nagomilavanja čestica otpada u pumpi, pretvarač FC202 ima posebnu funkciju za automatsko otčeplenje nazvanu *Deragging*.** Izvršenje ove funkcije se odvija na sledeći način: iz stanja mirovanja, pumpa se zaleće u jednom smeru do predefinisane brzine; pumpa radi na toj brzini zadato vreme, a zatim usporava do zaustavljanja; sledi pauza, a zatim se pumpa ubrzava u suprotnom smeru do negativne vrednosti zadate brzine; na toj brzini radi zadato vreme, a zatim usporava do zaustavljanja; čitav proces se ponavlja zadati broj puta.
- Pokretanje funkcije otčepljenja se može ostvariti na više načina. Može se podesiti da se ono izvršava svaki put pre pokretanja pumpe, pre i posle rada, preko digitalnog ulaza, preko nekog od ugrađenih tajmera ili automatski, na osnovu karakteristika snage i brzine,...

Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Detekcija prestanka protoka (No Flow Detection):

-Pri funkcionisanju pumpnog sistema može se desiti da protok padne na nultu vrednost, čak i kada pumpa radi sa značajnom brzinom. Razlog ovome može biti začepljenje cevi nizvodno od pumpe, nesmotreno zatvaranje ventila na izlazu iz pumpe i tome slično. Prestanak protoka pri radu pumpe dovodi do toga da voda nema kuda da ode i zadržava se u pumpi.

- Kako se pumpa u normalnom režimu ujedno hladi vodom koja prolazi kroz nju, ovo će dovesti do porasta temperature unutar pumpe. Ovo može imati katastrofalne posledice po pumpu.

- U pretvarač FC202 je ugrađena funkcija zaštite od prestanka protoka u toku rada pogona. **Da li je vrednost protoka veća od nulte, određuje se pomoću krive zavisnosti snage od frekvencije napajanja motora pri nultoj vrednosti protoka**. Ova kriva se dobija tako što se pri svim zatvorenim ventilima odrede dve tačke na krivoj zavisnosti snage od frekvencije: jedna pri maloj vrednosti frekvencije, a druga pri velikoj. Na osnovu ove dve vrednosti pretvarač određuje preostale tačke na krivoj.

Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Zavisnost snage od frekvencije pri nultom protoku

-Ukoliko se tokom rada pumpnog sistema radna tačka nađe u oblasti obojenoj žutom bojom, detektuje se prestanak protoka.

Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Detekcija rada na suvo (Dry Run Detection):

- Da bi centrifugalna pumpa ispravno funkcionisala, potrebno je da njeni radni delovi konstantno i u potpunosti budu potopljeni u vodi. Ukoliko iz nekog razloga u pumpi nema vode, a ona i dalje radi, takav režim rada se naziva rad na suvo. **Pumpa se oslanja na radni fluid da podmazuje radne delove koji su u neposrednom kontaktu.** U slučaju rada pumpe na suvo, trenja između ovih delova se drastično uvećavaju i generiše se znatno veća količina toplote. Ako se tome doda već navedeno pravilo da se preko radnog fluida pumpa ujedno i hladi, **dolazi se do zaključka da će se u slučaju rada na suvo imati veliki porast temperature u pumpi**. Posledično, ovo će skratiti njen životni vek, a u ekstremnom slučaju može dovesti do katastrofalnog otkaza pumpe u toku rada.
- U svrhu prevencije štete pretvarač FC202 ima ugrađenu funkciju za detektovanje rada na suvo. **Ova funkcija se u velikoj meri oslanja na detekciju prestanka protoka. Naime potrebno je da se prvo detektuje prestanak protoka. Potom, ako je i brzina pumpe jednaka maksimalnoj dozvoljenoj - detektuje se rad na suvo**.

Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

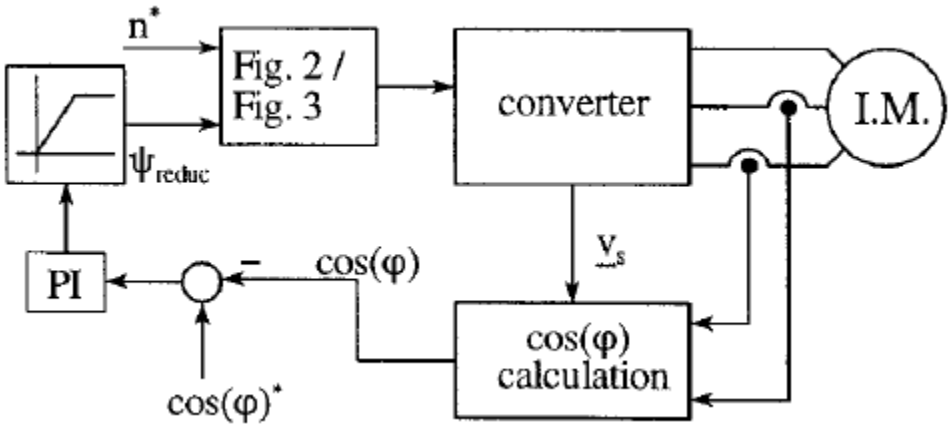
Detekcija pucanja cevi (End of Curve Detection):

- U sistemu za snabdevanje vodom ili odvođenje otpadnih voda moguće je da dođe do pucanja cevi. Razlozi su mnogobrojni, od unutrašnjih kao što je zamor materijala, nagriženost korozivnim supstancama, do spoljnjih, kao što je erozija tla, zemljotres itd.
- Kada dođe do pucanja cevi, poželjno je blagovremeno zaustaviti tok vode kako bi se izbegla dodatna šteta.
- **Pucanje cevi karakteriše značajno povećanje protoka u sistemu. Ovo povećanje je često toliko veliko da pumpa više nije u mogućnosti da postigne zadati referentni pritisak, čak ni pri maksimalnoj brzini rada**. Upravo na ovoj pojavi se zasniva rad funkcije za detekciju pucanja cevi. Da bi ova funkcija reagovala, potrebno je da pumpa radi sa maksimalnom brzinom, a da pri tome mereni pritisak bude za više od 2.5% referentne vrednosti manji od reference. Takođe je moguće podešavanje akcije koju će pretvarač da preduzme po detektovanju ovog stanja.

Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Automatska optimizacija energije (AEO):

- U literaturi [12] se navodi da će motor u režimima u kojima postiže maksimalnu energetsku efikasnost imati približno konstantan faktor snage. Koristeći ovu činjenicu, može se realizovati algoritam koji bi obezbeđivao upravljanje fluksom u mašini, tako da se faktor snage održi na vrednosti (nominalnoj) pri kojoj se ima maksimalna energetska efikasnost.



Blok dijagram za optimizaciju energetske efikasnosti pumpe održavanjem faktora snage na nominalnoj vrednosti [12]

- Ovaj način optimizacije energetske efikasnosti rada motora je jednostavan za implementaciju, a pri tome nudi zadovoljavajuće performanse [12], zbog čega se najčešće primenjuje u elektromotornim pogonima sa skalarnim upravljanjem, kao što je to verovatno slučaj sa FC202 frekventnim pretvaračem.

Primer inteligentnog pumnog sistema: VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

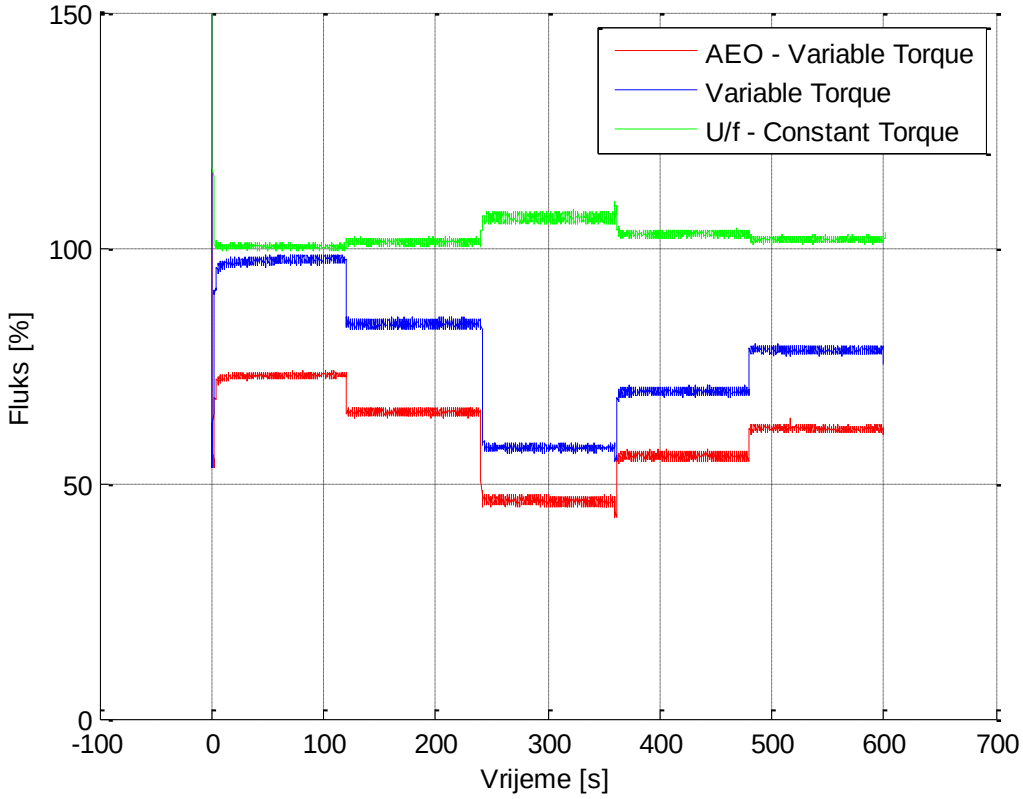
Eksperiment u laboratoriji:

Broj etape	Referenca [mbar]	Protok	Trajanje [s]
1	800	max	120
2	800	1/3 max	120
3	250	1/3 max	120
4	500	1/3 max	120
5	500	max	120

Cilj eksperimenta je da se ilustruje razlika u potrošnji energije pri upotrebi *Constant Torque*, *Variable Torque* i *Auto Energy Optimisation Variable Torque* metoda za upravljanje momentom.

Primer inteligentnog pumnog sistema: VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

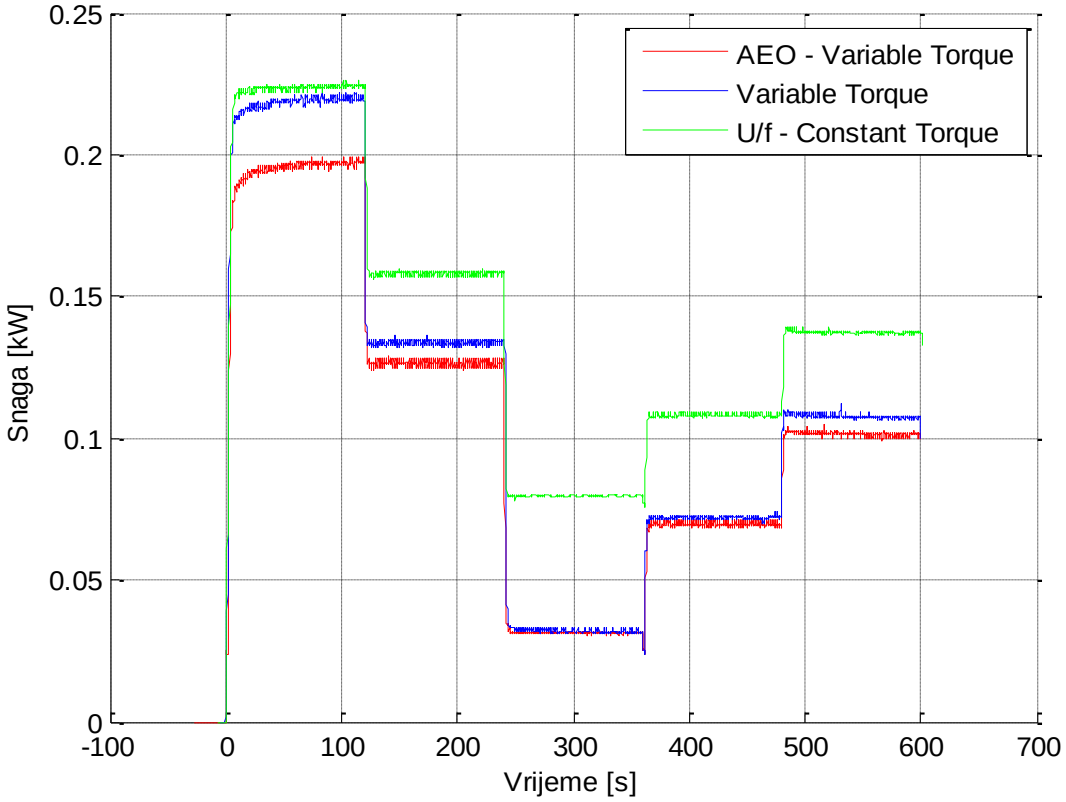
Rezultati merenja:



Promena fluksa u vremenu za tri opisana načina upravljanja [11]

Primer inteligentnog pumnog sistema: VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Rezultati merenja:



Promena snage u vremenu za navedena tri načina upravljanja [11]

Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Funkcija za podmazivanje/održavanje (Pre/Post Lube):

- U radu pumpnog sistema postepeno dolazi do gubitka i degradacije podmazujućeg sredstva. Ovo se prevashodno dešava u ležajevima unutar pumpe, ali može se desiti i na drugim komponentama poput ventila sa pogonom i uopšte, na svakoj komponenti koja ima pokretne delove. **Nestanak ili degradacija maziva dovodi do povećanog trenja što izaziva porast temperature i ubrzano habanje delova.**

-Da bi se ovo izbeglo, pretvarač FC202 ima ugrađenu funkciju koja omogućava integraciju pretvarača sa sistemom za podmazivanje. **Ona omogućava da se podesi u kom trenutku treba da počne i koliko treba da traje proces podmazivanja. Početak procesa se signalizuje preko nekog od digitalnih izlaza time što taj izlaz uzme vrednost logičke jedinice** (+24 volta). Izlaz se povezuje sa pogonom koji izvršava podmazivanje. Po isteku vremena određenog za podmazivanje, na digitalnom izlazu se menja vrednost na logičku nulu (0 volti) čime se pogonu za podmazivanje signalizuje da je vreme da se ugasi.

- Iz prethodnog opisa se može zaključiti da je ovo jednostavna funkcija koja nije ograničena samo na podmazivanje, već se može iskoristiti za signalizaciju početka rada bilo kakvom sistemu za održavanje.

Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Funkcija za potvrdu protoka (Flow Confirmation):

- U nekim sistemima je od značaja da se po pokretanju pogona ustanovi da li je ostvaren protok u određenom delu sistema unutar nekog vremenskog intervala. Motivacija za ovakvu proveru može biti sprečavanje gubitka vode usled pukotine na cevima.

-**Jedan od načina da se ova pojava izbegne je upotreba funkcije za potvrdu protoka, ugrađene u pretvarač FC202. Ova funkcija radi tako što po pokretanju pogona definiše vremenski interval u kome mora da dobije signal preko nekog od digitalnih ulaza, inače će doći do zaustavljanja pumpe. Ovaj signal takođe mora da bude postojan određeno vreme da bi se uvažio.** Na ovaj način se izbegava lažna potvrda protoka usled gličeva i smetnji na kablu koji povezuje udaljeni senzor protoka i pretvarač.

Primer inteligentnog pumnog sistema: VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Regulacija pritiska bez upotrebe senzora:

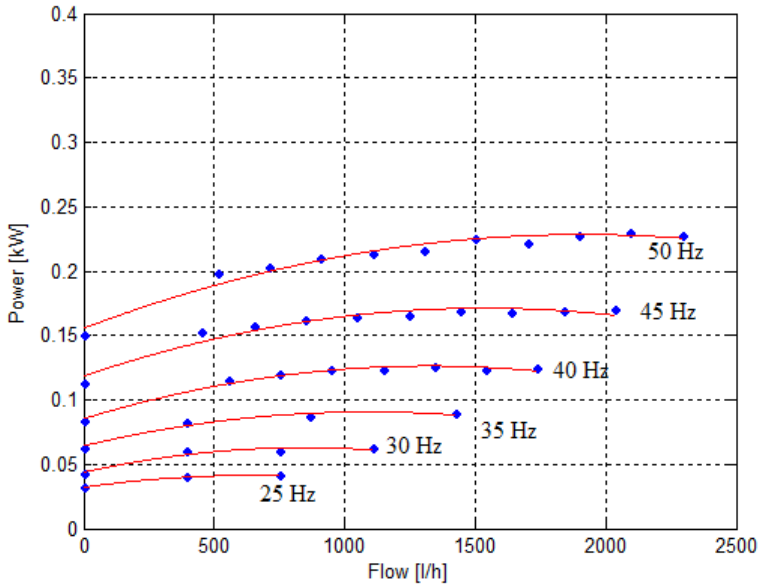
- **U slučaju malih pumpnih sistema, senzor pritiska može predstavljati značajnu investiciju, čak i do 15% od cene invertora. S druge strane, kod ovakvih sistema ponekad nije neophodno ostvariti veliku tačnost u regulaciji pritiska.** Praktičan primer bi bio sistem za pražnjenje vode iz privatnog bazena. Pritisak bi bilo potrebno održavati samo unutar nekih razumnih granica da ne bi došlo do pucanja cevi i, s druge strane, da bi se ostvarilo dovoljno brzo pražnjenje. U ovakvom sistemu je preciznost regulacije pritiska od +-5% sasvim zadovoljavajuća.

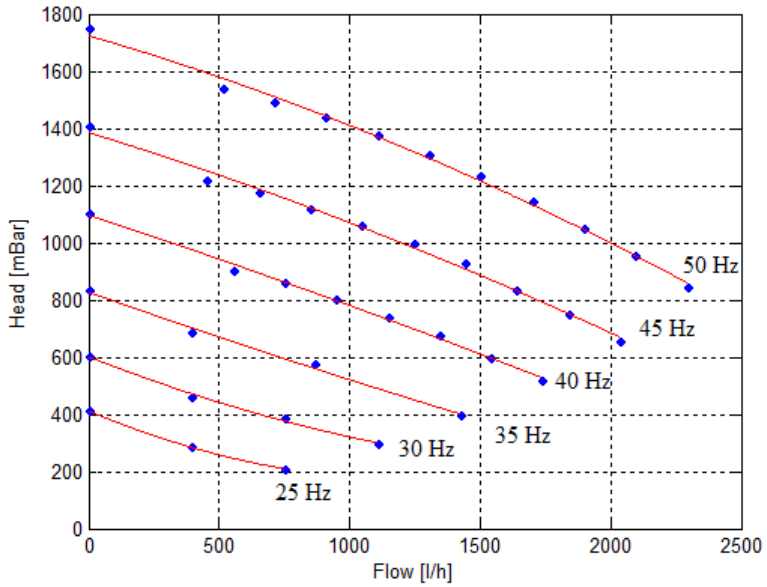
-Algoritam koji se primjenjuje za određivanje pritiska u sistemu, bez njegovog merenja se zasniva na merenju snage koja se ima na izlazu invertora. Na osnovu krive zavisnosti protoka od ove snage određuje se protok u sistemu.

-Da bi pretvarač FC202 mogao da vrši regulaciju pritiska bez senzora, potrebno je da se prvo opiše pumpa koja se napaja. **Ovaj postupak se sastoji u unošenju vrednosti snage, pritiska i protoka za različite uslove u sistemu i za različite brzine obrtanja. Pretvarač dozvoljava unos po deset tačaka za deset različitih brzina obrtanja. Na osnovu ovih tačaka pretvarač na osnovu zakona sličnosti (afiniteta) određuje krive zavisnosti protoka od snage i pritiska od protoka, za sve moguće brzine.**

Primer inteligentnog pumnog sistema:
VLT AQUA Drive FC202 [11] u Lab. za elektromotorne pogone ETF-a

Rezultati merenja na eksperimentalnoj postavci u Laboratoriji:

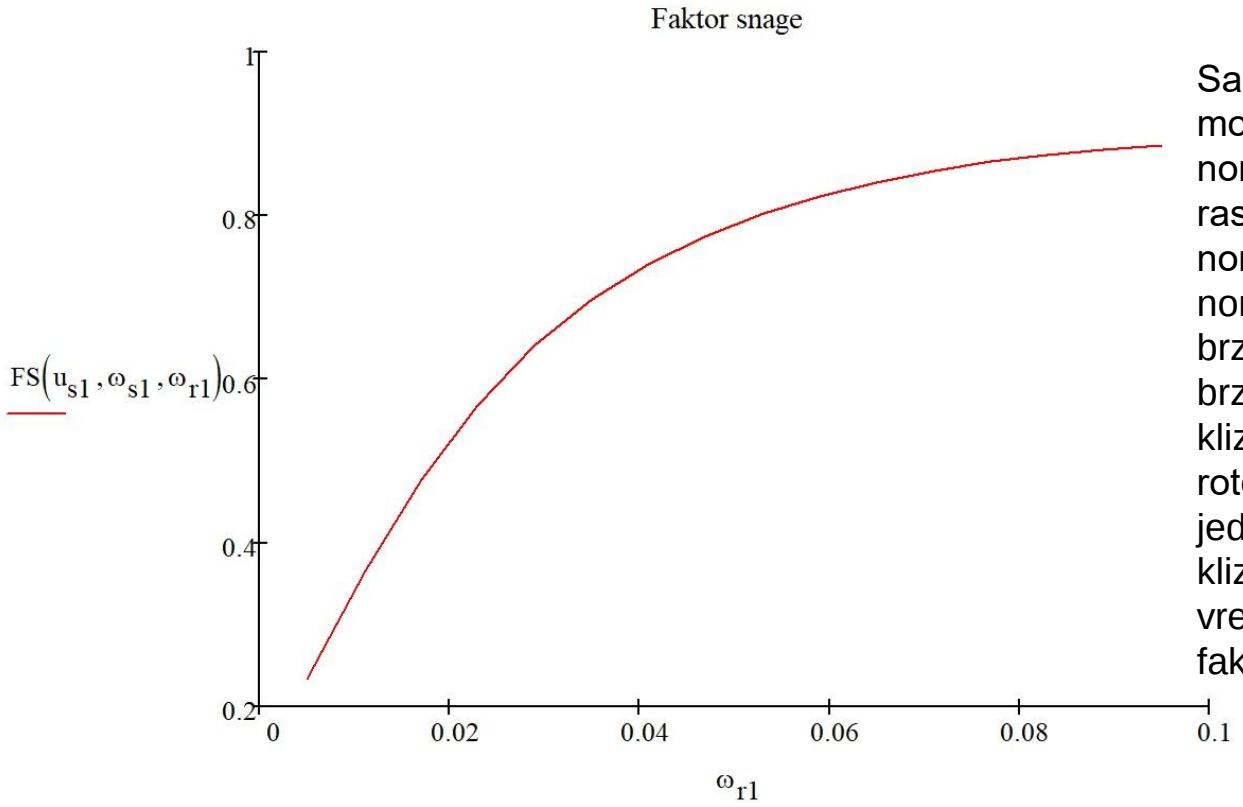




Pumpa i motor su komplet danskog proizvođača „Grundfos“ sa oznakom CM1-2 A-R-A-E-AQQE F-A-A-N. Prva dva slova govore o tome da se radi o centrifugalnoj modularnoj pumpi (CM – Centrifugal Modular). Prvi broj označava nominalni protok u kubnim metrima po času, pri napajanju pumpe iz mreže (50 Hz), zaokružen na prvu nižu celobrojnu vrednost. U ovom slučaju to je 1 m^3/h. Broj 2 predstavlja broj impelera. Značenje preostalih brojeva i slova u oznaci pumpe, dato je u katalogu proizvođača. Proizvođač je definisao nazivnu radnu tačku na karakteristici zavisnosti pritiska od protoka pri brzini od 50 Hz. Nazivni pritisak je 1147 mbar-a, pri nazivnom protoku od 1,7 m3/h. Motor je trofazni asinhroni i u postavci laboratorijske vežbe, njegovi su namotaji spregnuti u zvezdu:

Nazivni napon	3x 220-240 / 380-415 V
Nazivna učestanost	50 Hz
Nazivna snaga	0,45 kW
Nazivna struja	2,0-2,2 / 1,0-1,2

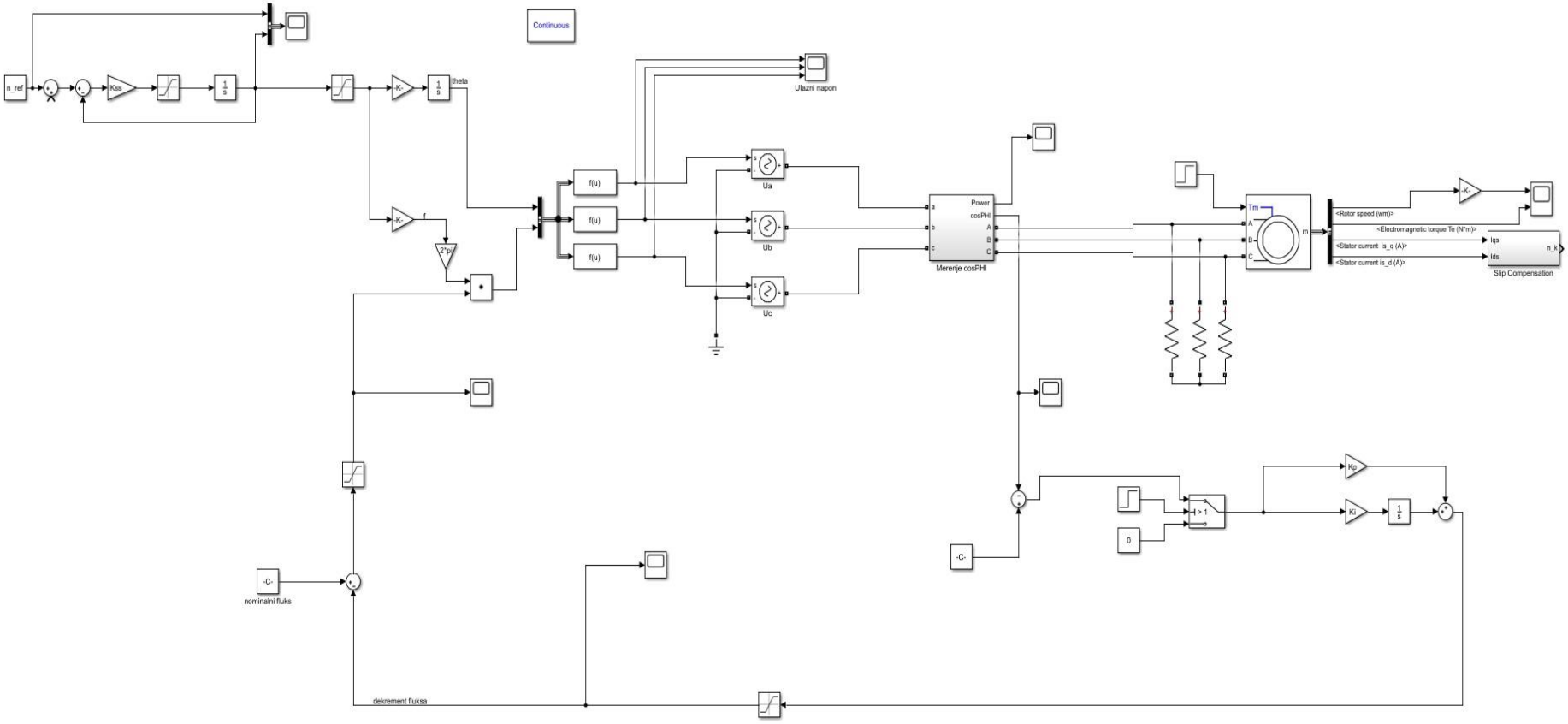
Primer: master rad “Energetski optimalno upravljanje pogonom sa asinhronim motorom u aplikacijama sa pumpom” [13]



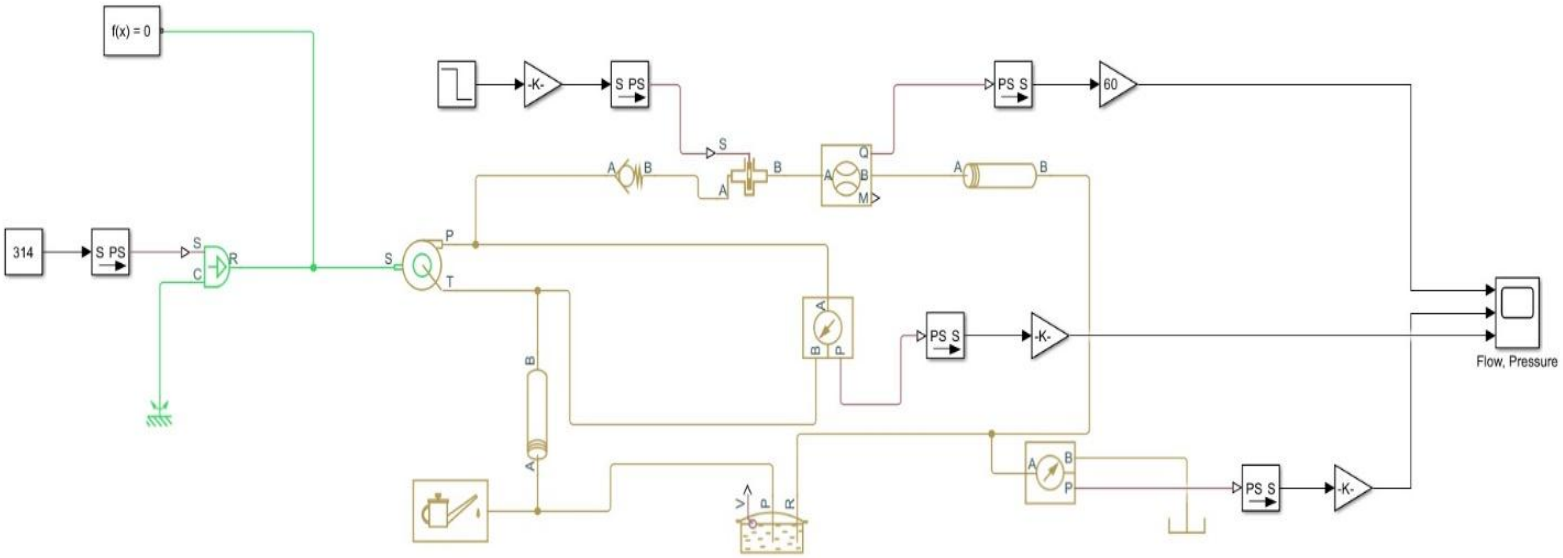
Sa povećanjem rotorske učestanosti, tj. momenta opterećenja (pri konstantnoj, nominalnoj učestanosti napajanja), raste i faktor snage, pri čemu se za nominalno opterećenje dobija nominalni faktor snage. Iz nominalne brzine motora i nominalne sinhrone brzine se dobija da je nominalno klizanje *7 %* ($s_n = 0.07$). Nominalna rotorska učestanost u relativnim jedinicama odgovara nominalnom klizanju ($\omega_{Rn} = 0.07$), a za njenu vrednost se sa grafika dobija nominalni faktor snage (*0.852*).

Faktor snage za asinhroni motor pumpe iz laboratorijske postavke dobijen proračunom u Mathcad-u

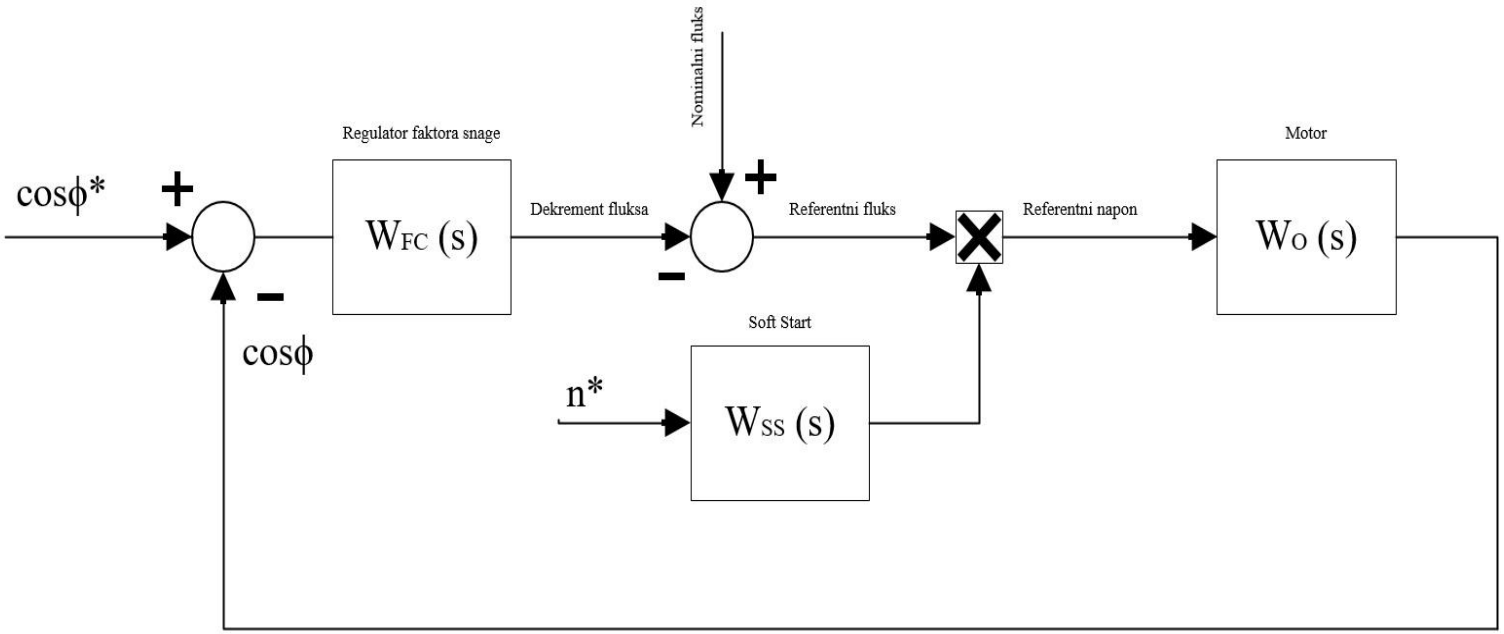
Model skalarno upravljanog pogona pumpe sa asinhronim motorom u Matlab Simulink-u



Model hidrauličkog sistema u Matlab Simulink-u



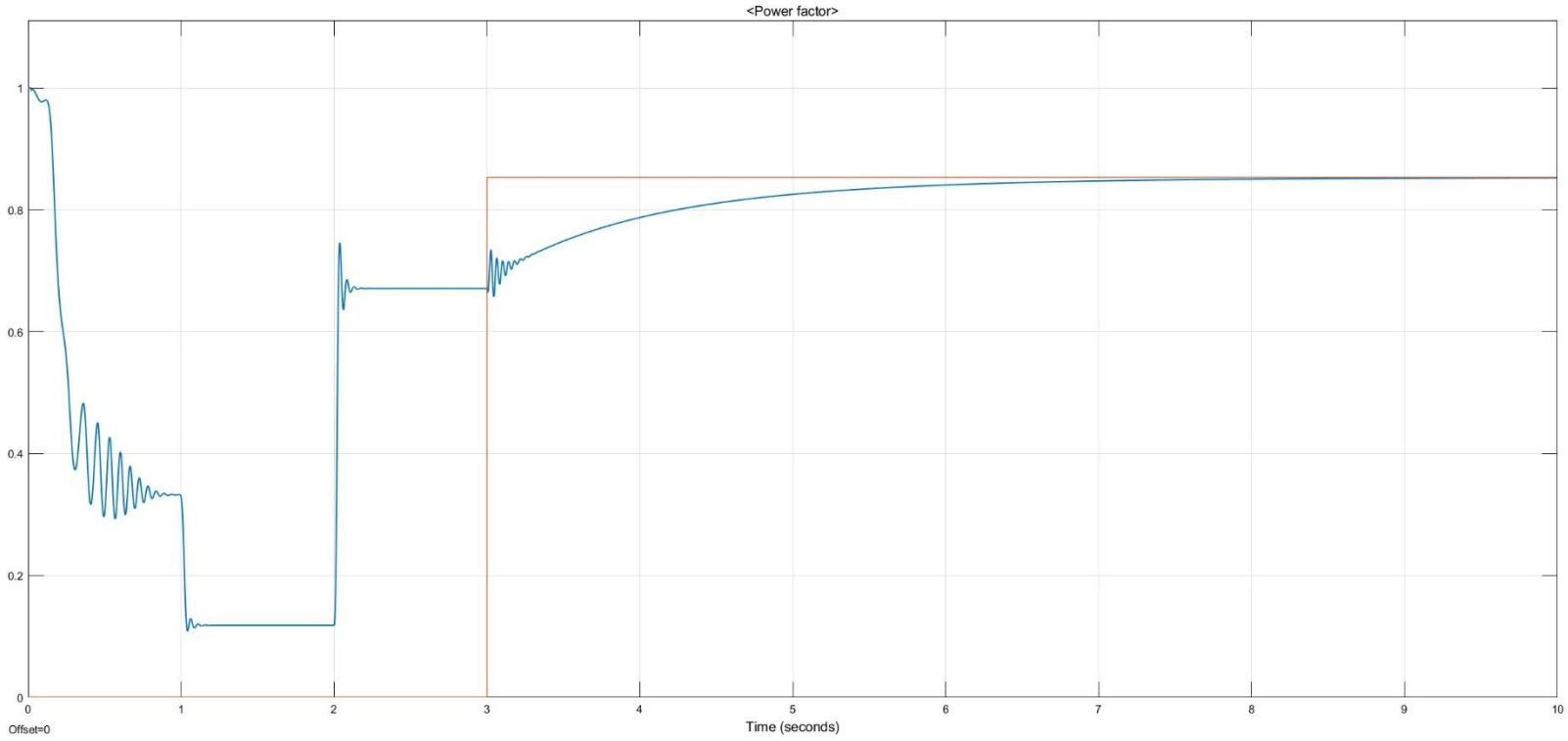
Podešavanje regulatora faktora snage



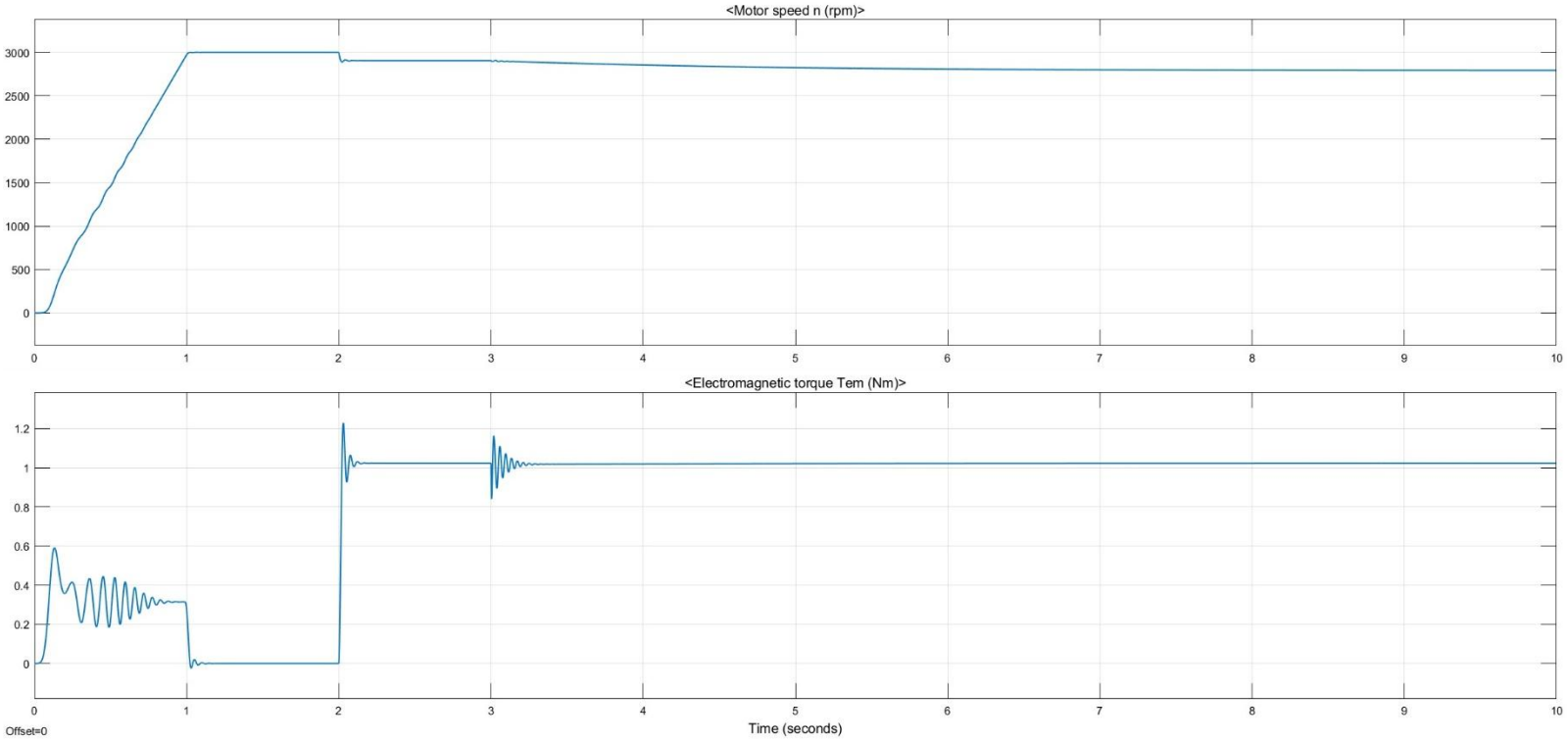
Ogled 1: Odziv sa podešenim parametrima

- Motor se zaleće neopterećen do nominalne brzine
- U trenutku t = 2 s se opterećuje sa 50 % nominalnog momenta
- Regulator faktora snage se uključuje u t = 3 s
- Zadata je nominalna vrednost faktora snage 0.852

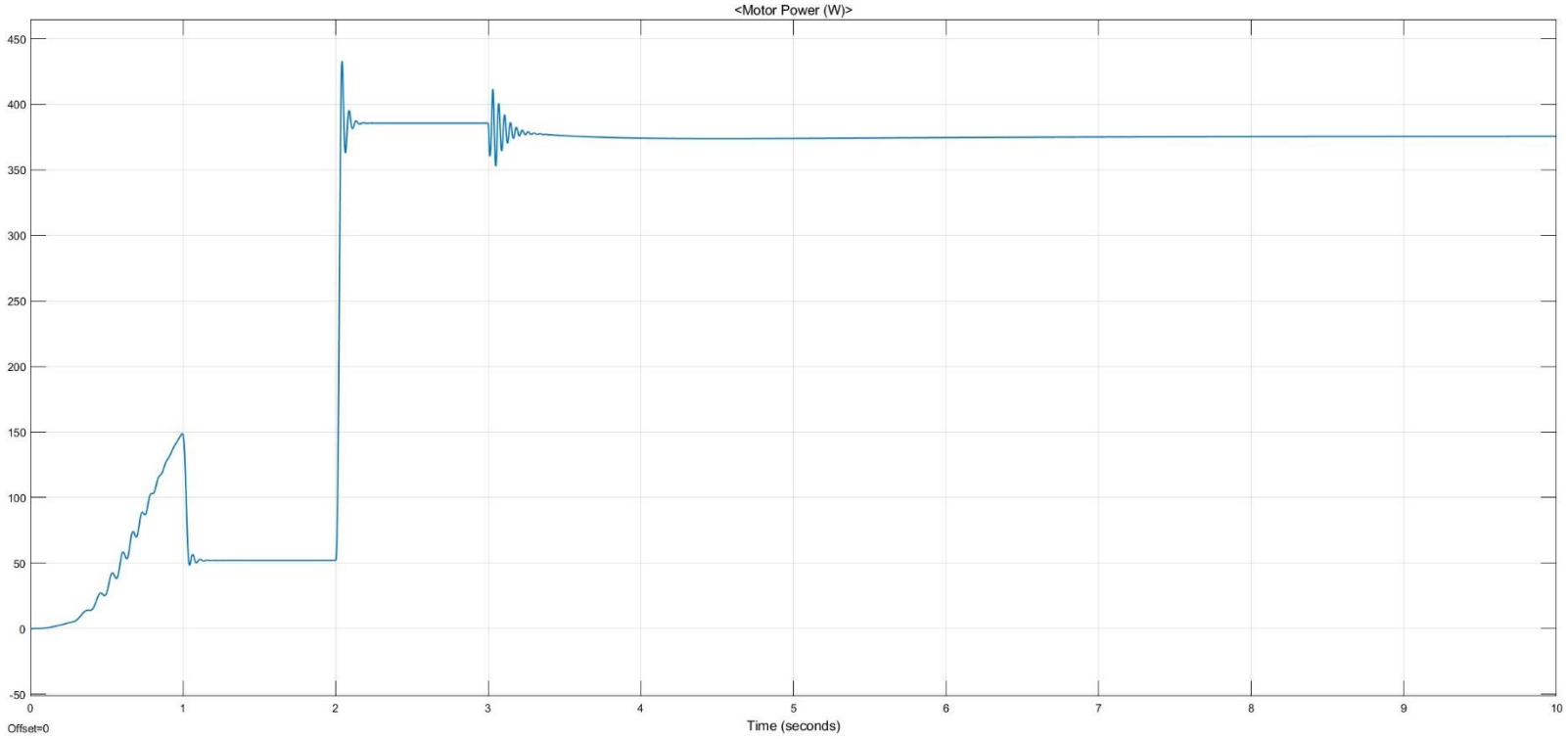
Faktor snage



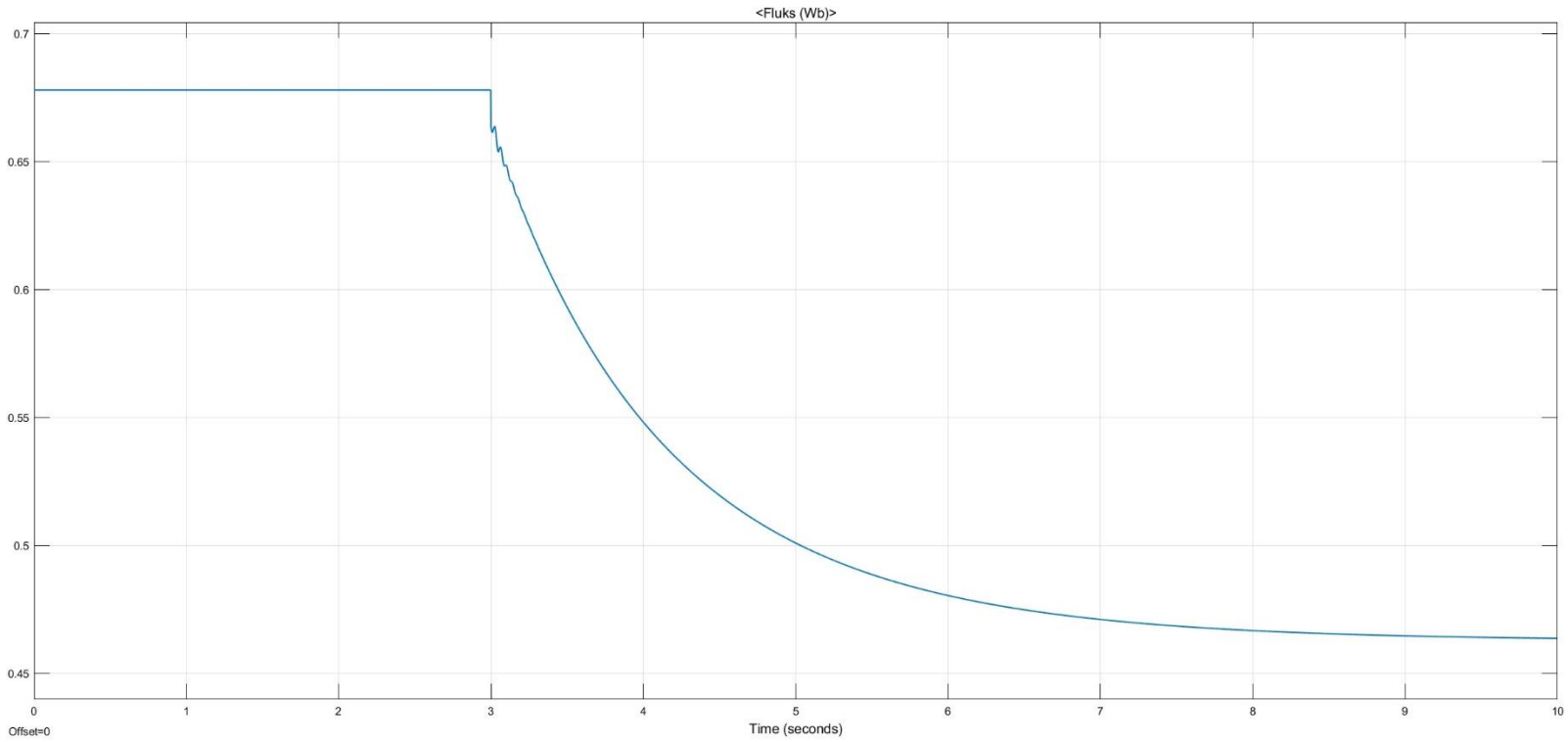
Brzina i moment



Ulazna snaga



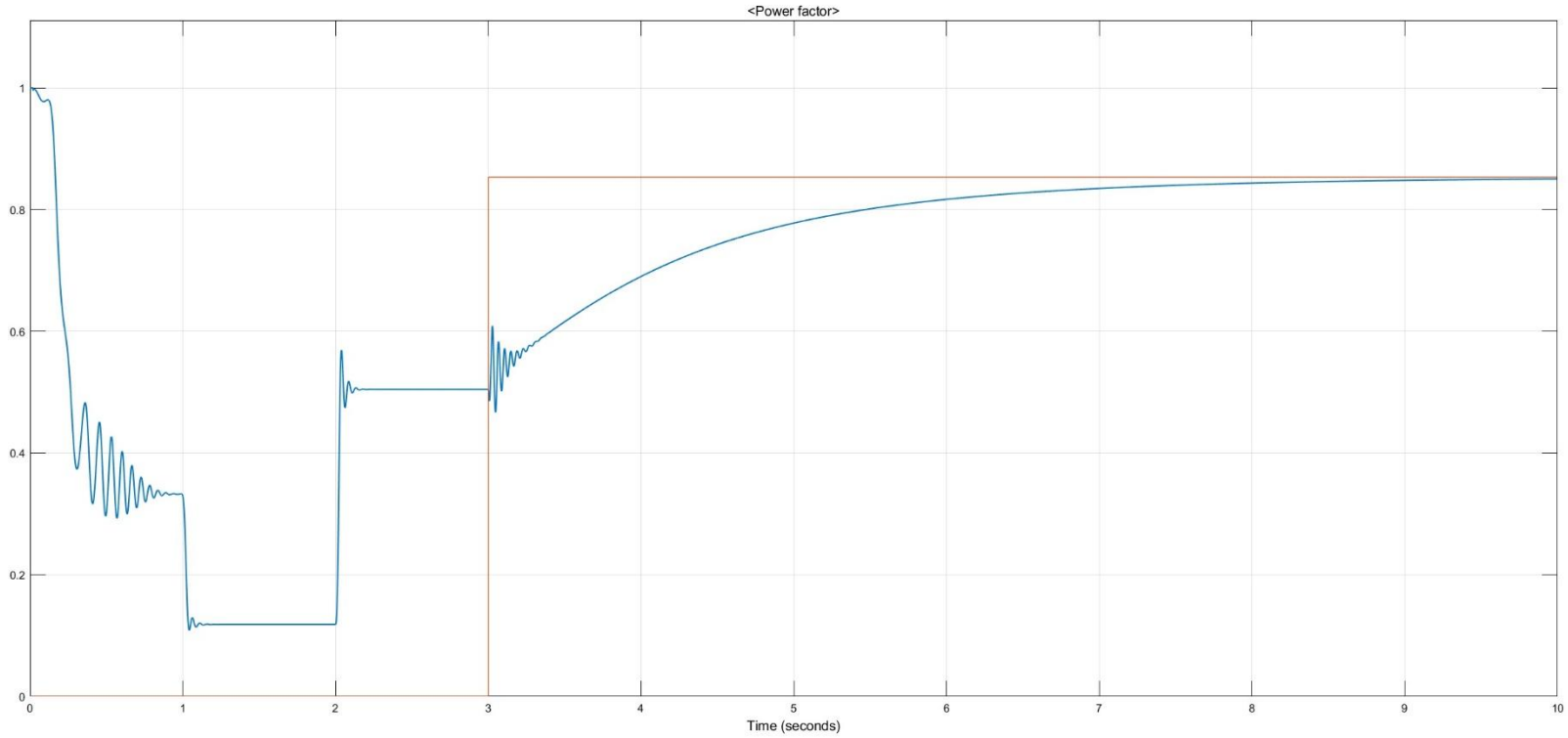
Fluks


<Fluks (Wb)>
0.7
0.65
0.6
0.55
0.5
0.45
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Time (seconds)
Offset=0

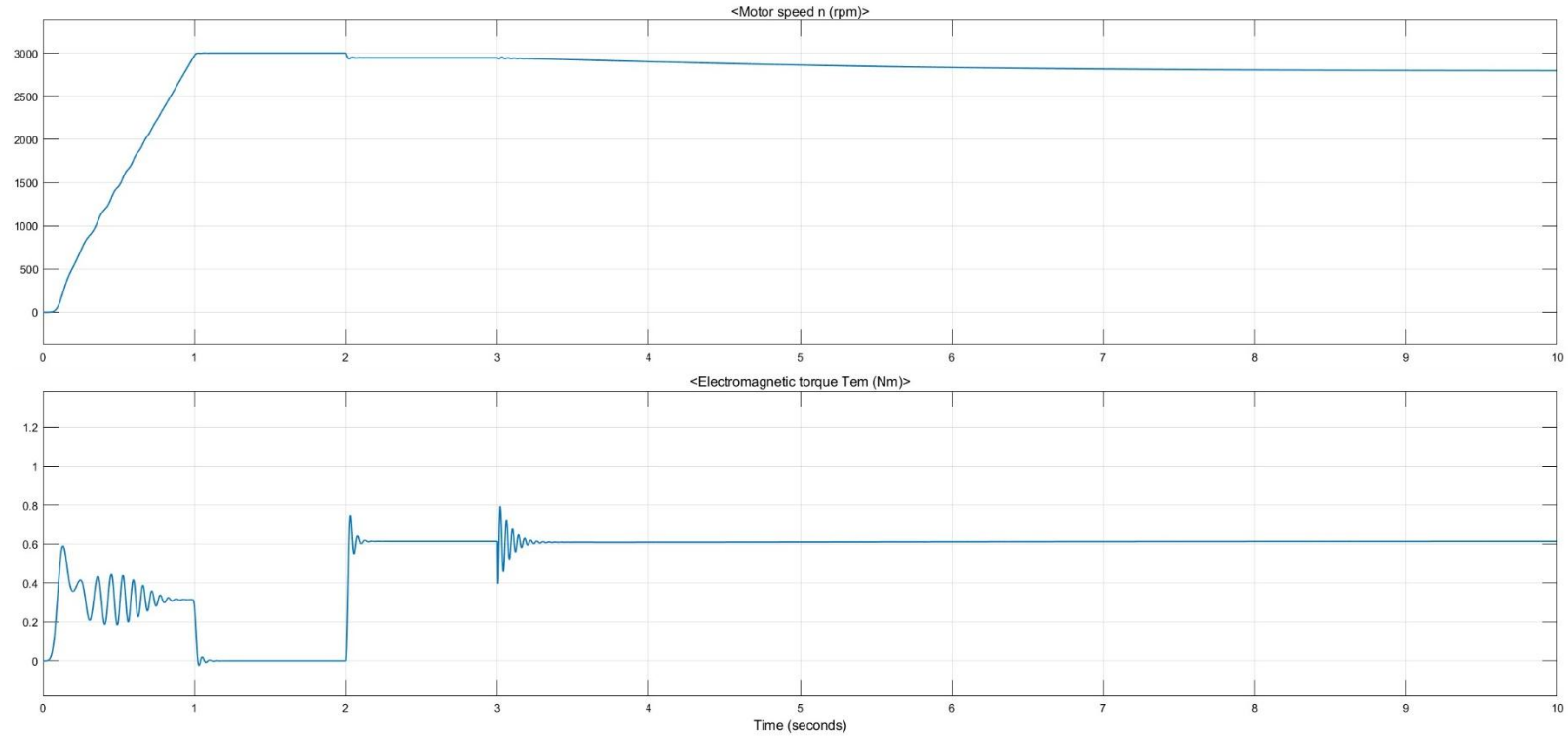
Ako je opterećenje 30 %?

- Motor se zaleće neopterećen do nominalne brzine
- U trenutku t = 2 s se opterećuje sa 30 % nominalnog momenta
- Regulator faktora snage se uključuje u t = 3 s
- Zadata je nominalna vrednost faktora snage 0.852

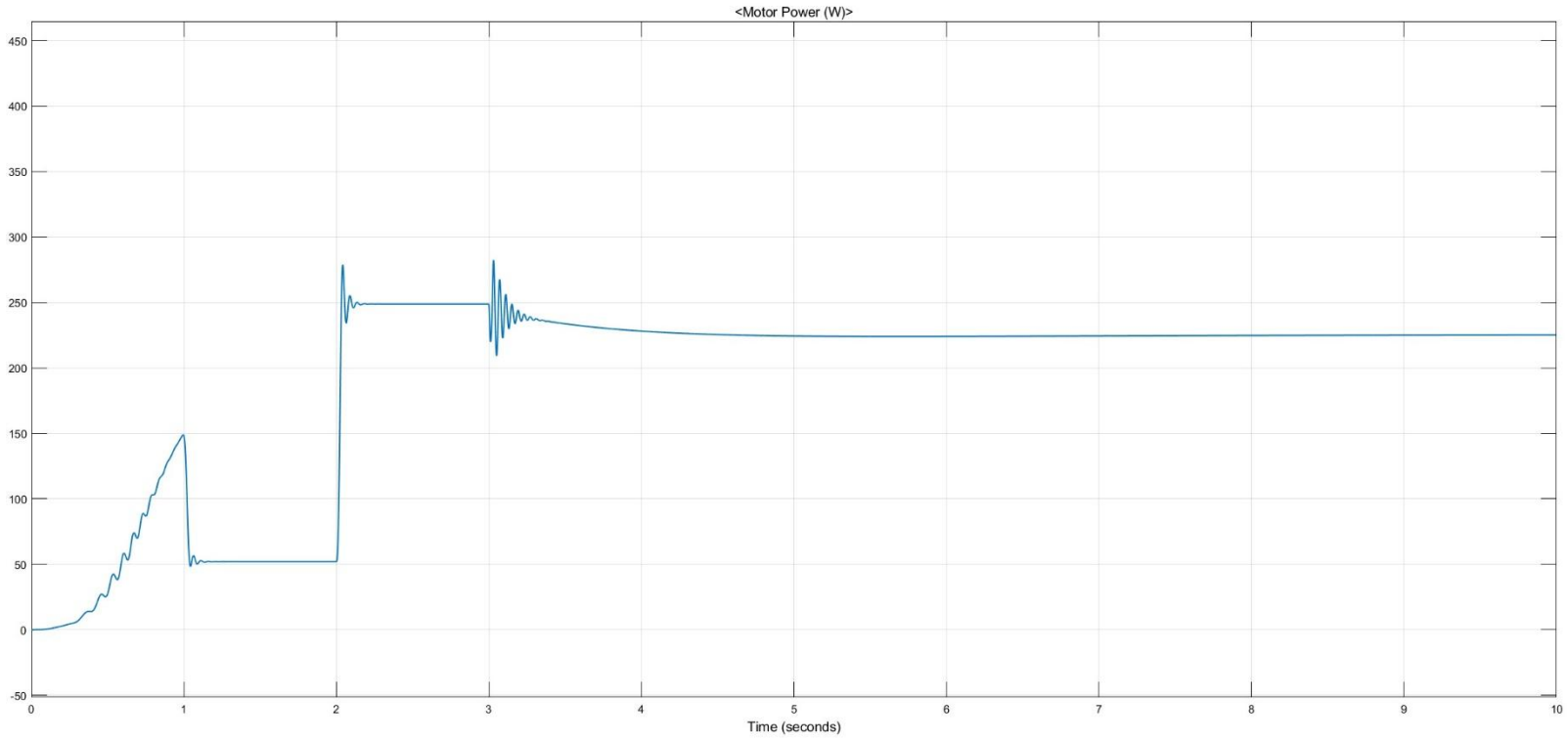
Faktor snage



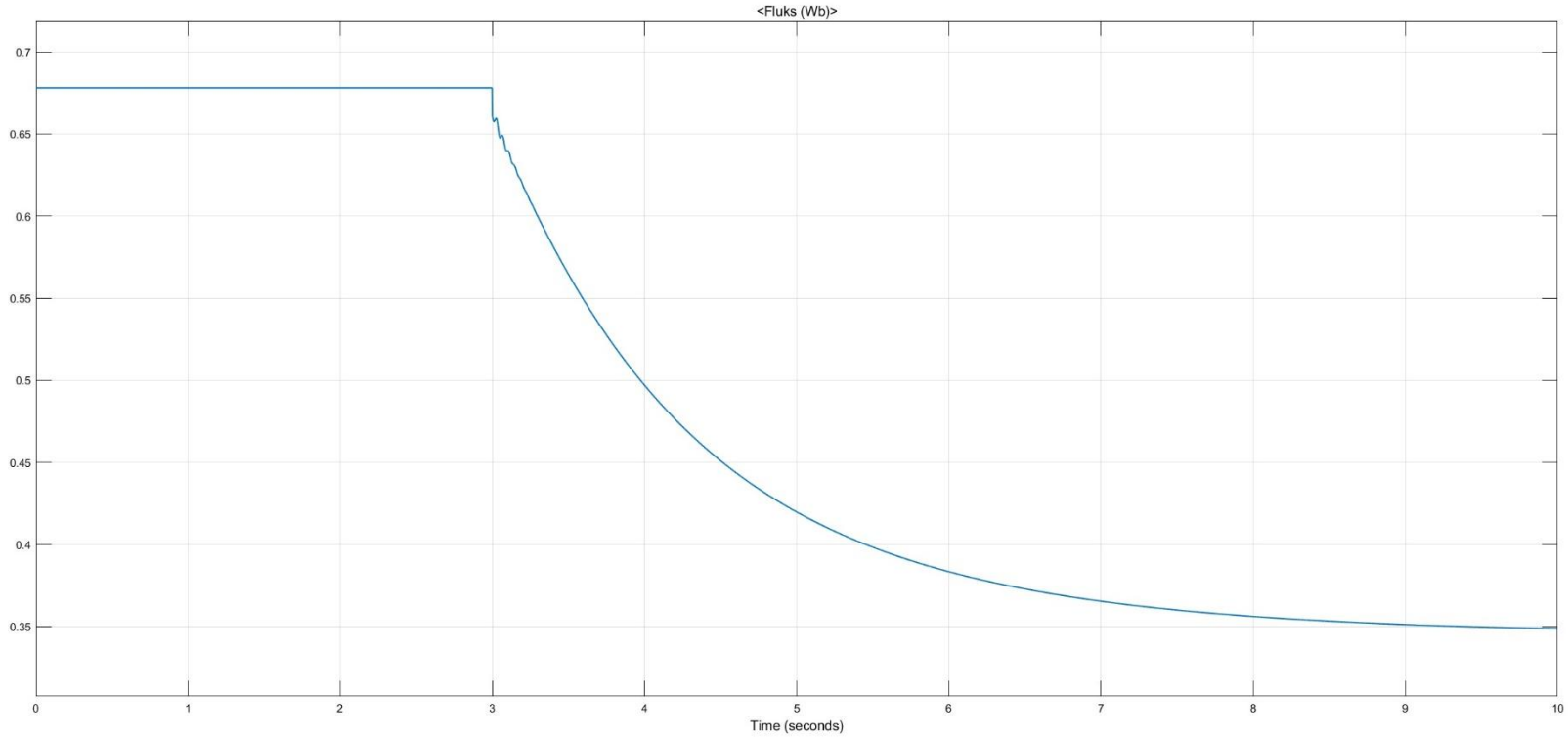
Brzina i moment



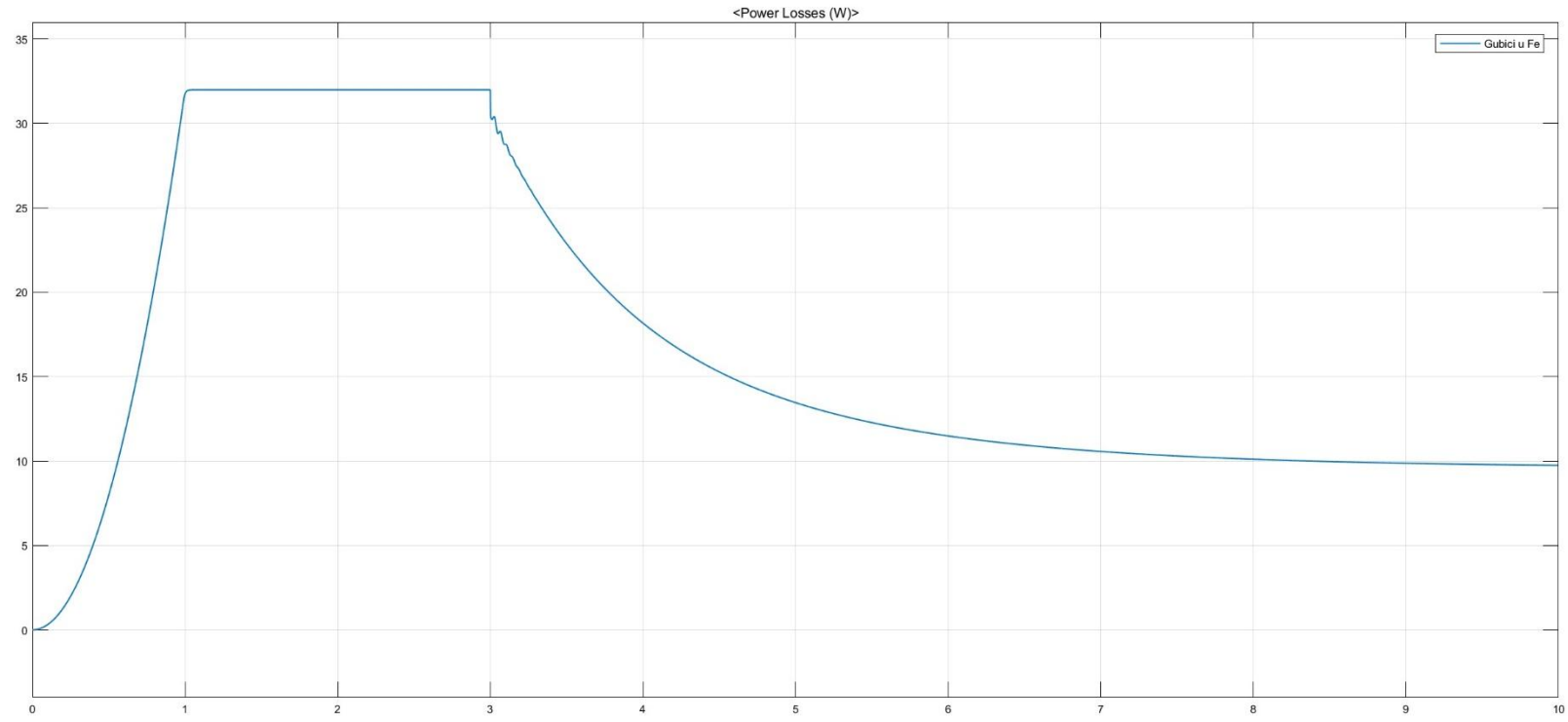
Ulazna snaga



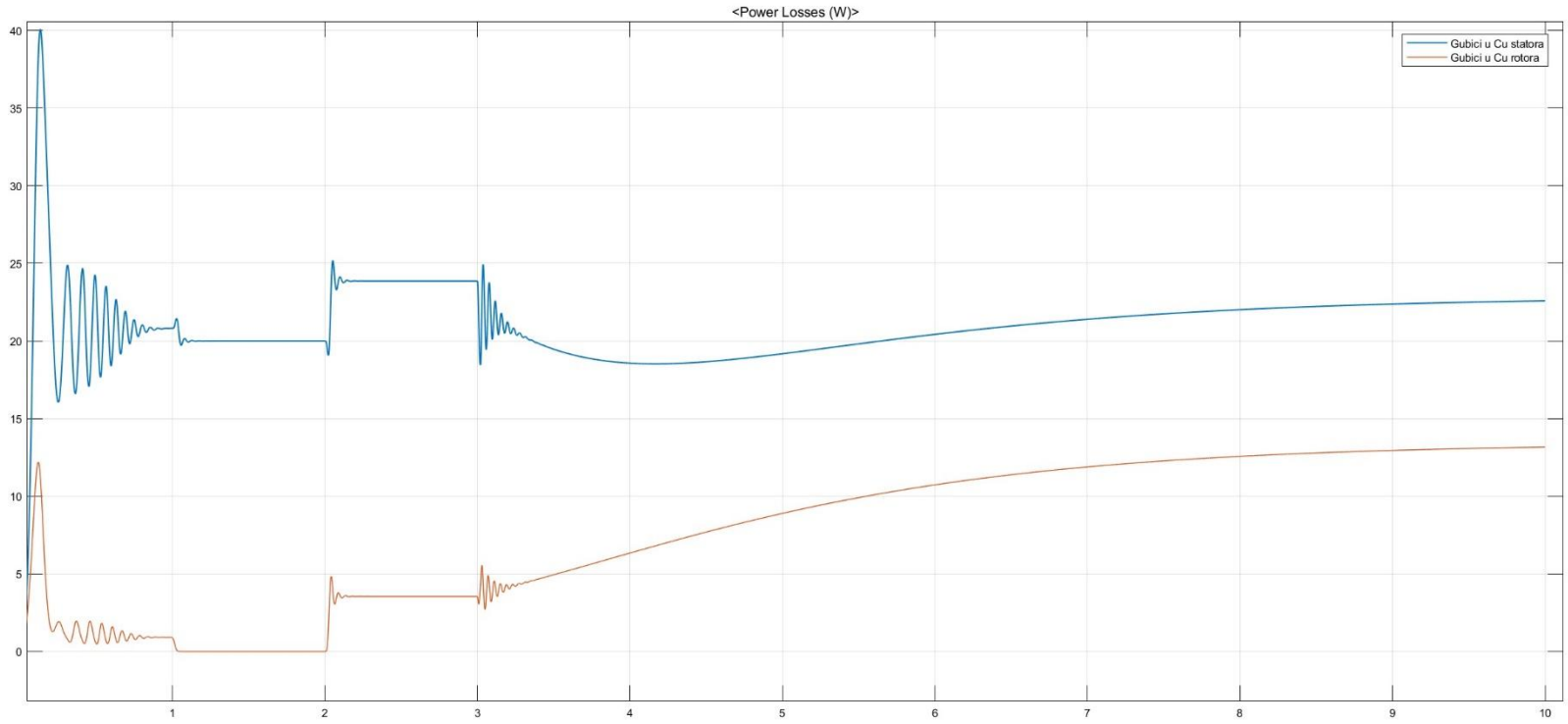
Fluks


<Fluks (Wb)>
0.7
0.65
0.6
0.55
0.5
0.45
0.4
0.35
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Time (seconds)

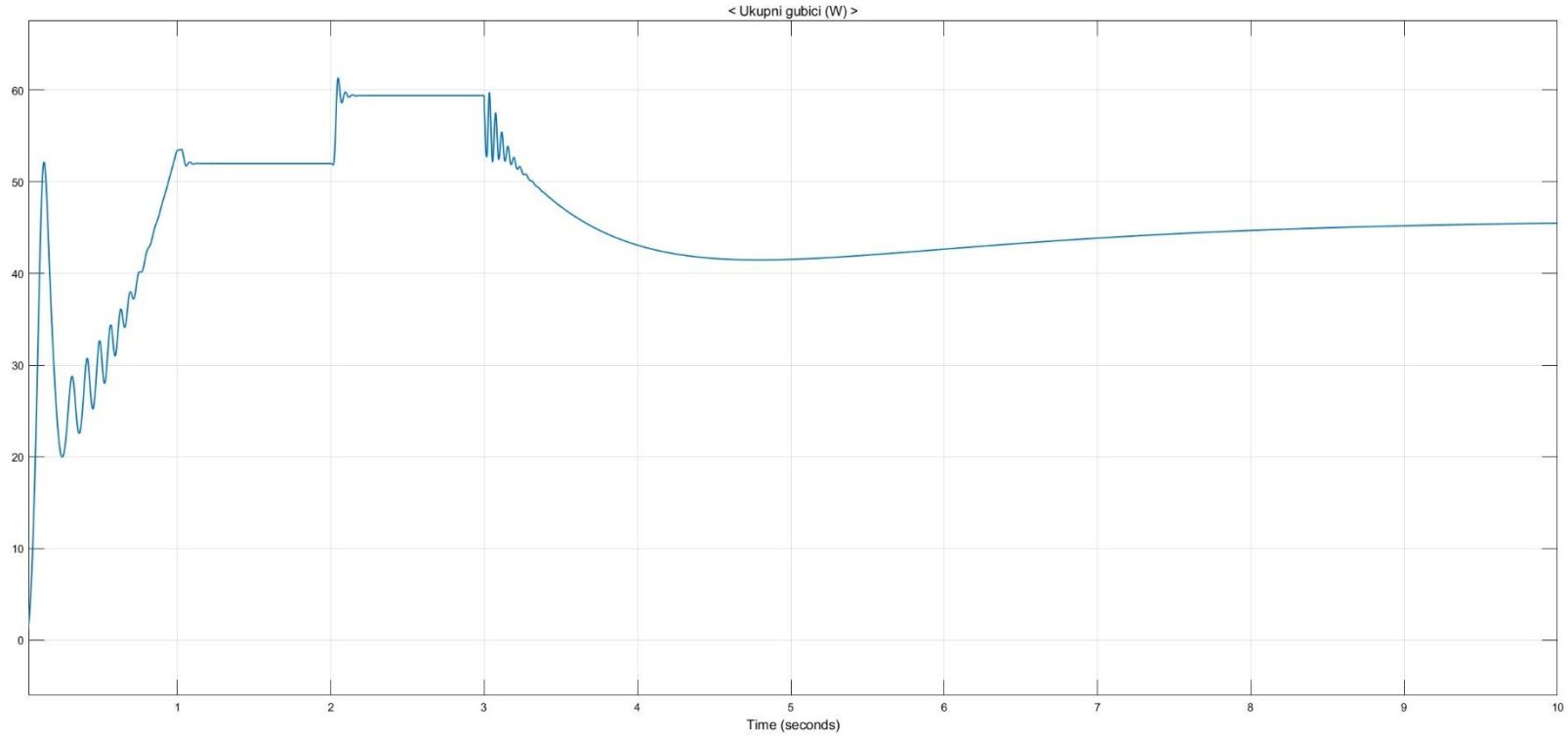
Gubici u gvožđu



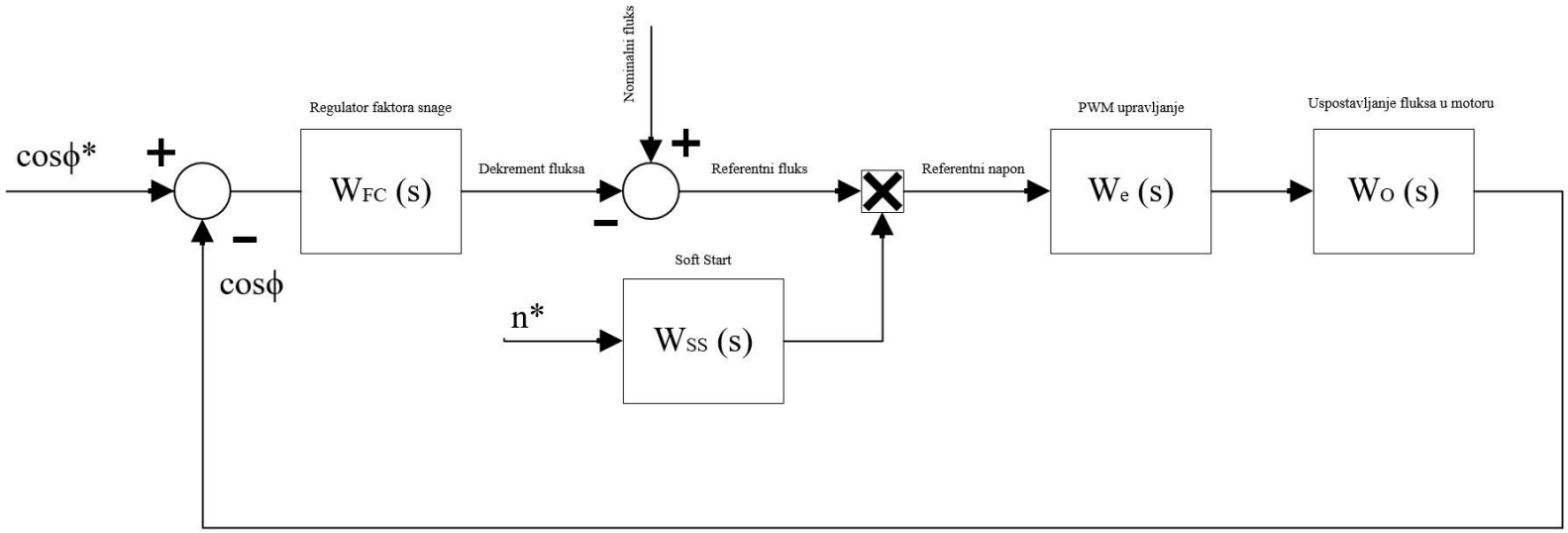
Gubici u bakru



Ukupni gubici

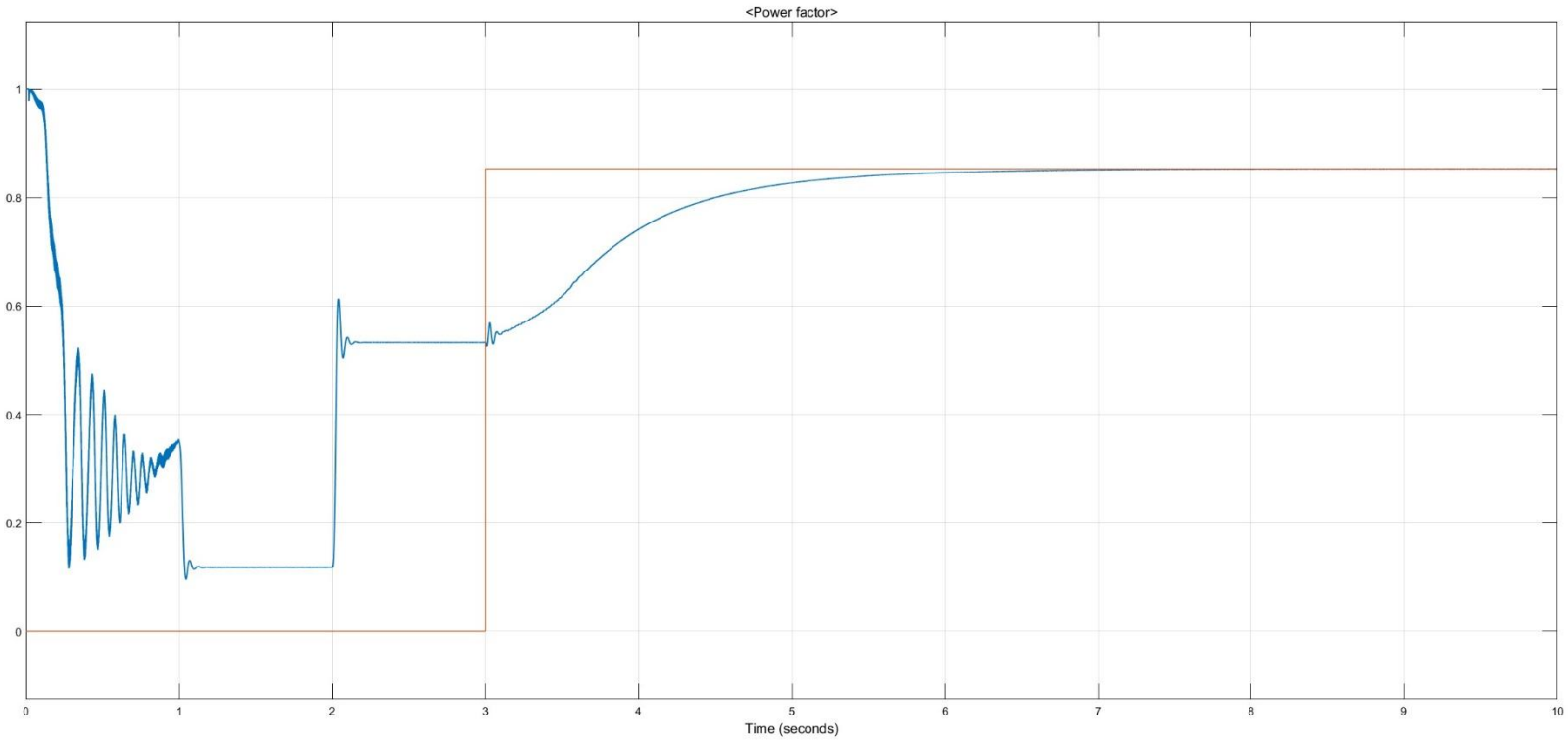


Model sa PWM

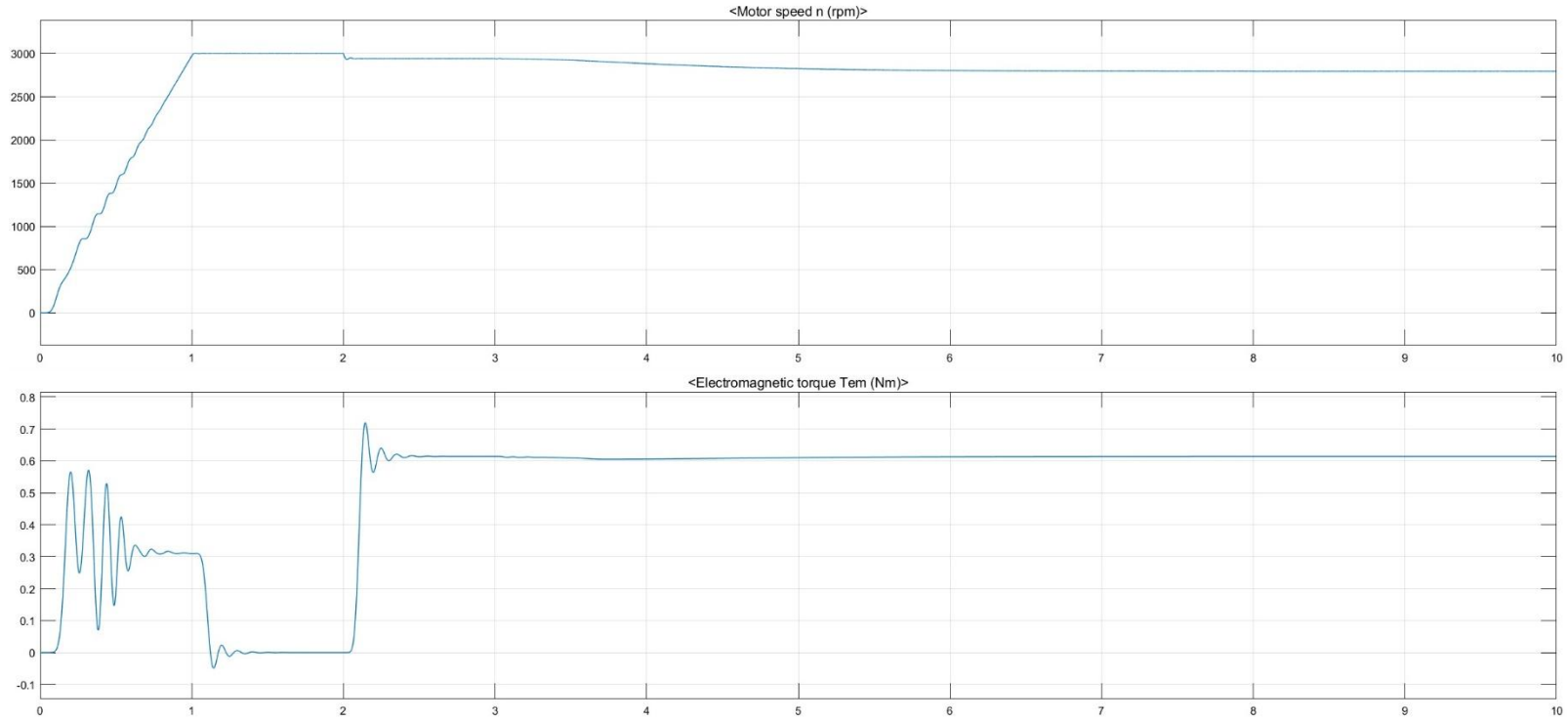

Nominalni fluks
Regulator faktora snage
PWM upravljanje
Uspostavljanje fluksa u motoru
cosϕ*
+
W_FC (s)
Dekrement fluksa
+
Referentni fluks
Referentni napon
W_e (s)
W_O (s)
−
cosϕ
Soft Start
n*
W_SS (s)

- Razlike u funkciji prenosa sistema, naponski invertor sa PWM-om
- Slično se ponaša kao i model sa kontrolisanim naponskim izvorom
- Pratićemo odzive sa 30 % opterećenja
- Potrebno je ispitati kako se model ponaša pri naglom povećanju opterećenja

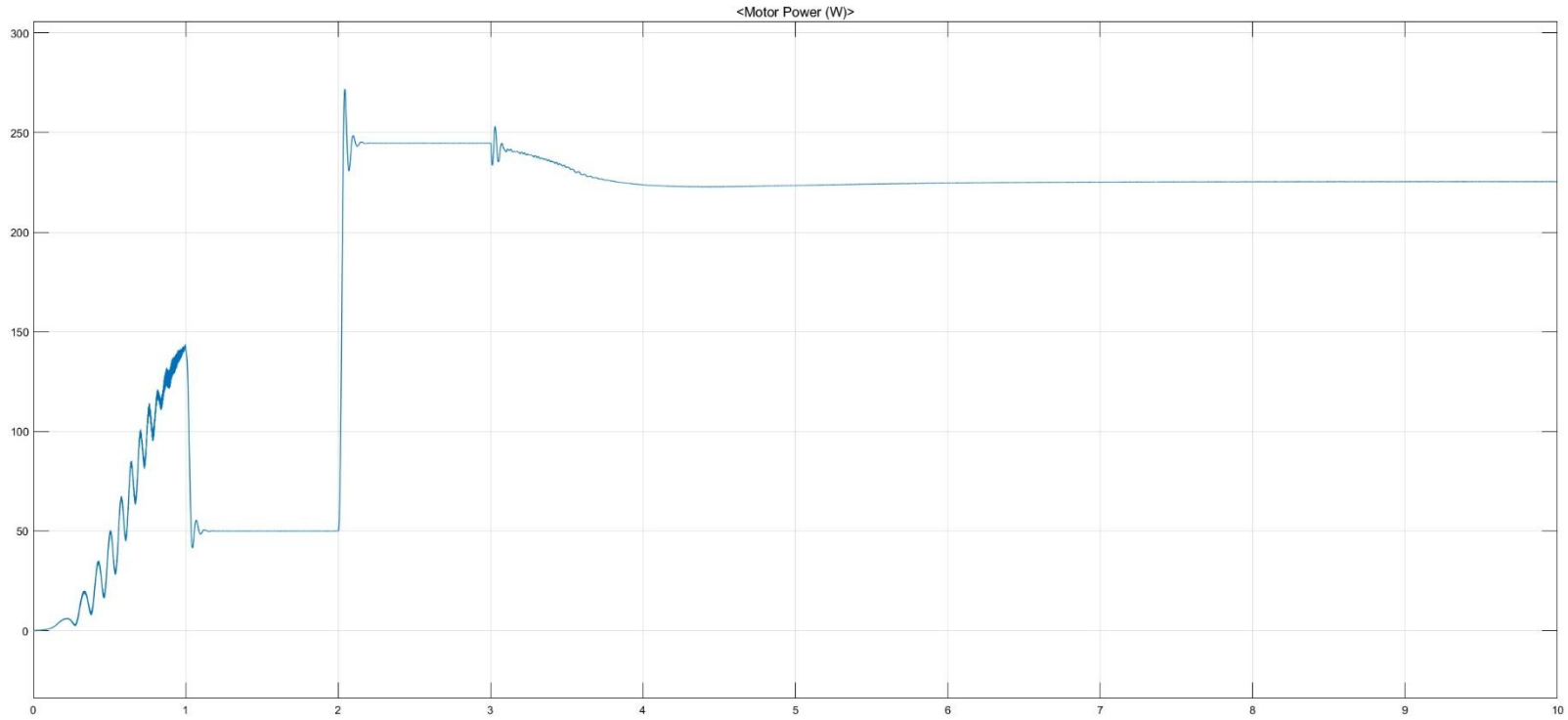
FS sa 30 % opterećenja



Brzina i moment sa 30 % opt.



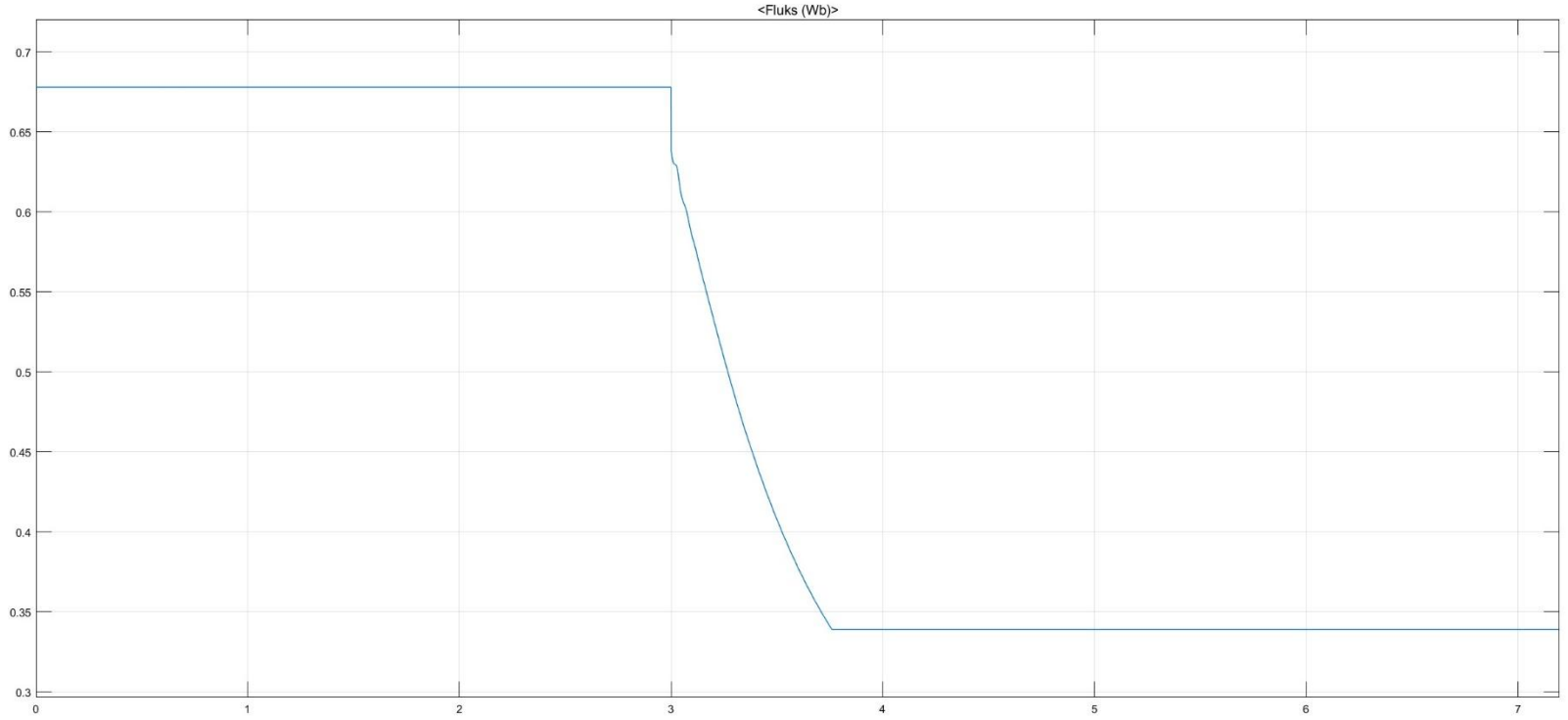
Ulazna snaga sa 30 % opt.



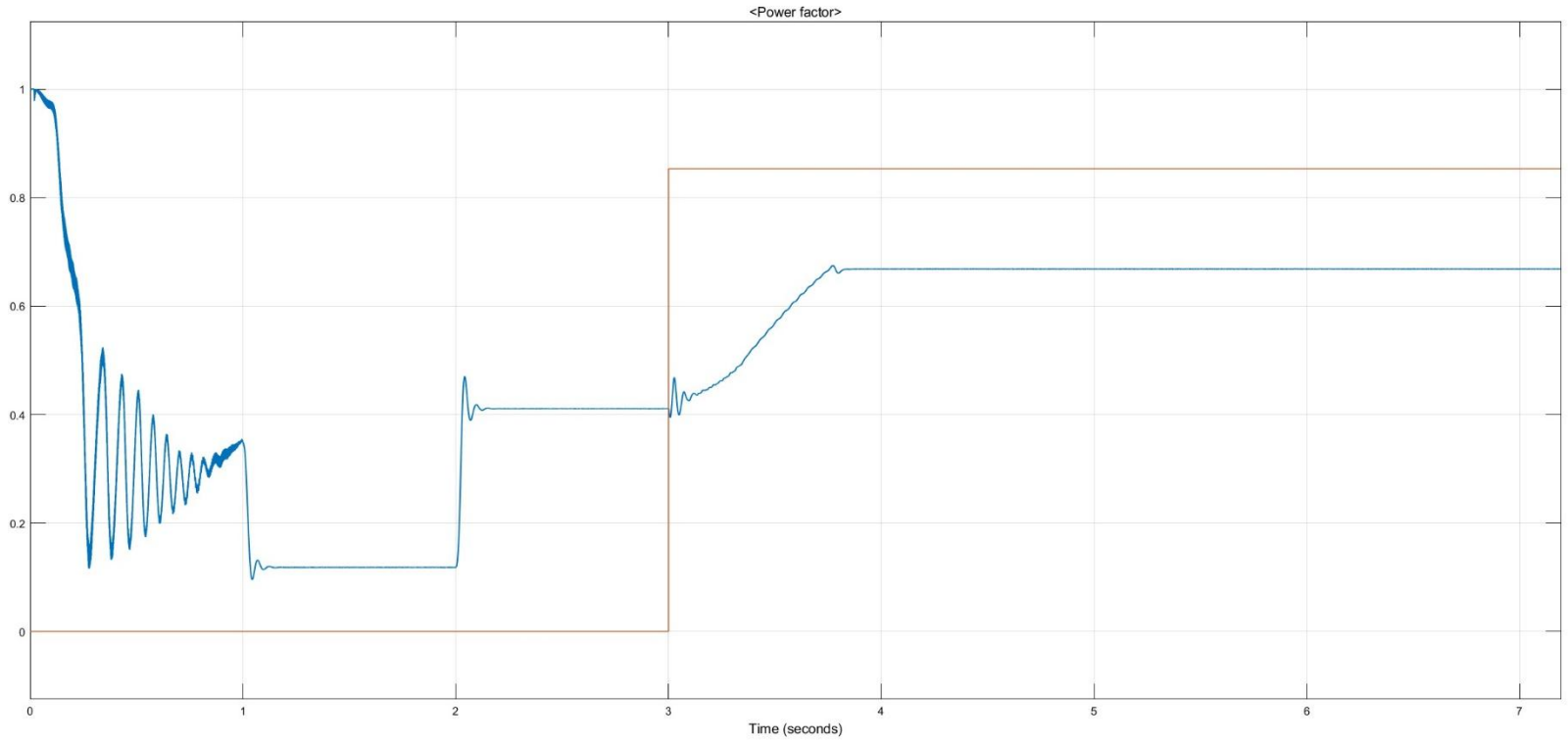
Limit fluksa

- Definiše se donja granica fluksa ispod koje ne sme da pređe pri optimizaciji
- Moguće je dostići limit ukoliko je pogon veoma slabo opterećen
- Simulacija sa 20 % momenta opterećenja, na nominalnoj brzini

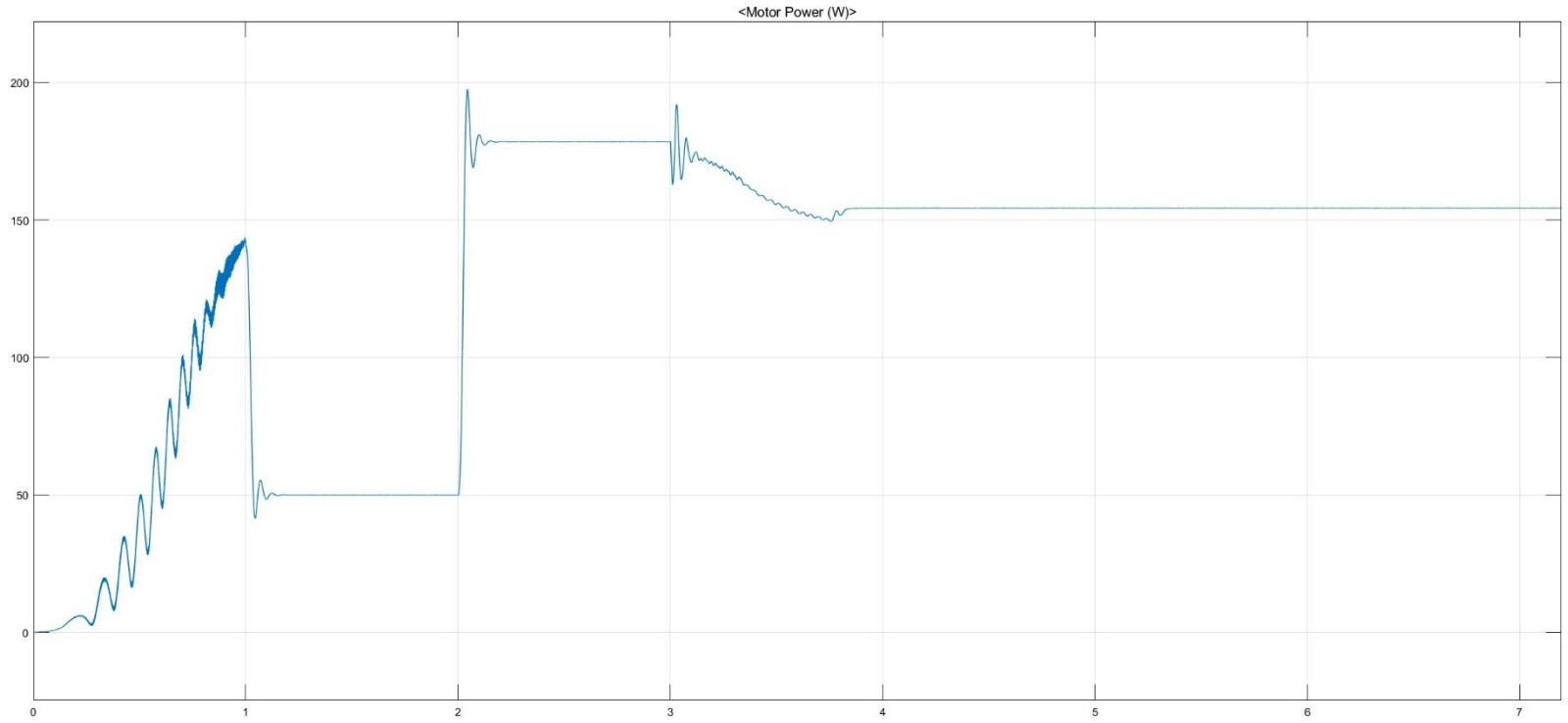
Fluks dostiže limit



Faktor snage – limit



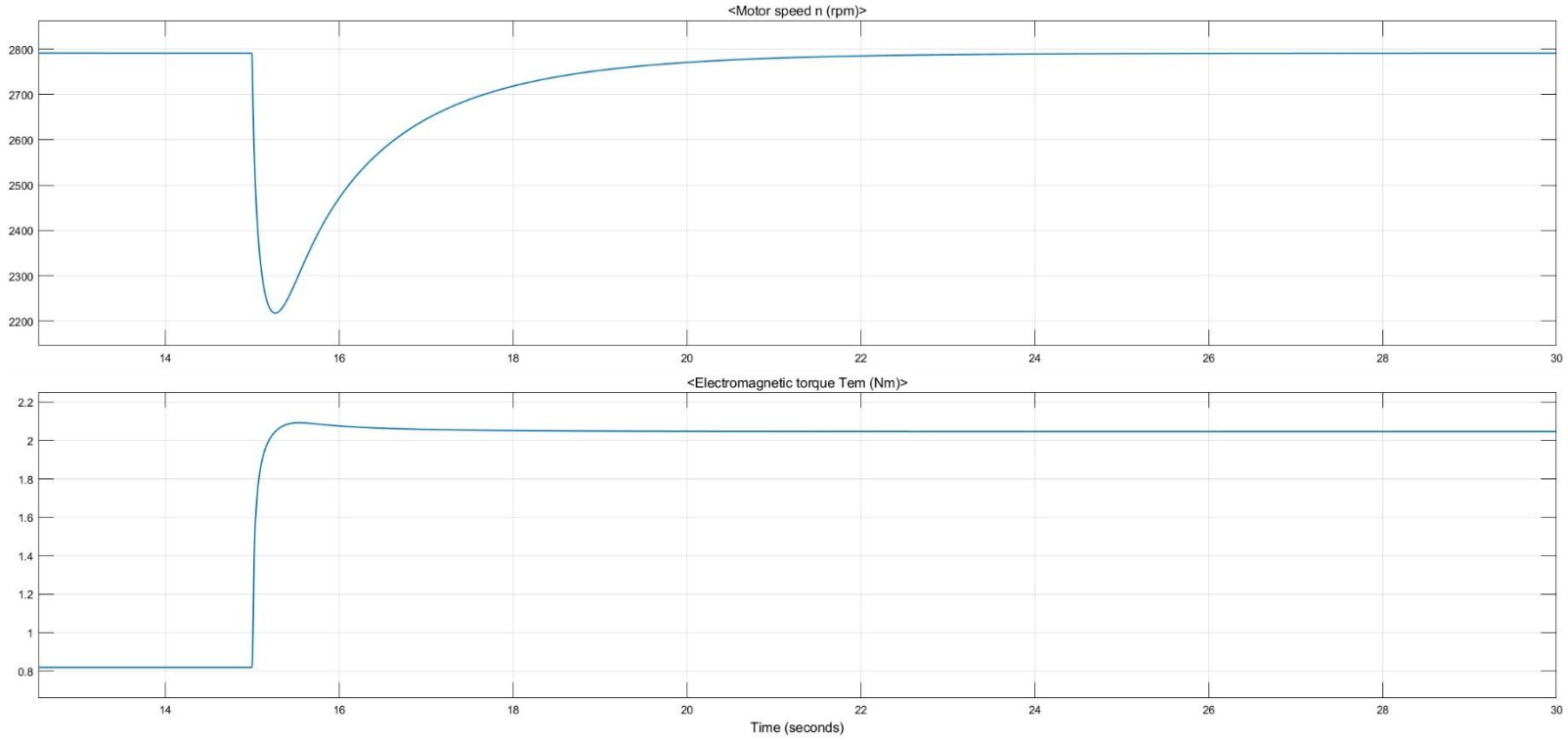
Ulazna snaga – limit



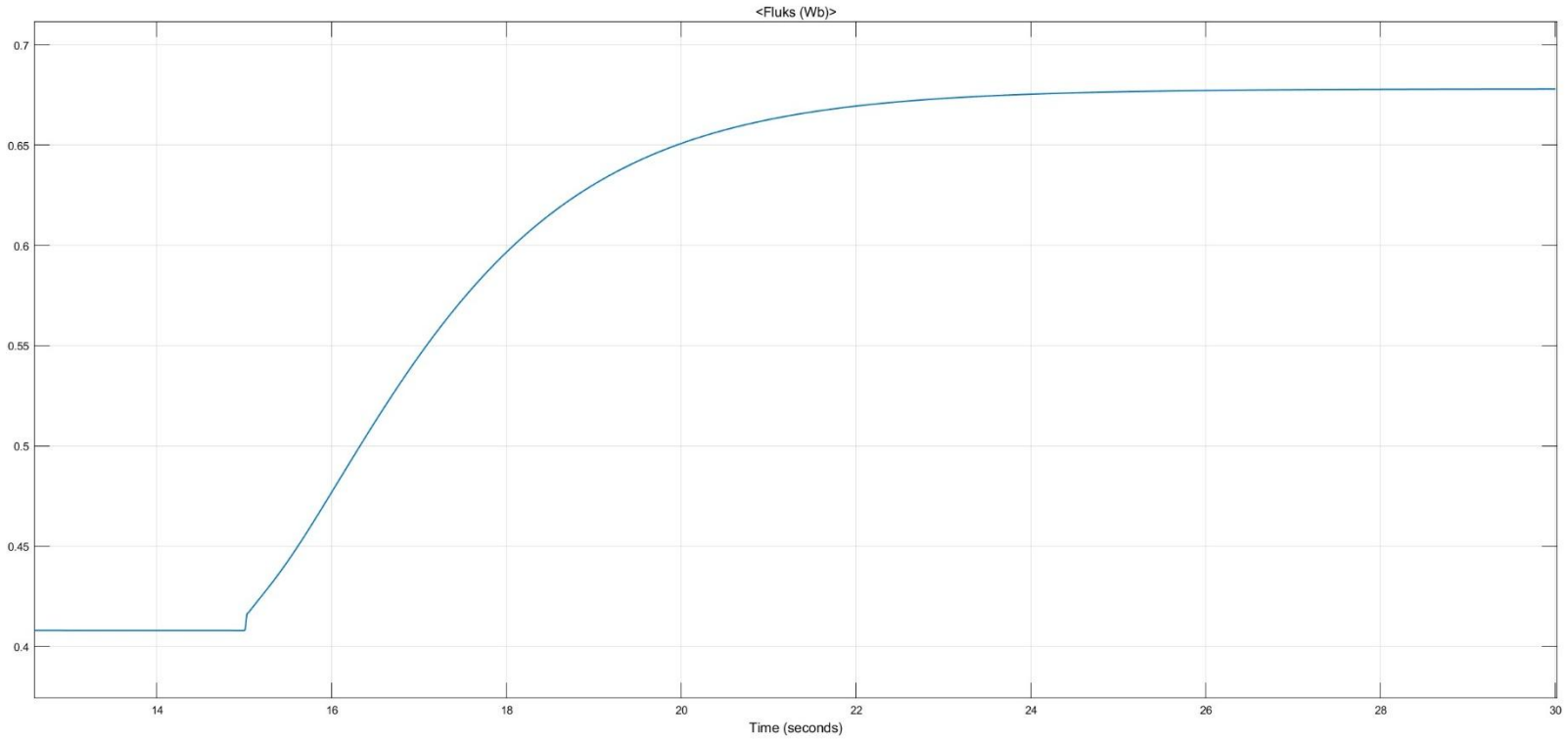
Naglo povećanje opterećenja

- Motor se iz podopterećenog stanja opterećuje nominalnim momentom (step funkcija)
- Brzina je nominalna
- Prvobitno opterećenje diktira vrednost fluksa u mašini
- Postoji opasnost od reversa ukoliko fluks nema dovoljno veliku vrednost

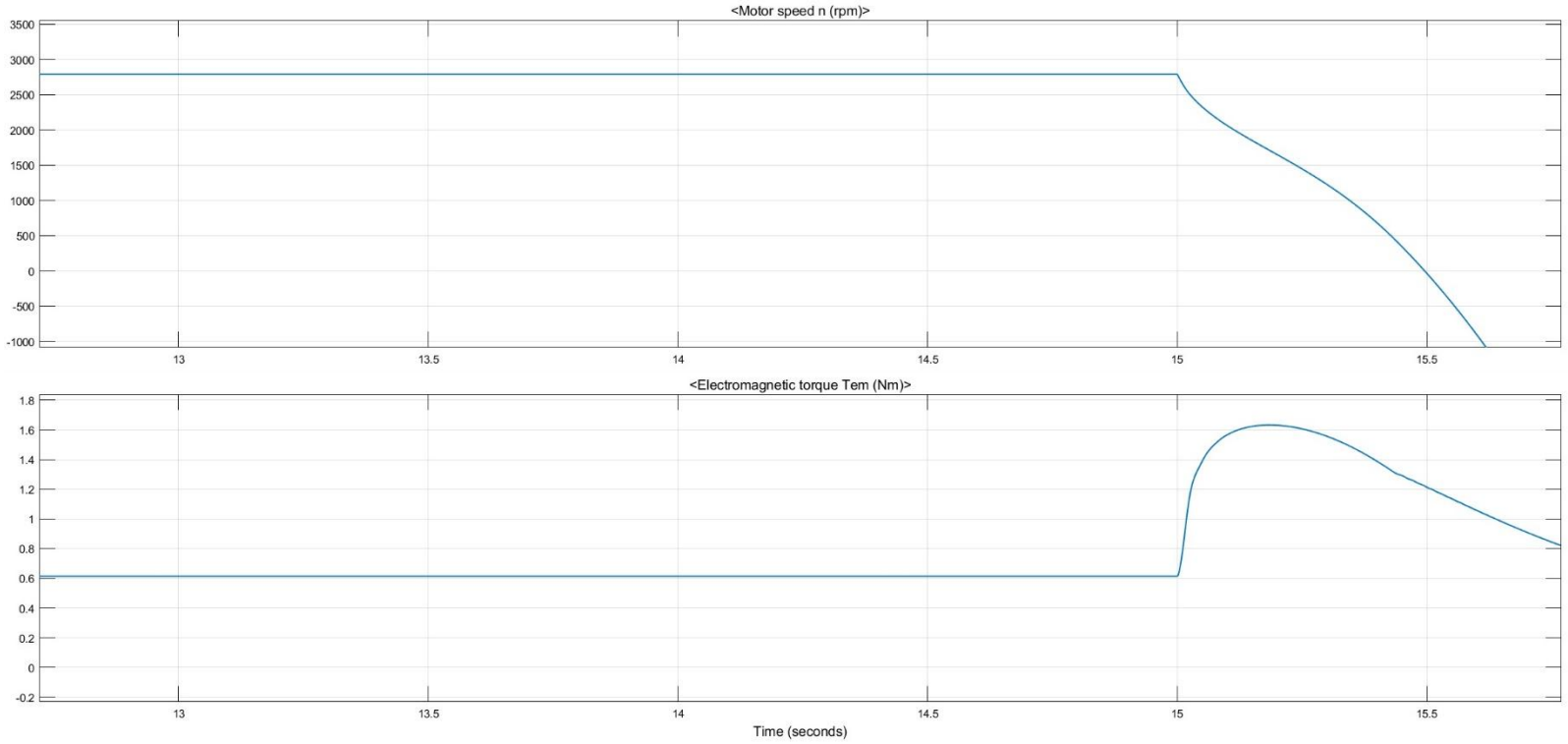
Opterećenje sa 40% na 100%



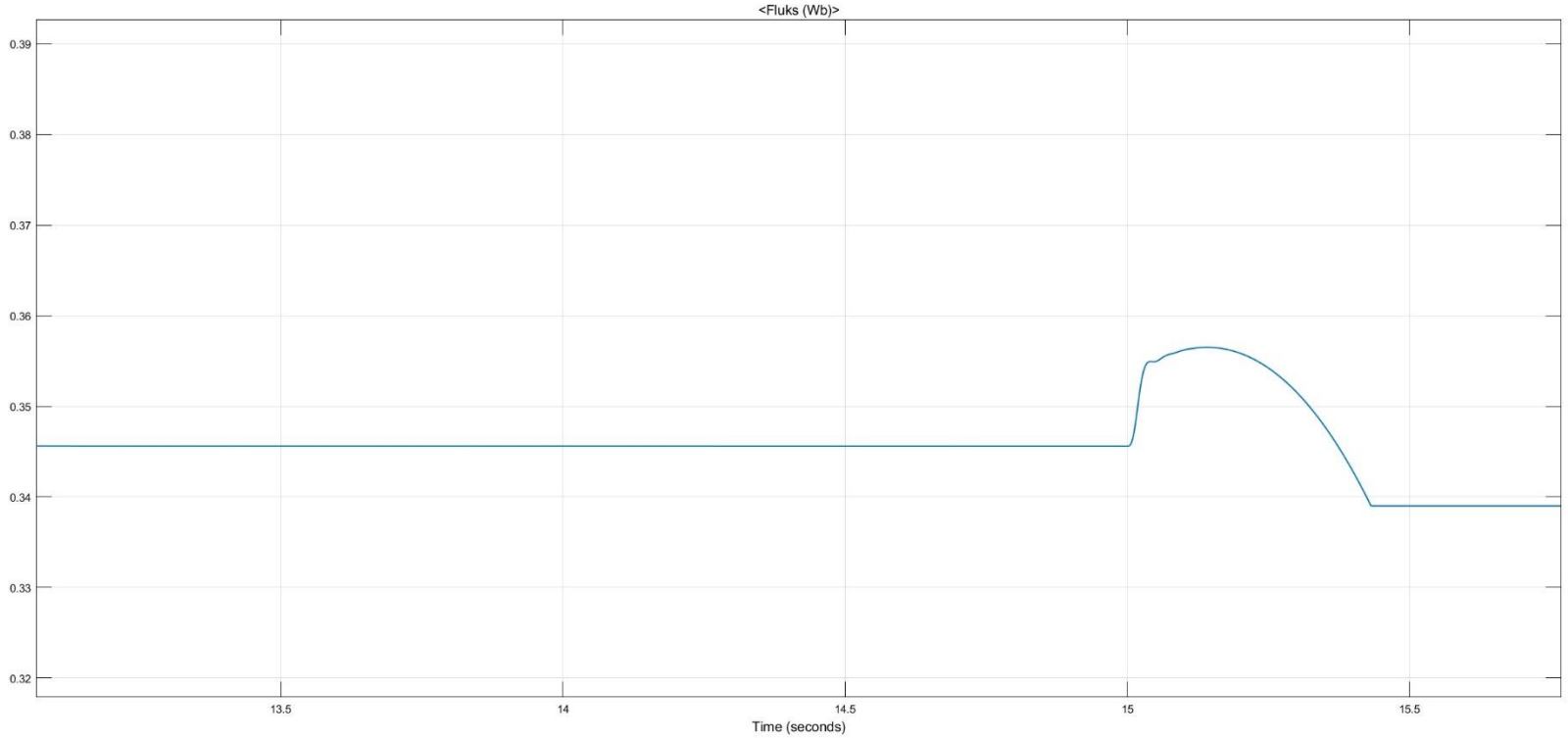
Fluks


<Fluks (Wb)>
0.7
0.65
0.6
0.55
0.5
0.45
0.4
14
16
18
20
22
24
26
28
30
Time (seconds)

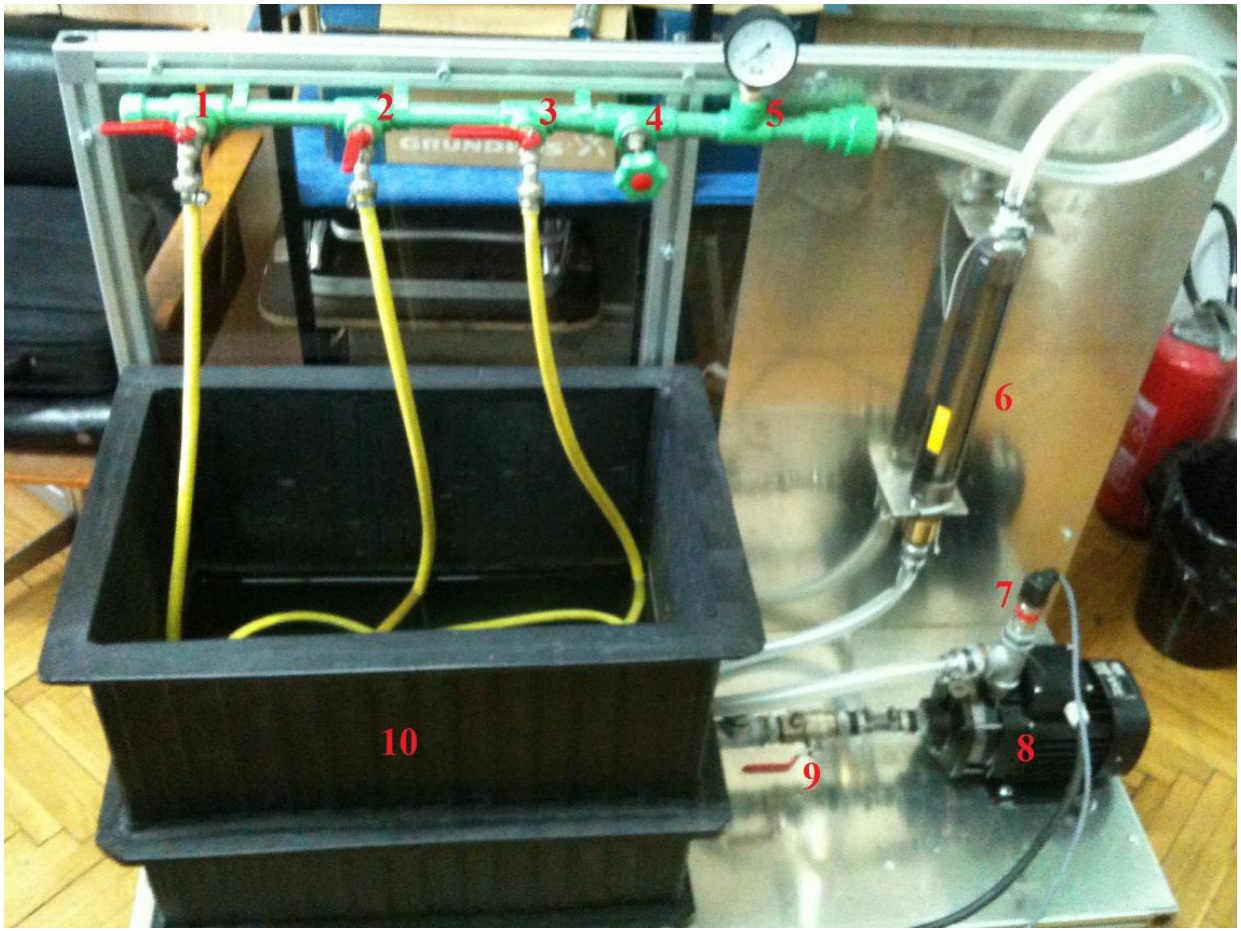
Opterećenje sa 30% na 100%



Fluks


<Fluks (Wb)>
0.39
0.38
0.37
0.36
0.35
0.34
0.33
0.32
13.5
14
14.5
15
15.5
Time (seconds)

Laboratorijska merenja



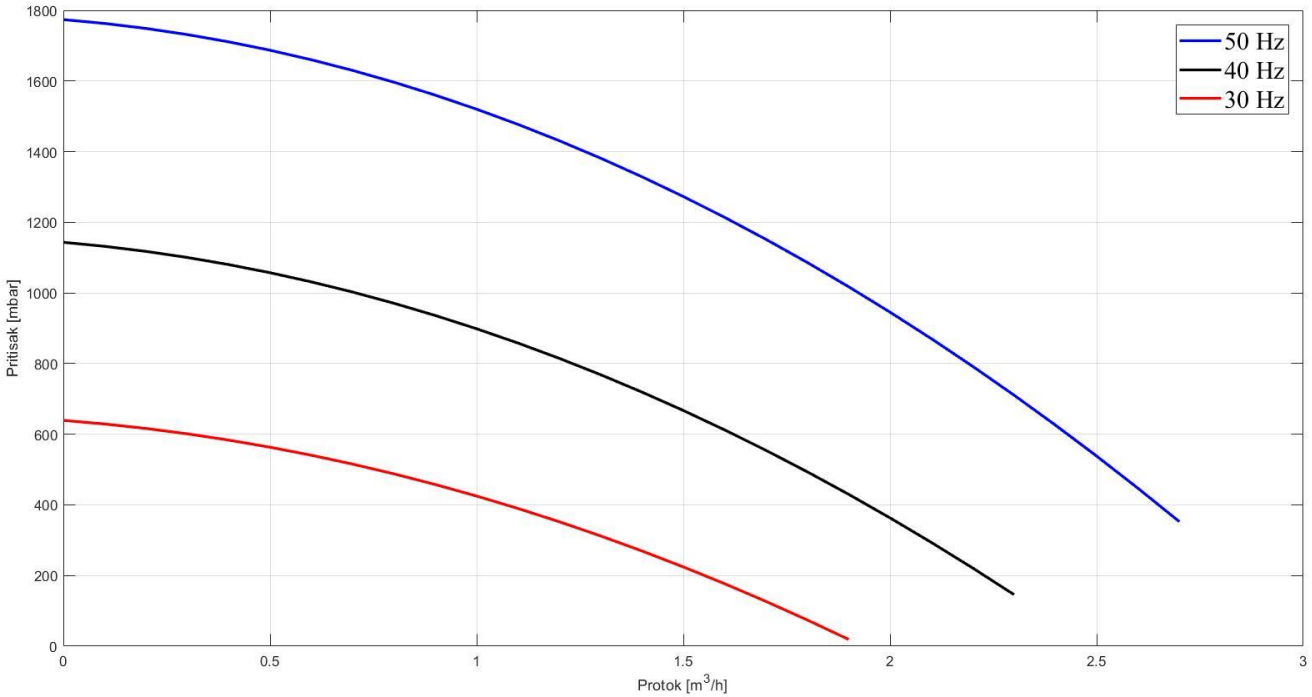
Danfoss Aqua Drive

Laboratorijski model., Brojevima je označeno:
1,2,3 – slavine; 4 – nepovratni ventil; 5 – pokazivač pritiska
6 – merač protoka; 7 – senzor pritiska; 8 – motor i pumpa; 9 – dovodni ventil; 10 – rezervoar.

Snimanje karakteristika

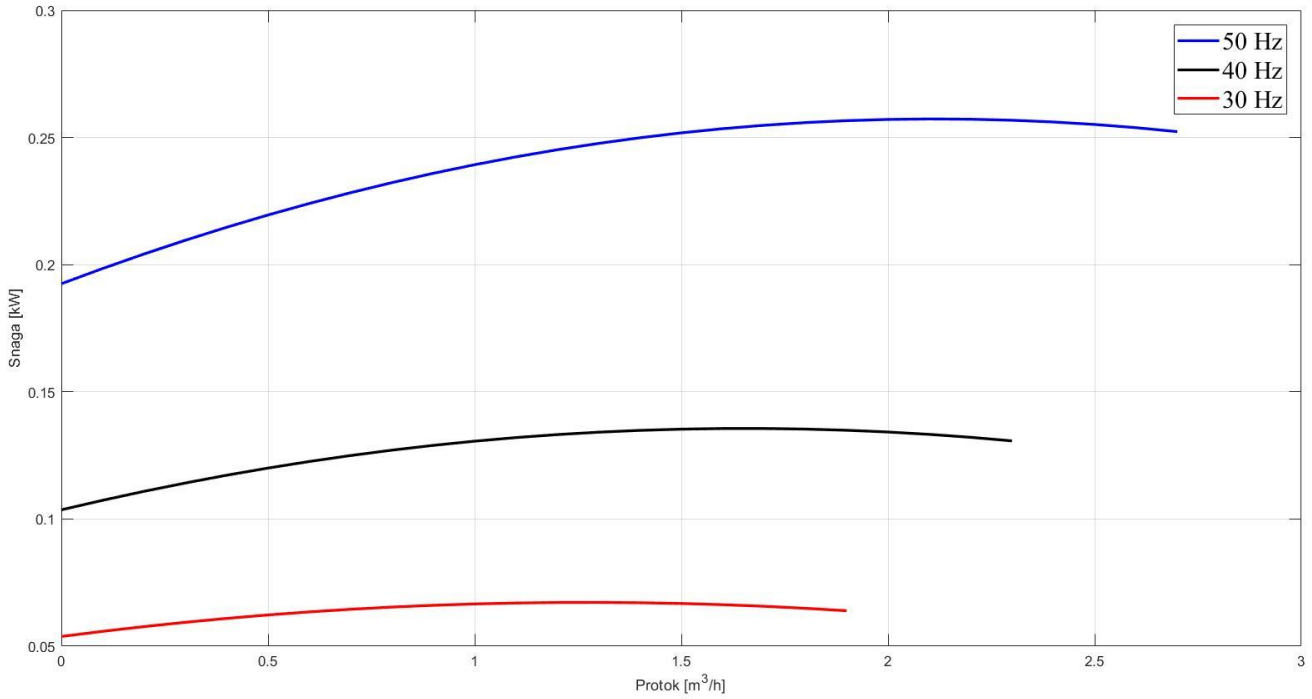
- Za jedan položaj slavina menja se brzina obrtanja:
- Snima se zavisnost pritiska od protoka – karakteristika sistema
- Krive fitovane na osnovu merenih vrednosti

Zavisnost pritiska od protoka

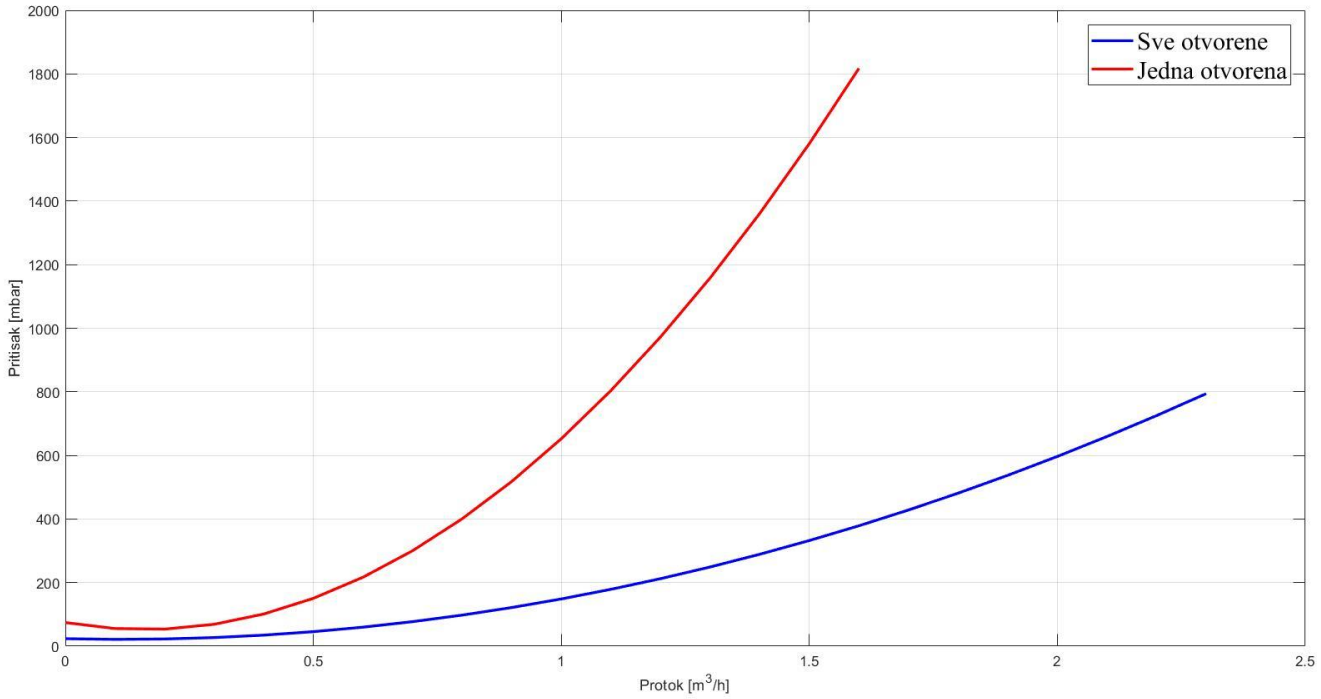


Karakteristike pumpe za zadatu učestanost i različite sisteme koji obezbeđuju različiti protok

Zavisnost snage pumpe od protoka



Karakteristike sistema



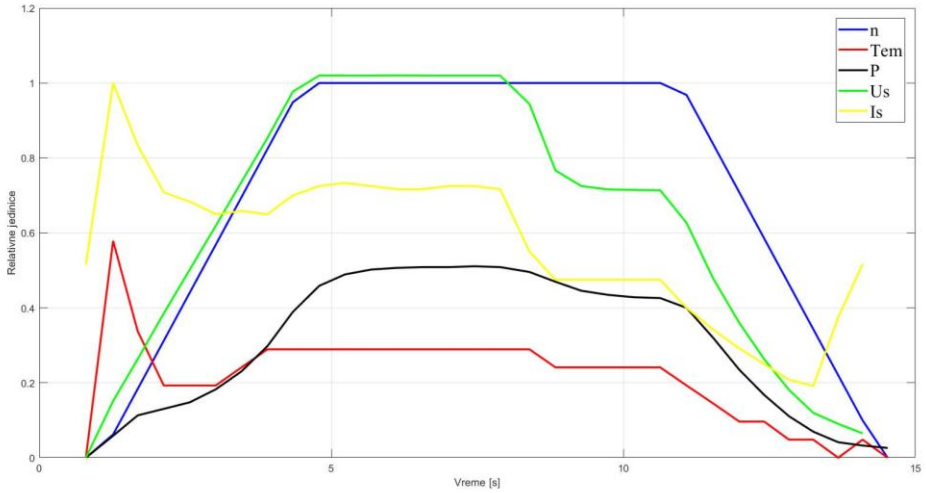
AEO

- Automatic Energy Optimization
- Funkcija Danfoss pretvarača
- Optimizacija fluksa regulacijom faktora snage
- Podešava se referentna vrednost faktora snage, minimalni dozvoljeni fluks, minimalna radna frekvencija

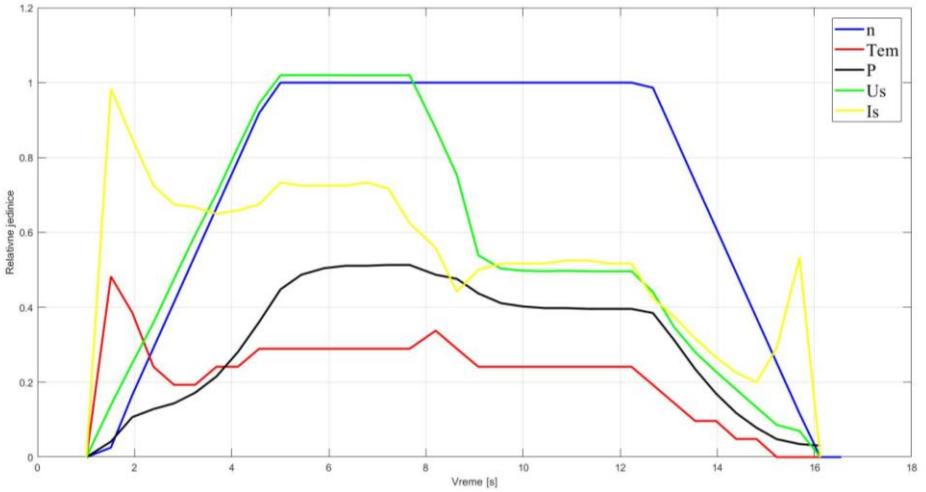
Uspostavljanje optimalne tačke

- Ogledi su vršeni za dve zadate frekvencije 50 Hz i 30 Hz
- Zadate su dve vrednosti faktora snage: 0.85 i 0.68
- Zašto baš 0.68?
- Ispitano je ponašanje pogona u dve krajnje radne tačke sistema: sa minimalnim (RT0) i maksimalnim (RT1) protokom
- Ogled: Pogon se zaleće i radi u ustaljenom stanju u režimu bez optimizacije gubitaka (VT Mode), a zatim se uključuje AEO VT Mode. Nakon uspostavljanja novog ustaljenog stanja pogon se zaustavlja.

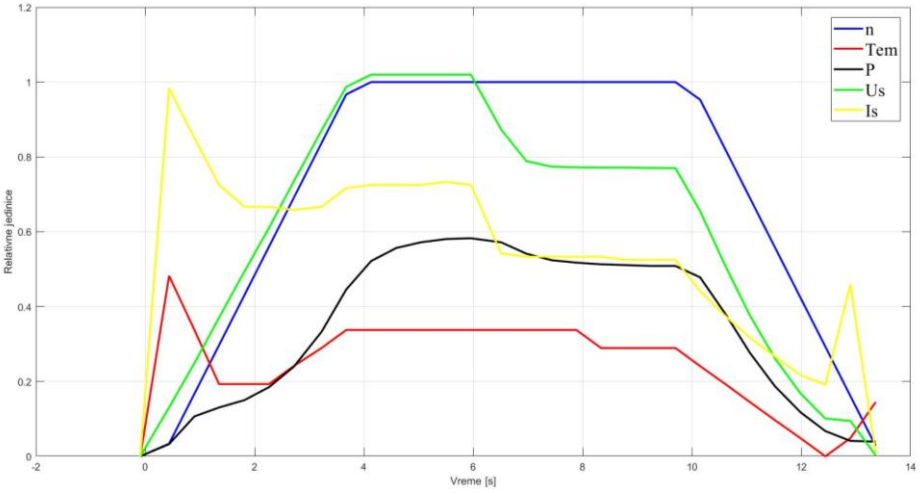
0.68, RT0 (minimalni protok), 50 HZ



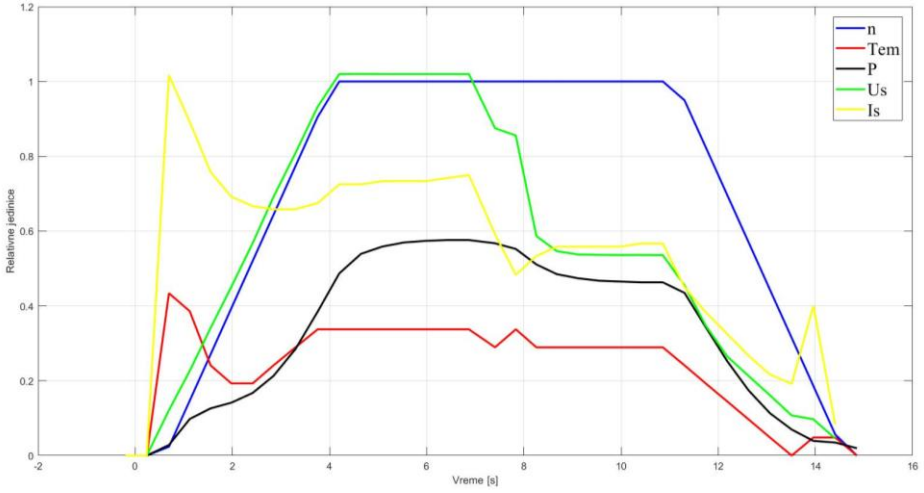
0.85, RT0 (minimalni protok), 50 Hz



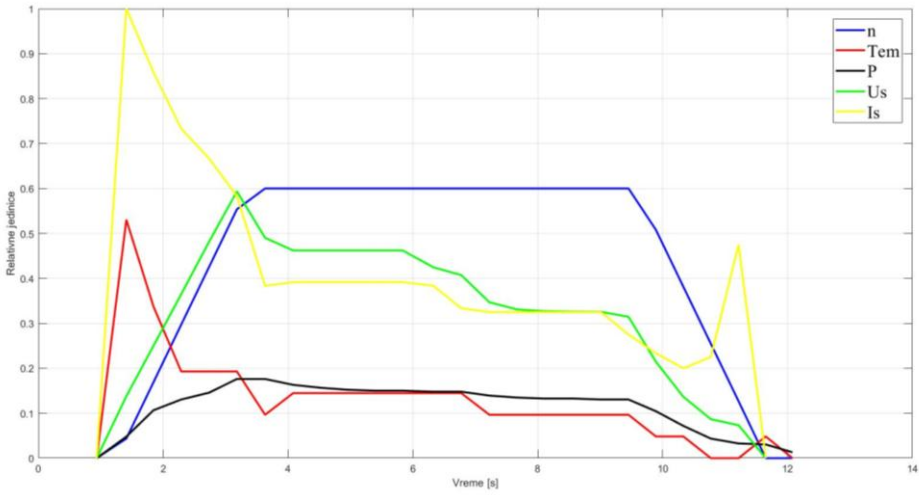
0.68, RT1 (maksimalni protok), 50 Hz



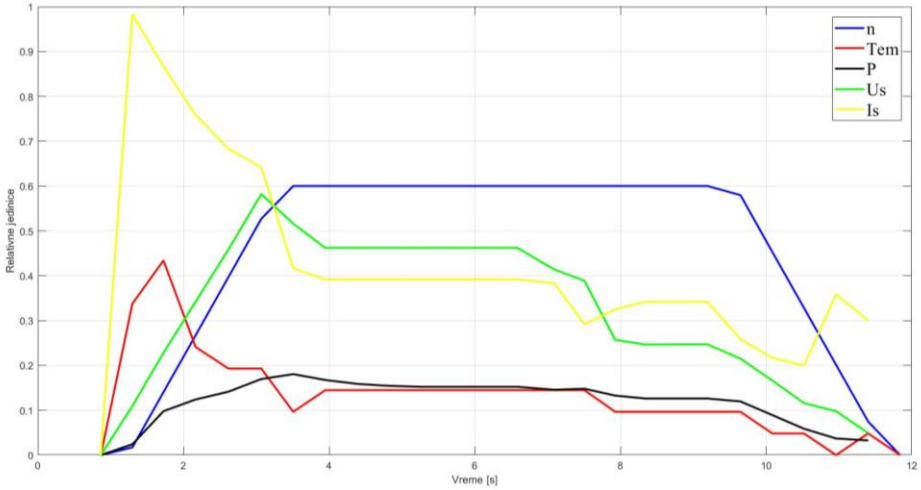
0.85, RT1 (maksimalni protok), 50 Hz



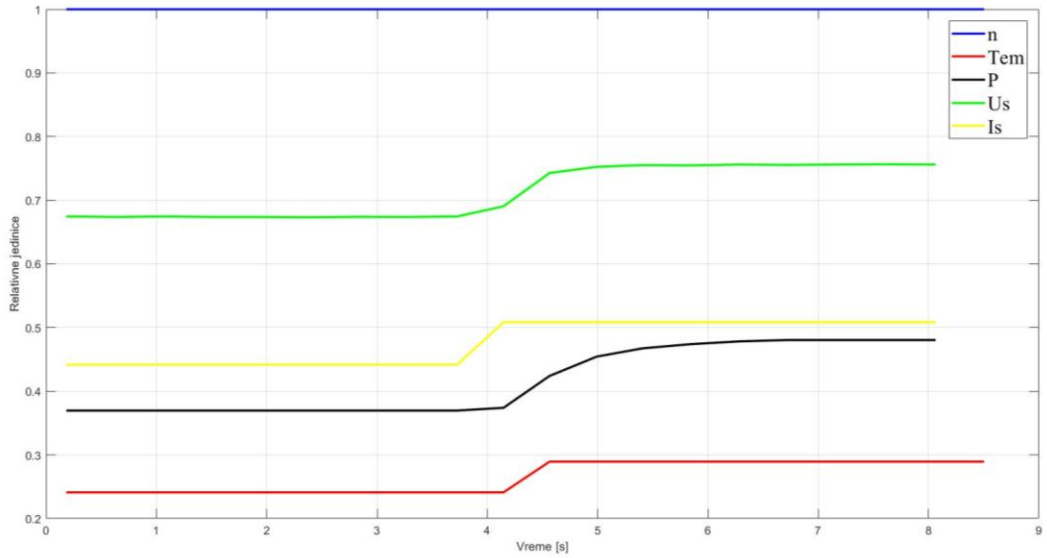
0.85, RT0, 30 Hz



0.68, RT0 30 Hz



Povećanje opterećenja pri AEO 0.85, 50 Hz



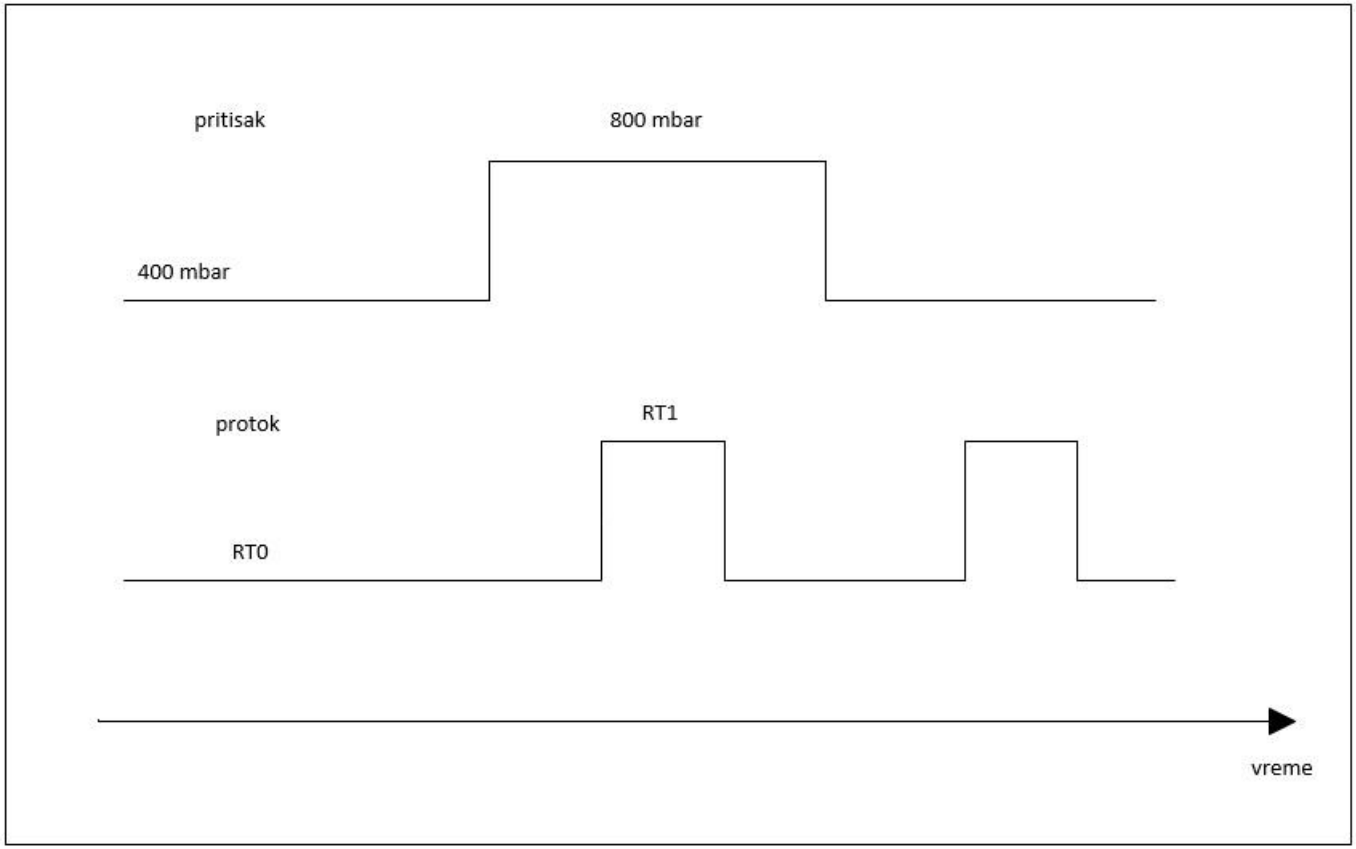
Povećanje opterećenja pri AEO

- Motor u laboratoriji je podopterećen
- Sa datom pumpom i hidrauličkim sistemom nije moguće opteretiti ga sa više od 60 % nominalne snage
- Ispitivano je povećanje opterećenja tako što se prelazilo iz radne tačke sa minimalnom potrošnjom (protokom), u radnu tačku sa maksimalnim protokom – poslednji dijagram na prethodnom slajdu
- Pri tome je podešen nominalni faktor snage (kritičan slučaj)

Rad u zatvorenoj sprezi

- Potreba za regulacijom neke radne veličine (protoka, pritiska)
- Potreban je senzor (davač signala u povratnoj vezi)
- U laboratoriji su rađeni ogledi sa regulacijom pritiska
- Korišćen je Load Cycle
- Podešava se režim Closed Loop u pretvaraču

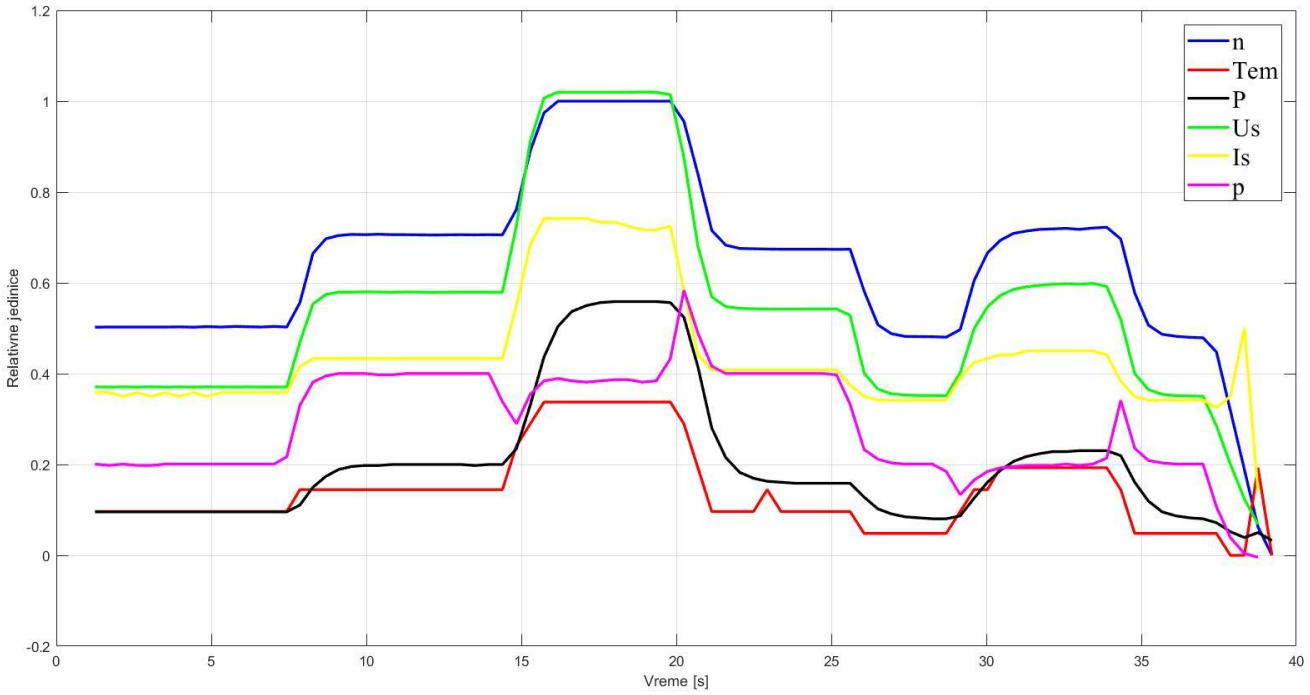
Load Cycle



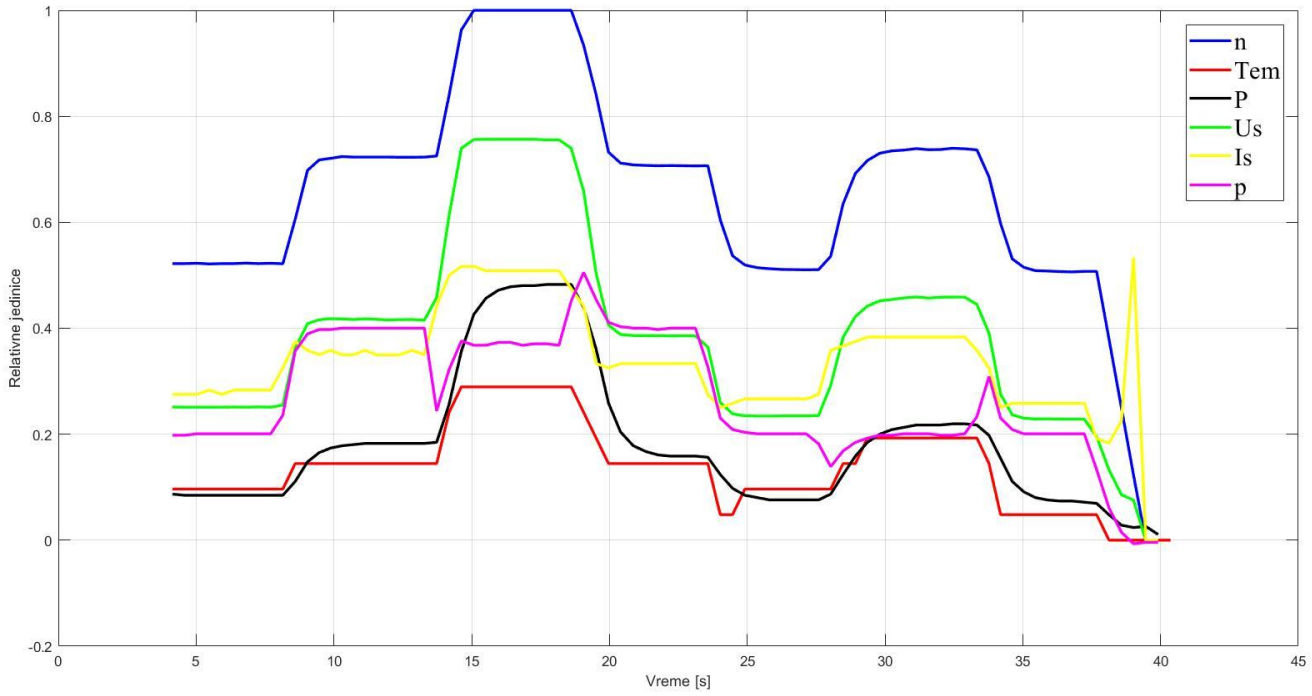
Ponašanje laboratorijskog modela

- Pogon je puštan u Load Cycle za dve vrednosti faktora snage
- Ispitano je i ponašanje pogona u normalnom radnom režimu (bez optimizacije fluksa)

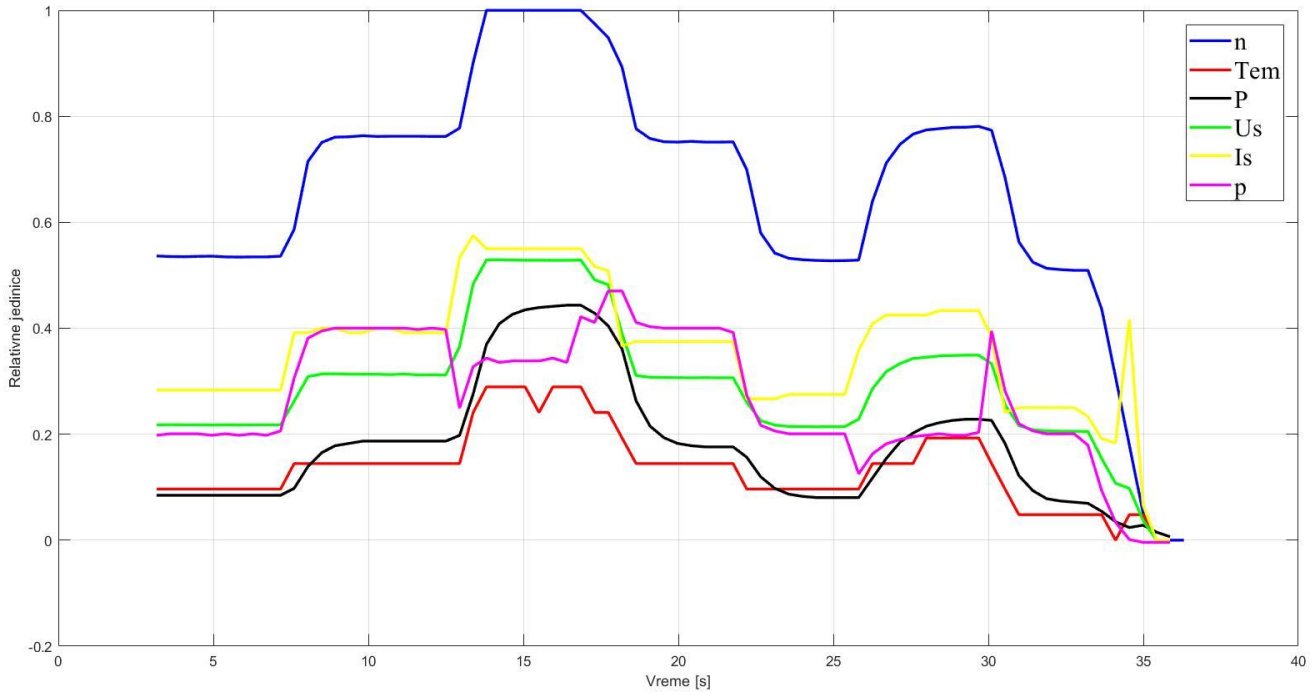
Load Cycle AEO OFF



AEO sa cosPHI = 0.68



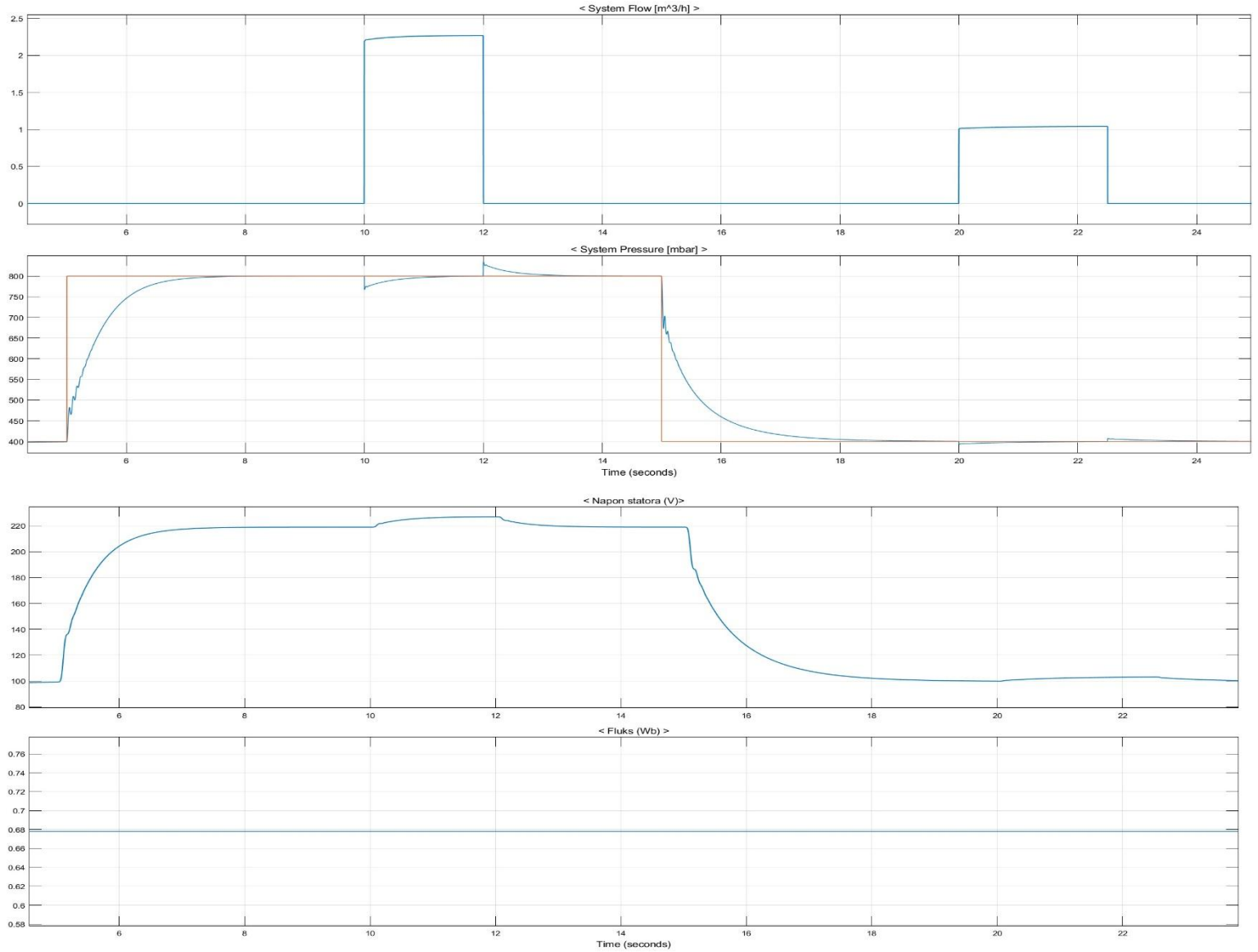
AEO sa cosPHI = 0.85



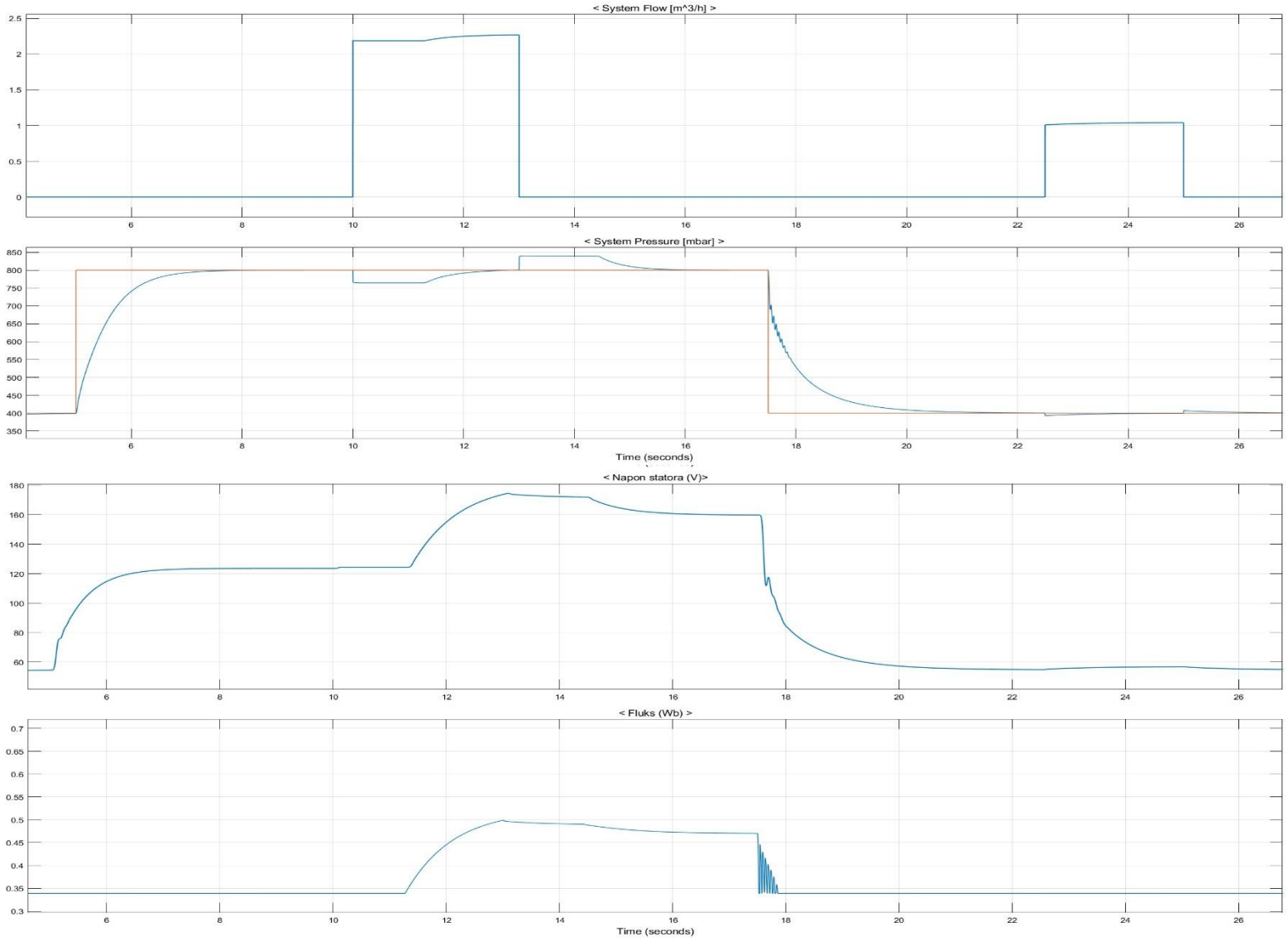
Simulacioni model u Load Cycle

- Da li je moguće postići zadati pritisak u svim stanjima sistema u režimu sa smanjenim fluksom?
- Razlike u odnosu na laboratorijski model

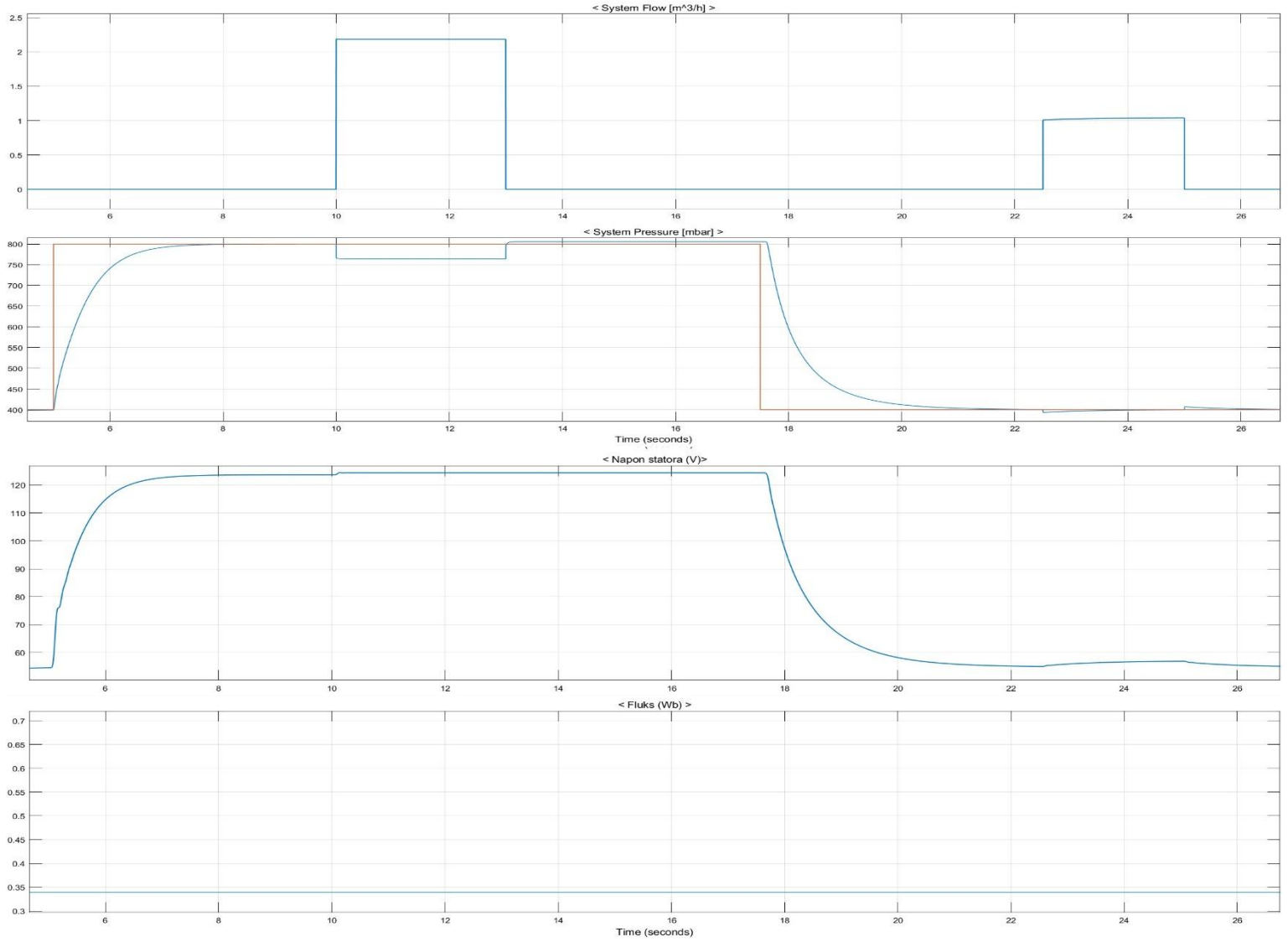
AEO OFF


< System Flow [m^3/h] >
< System Pressure [mbar] >
Time (seconds)
< Napon statora (V)>
< Fluks (Wb) >
Time (seconds)

AEO 0.68


< System Flow [m^3/h] >
< System Pressure [mbar] >
Time (seconds)
< Napon statora (V)>
< Fluks (Wb) >
Time (seconds)

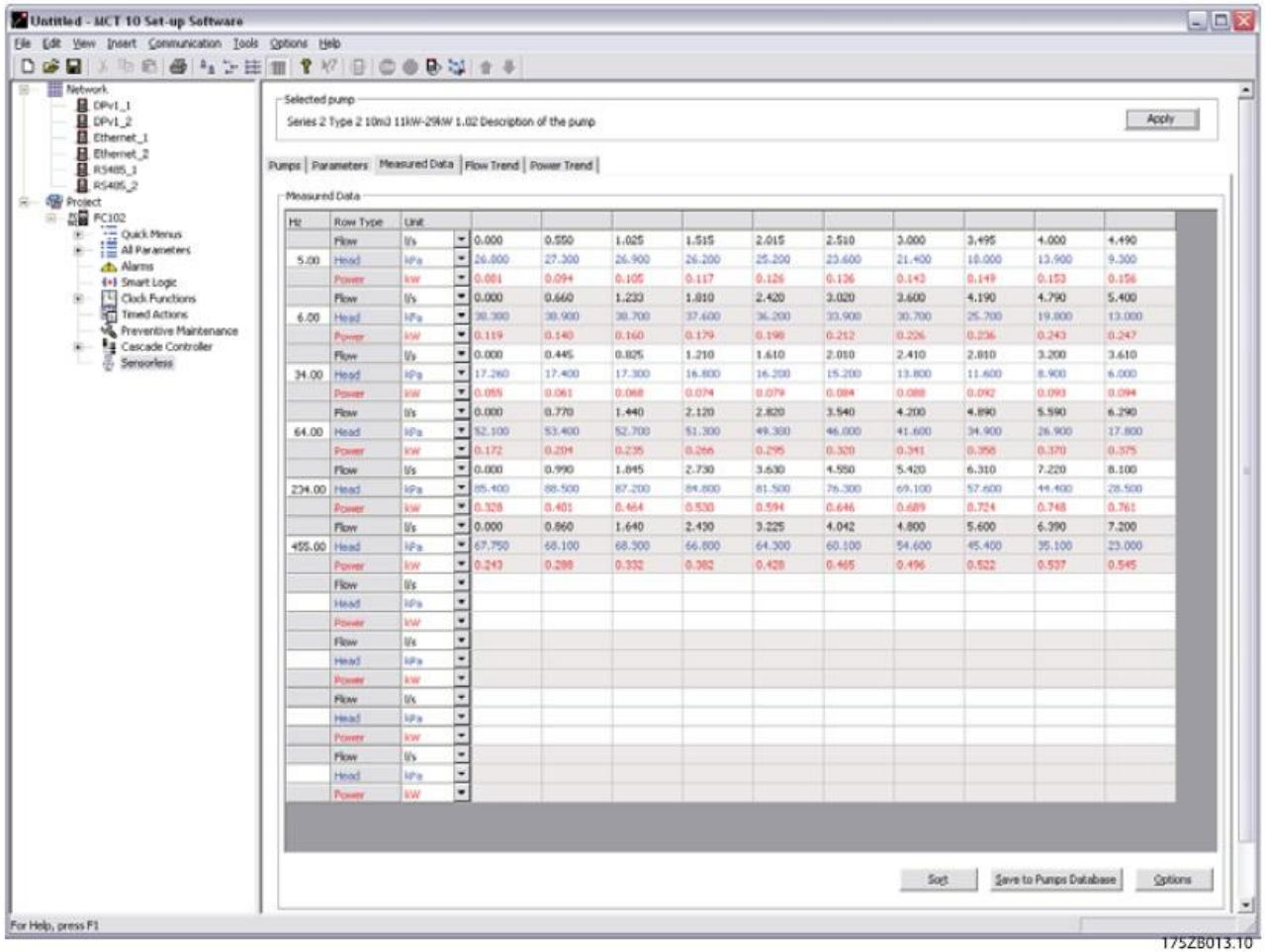
AEO 0.85


< System Flow [m^3/h] >
< System Pressure [mbar] >
Time (seconds)
< Napon statora (V)>
< Fluks (Wb) >
Time (seconds)

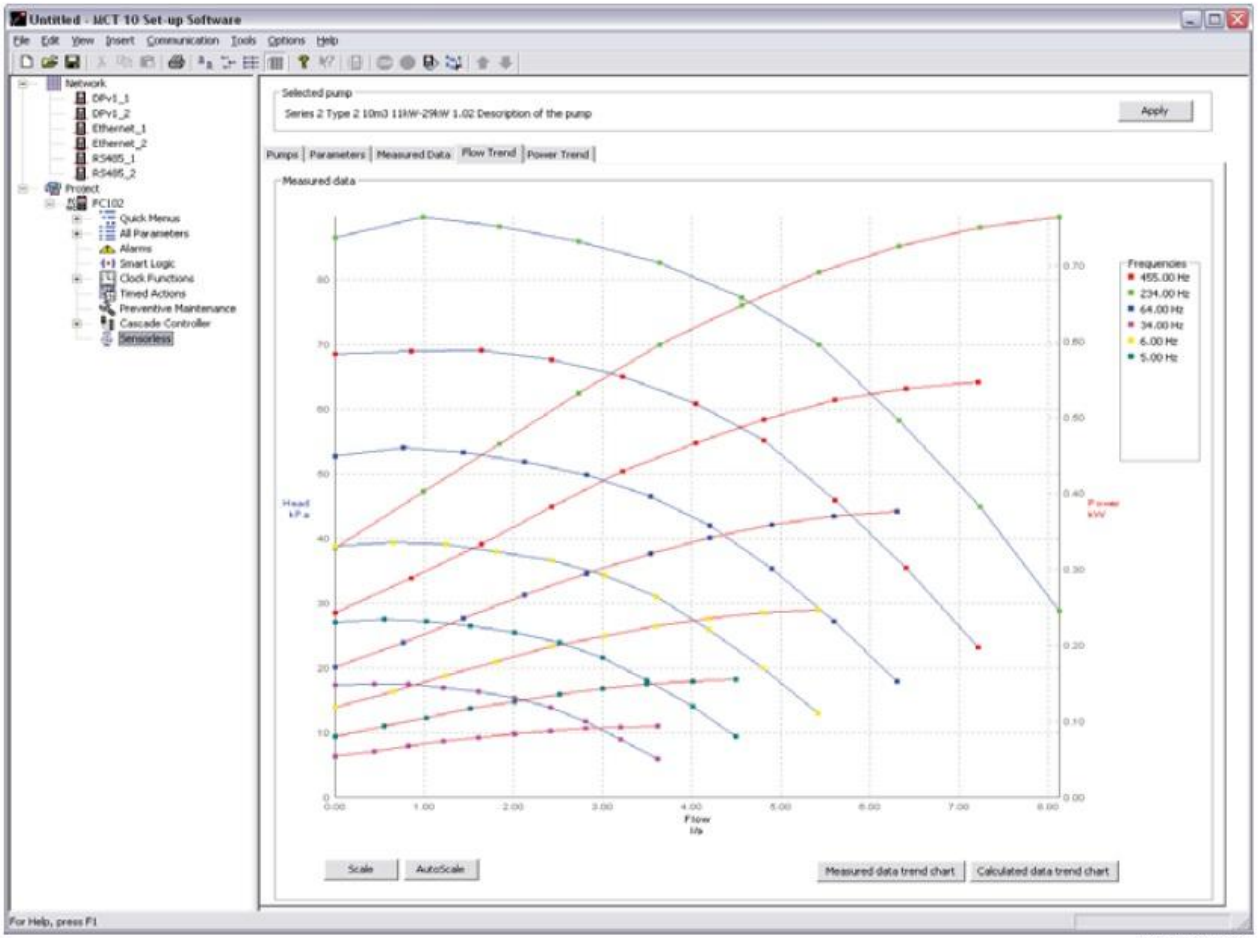
Sensorless

- Funkcija Danfoss pretvarača koja bi trebalo da obezbedi regulisanje radne veličine bez senzora
- Merenjem ulazne snage motora i poznavanjem trenutne frekvencije, moguće je proceniti protok i pritisak u sistemu
- Potrebno je uneti krive pritiska i snage u zavisnosti od protoka za naekoliko različitih frekvencija, kako bi algoritam za estimaciju mogao da radi

Unošenje podataka

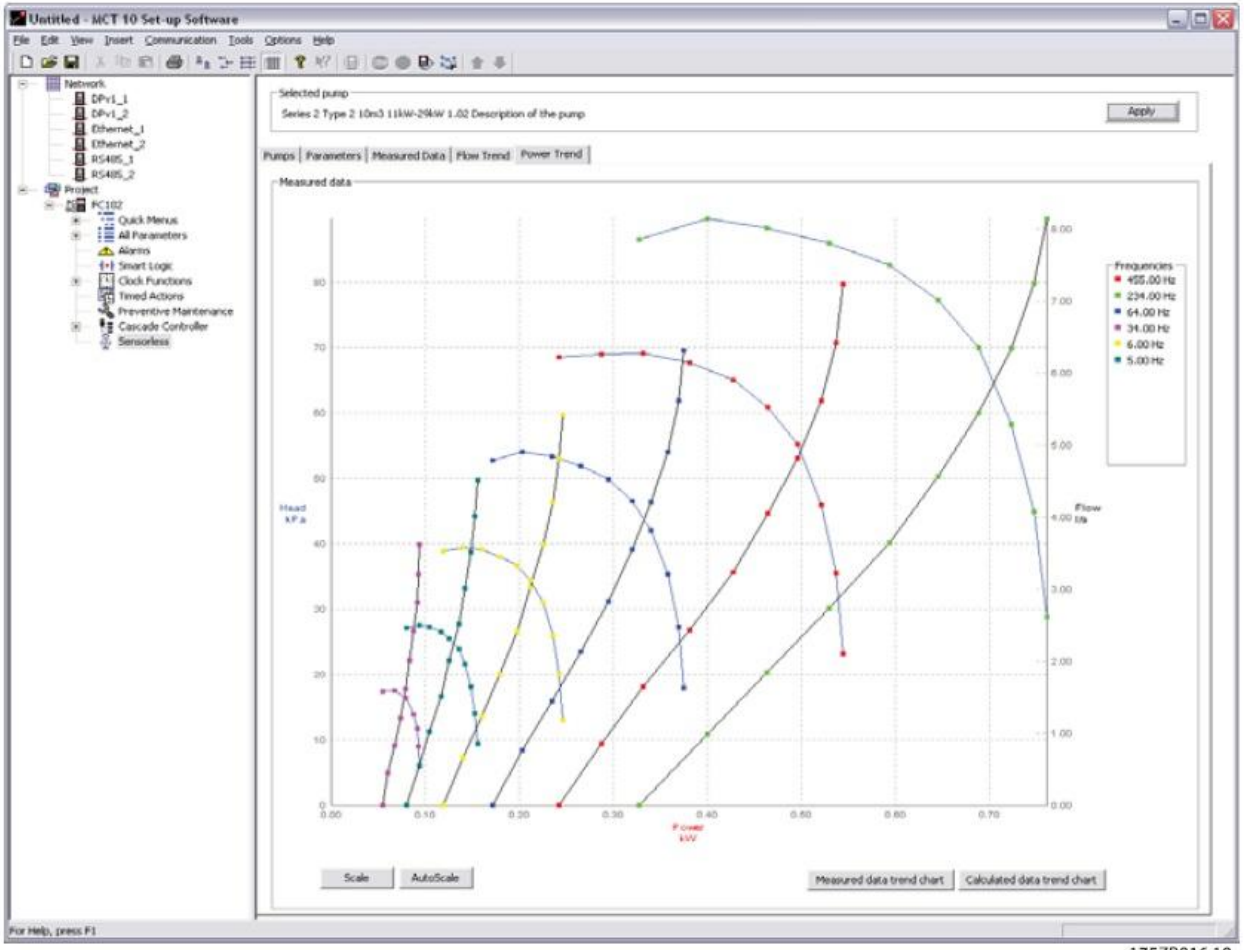


Flow trend



175ZB015.10

Power trend



175ZB016.10

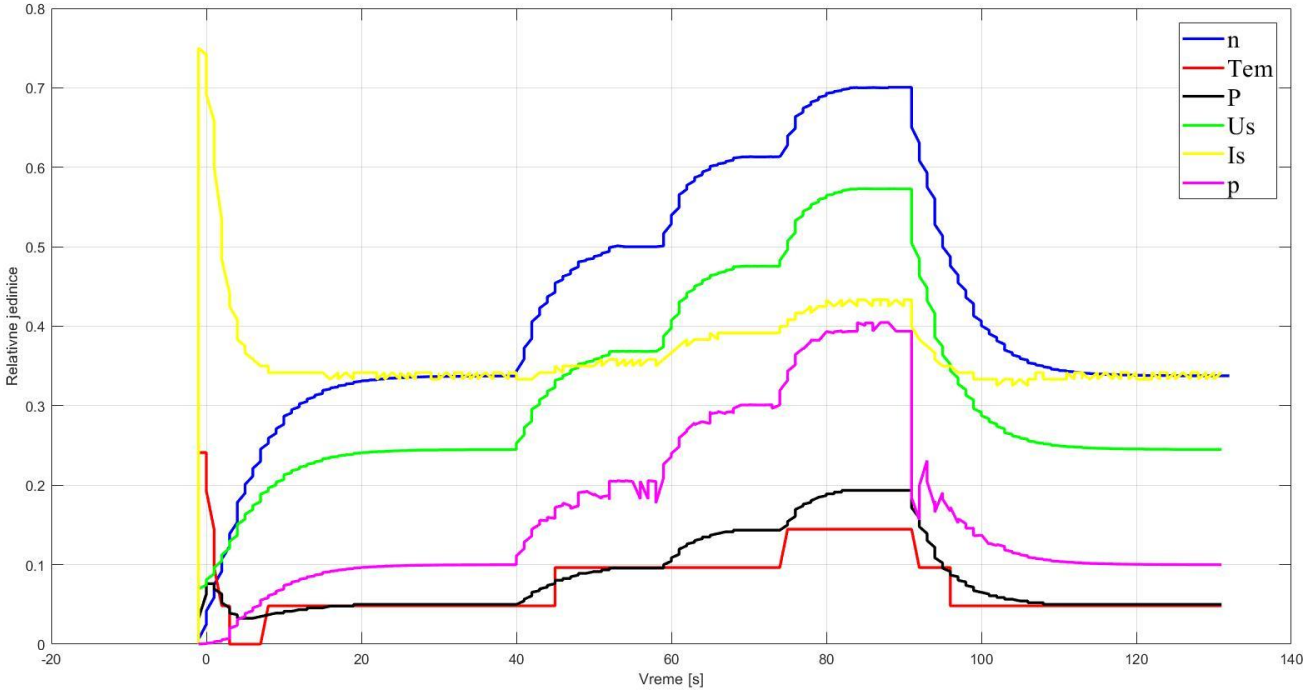
Ograničenja

- Jednoznačan odnos snage i protoka. (Nije moguće uneti istu vrednost snage za dve različite vrednosti protoka).
- Radijalni impeler centrifugalne pumpe. (Sensorless kontrola daje najbolje rezultate u primenama sa centrifugalnim pumpama sa radijalnim impelerom, dok na pumpama sa aksijalnim impelerom ne može da radi usled oblika krive zavisnosti pritiska od protoka).
- Kontrola bez senzora može da se primeni samo na tečnosti koje se smatraju nestišljivim, kao što je voda. Takođe, ova kontrola može da se implementira samo u *Variable Torque Mode.*
- Kriva snage u zavisnosti od protoka je ravna pri velikim protocima u sistemima sa malim hidrauličkim otpornostima.
- Nije moguća estimacija van merenog opsega protoka i frekvencija.
- Preporučuje se rad Sensorless regulatora što bliže čistom integratoru (malo proporcionalno dejstvo).

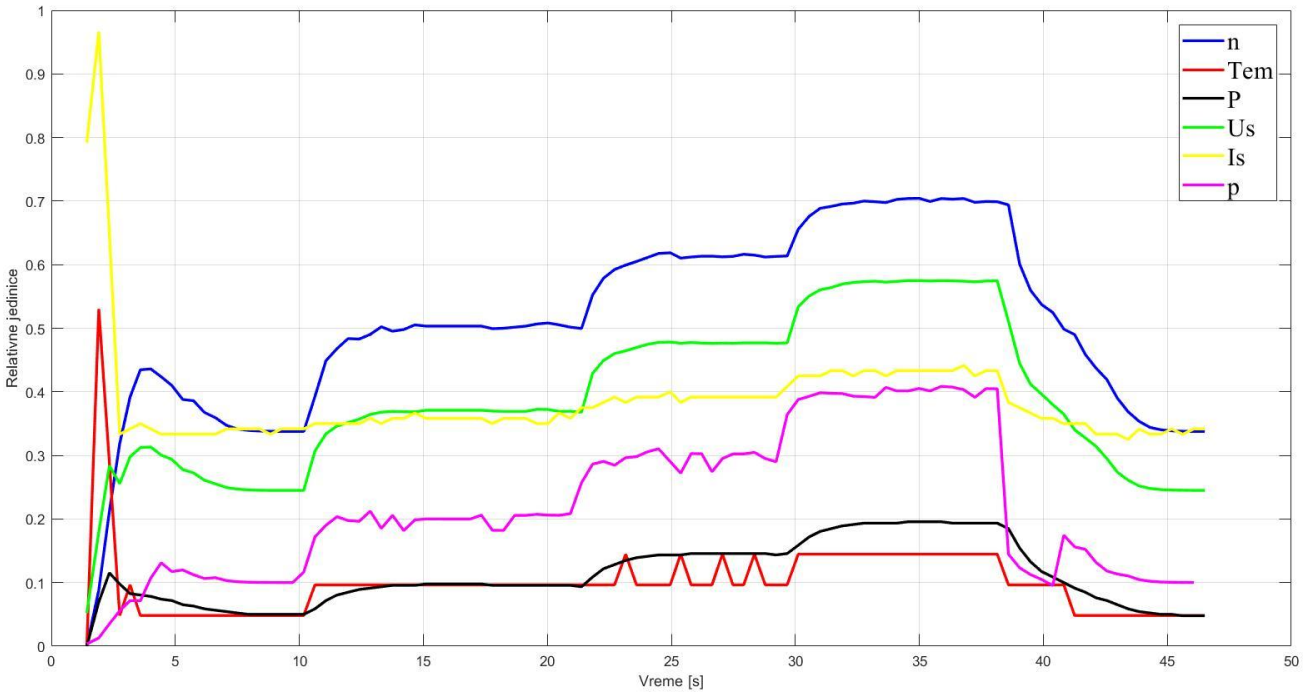
Promena reference za različita proporcionalna pojačanja

- Podešava se proporcionalno pojačanje Sensorless regulatora
- Da li je opravdana preporuka proizvođača da PI regulator radi što bliže čistom integratoru?
- Preporučena je vrednost Kp = 0.05
- Reference pritiska su, redom: 1, 2, 3, 4, 1 rel. jed.

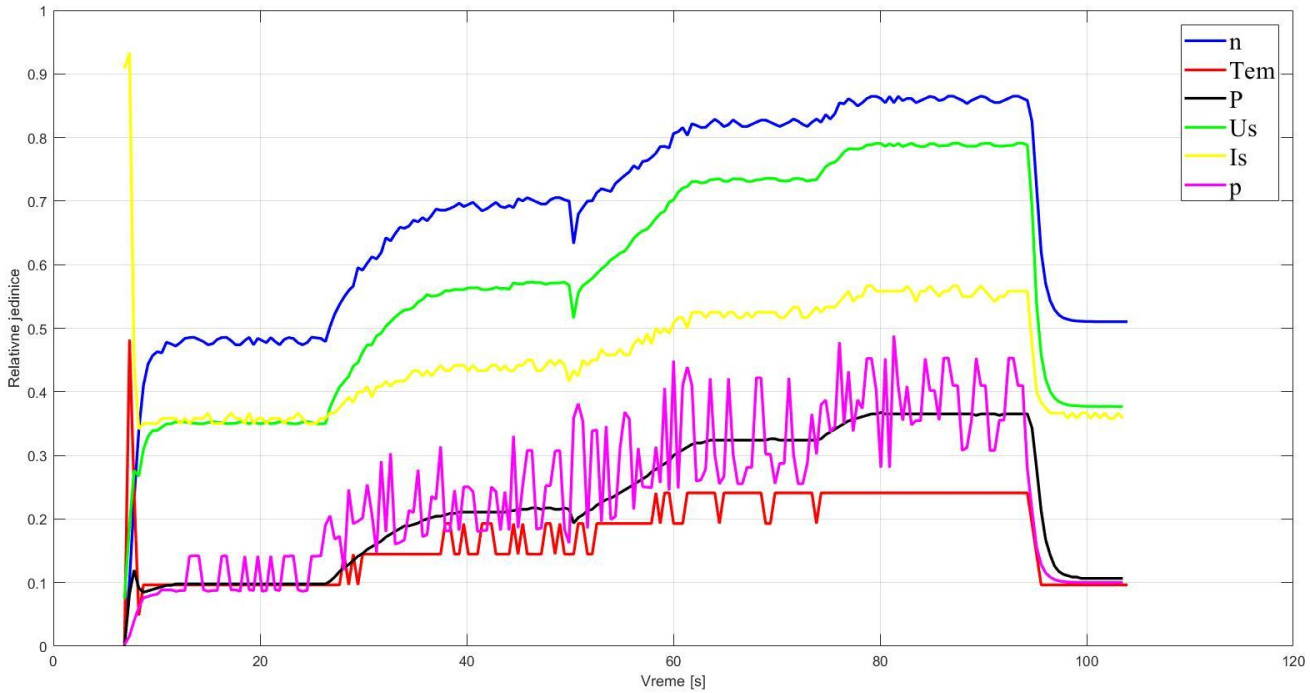
Kp = 0.05, RT0


n
Tem
P
Us
Is
p
Relativne jedinice
Vreme [s]
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-20
0
20
40
60
80
100
120
140

Kp = 0.5, RT0


n
Tem
P
Us
Is
p
Relativne jedinice
Vreme [s]
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50

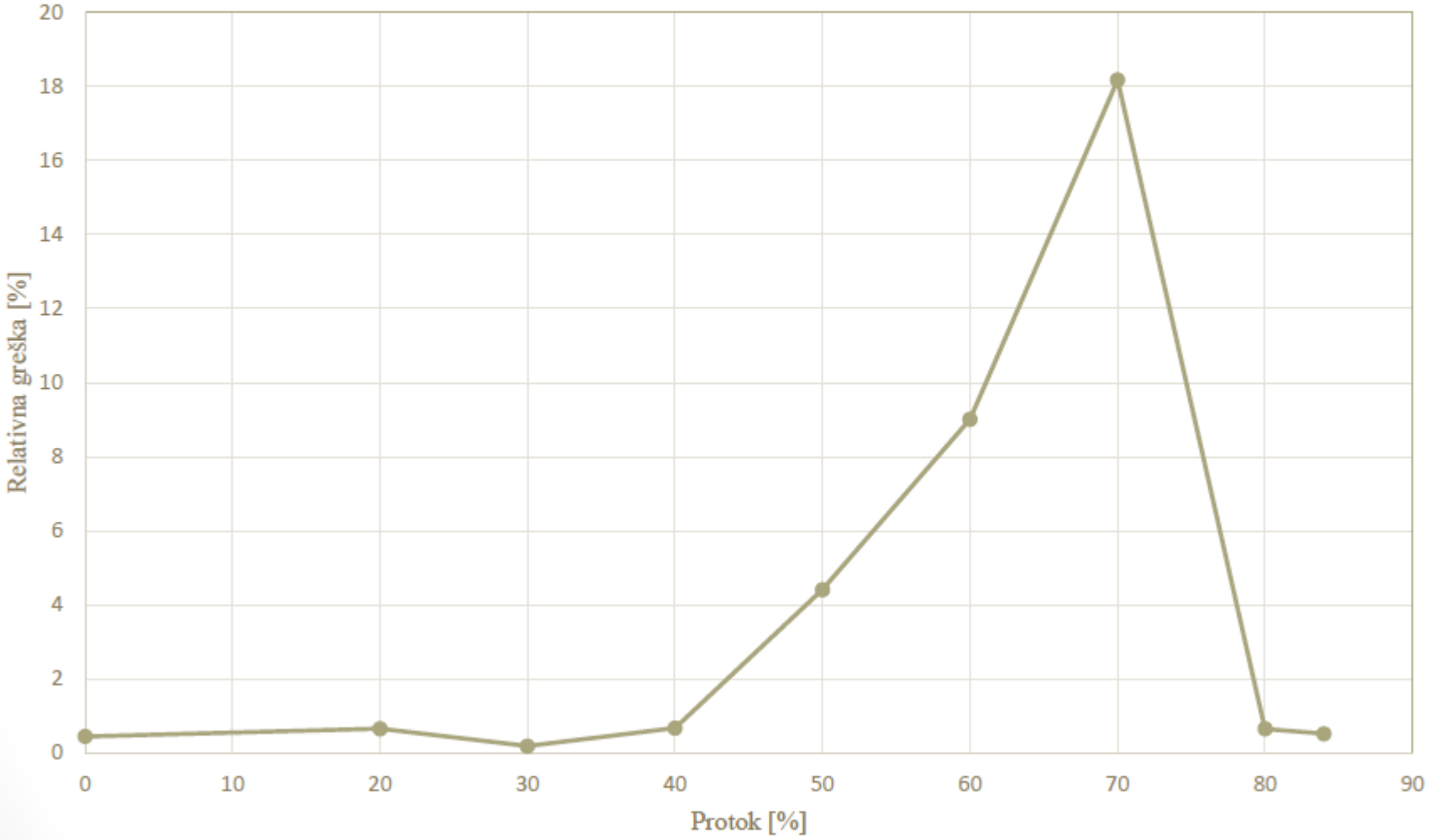
Kp = 0.5, RT1


n
Tem
P
Us
Is
p
Relativne jedinice
Vreme [s]
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0
20
40
60
80
100
120

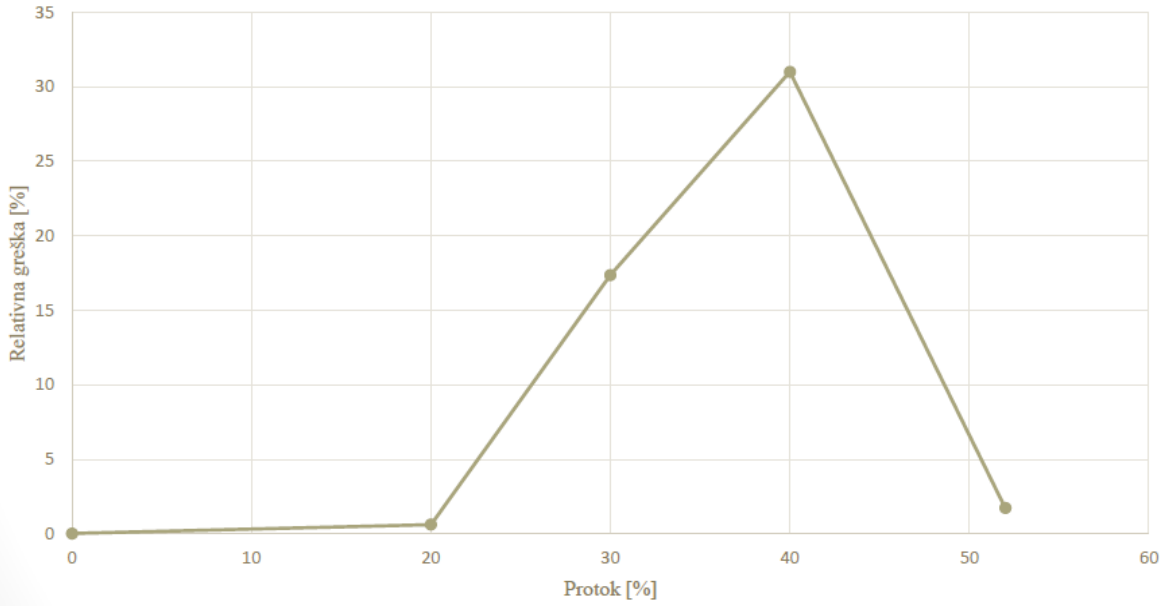
Greška u estimaciji pritiska

- Ispitana je razlika u merenoj i estimiranoj vrednosti pritiska u Open Loop režimu
- Pri konstantnoj učestanosti se varira protok u sistemu
- Izračunata je relativna greška estimiranog pritiska u zavisnosti od protoka

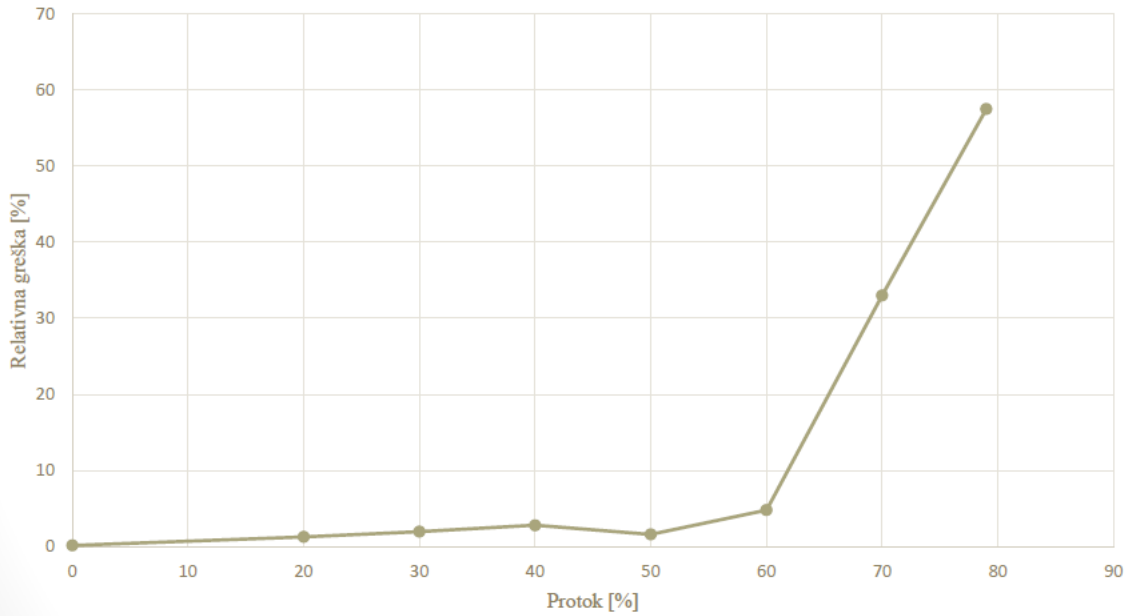
Relativna greška na 50 Hz



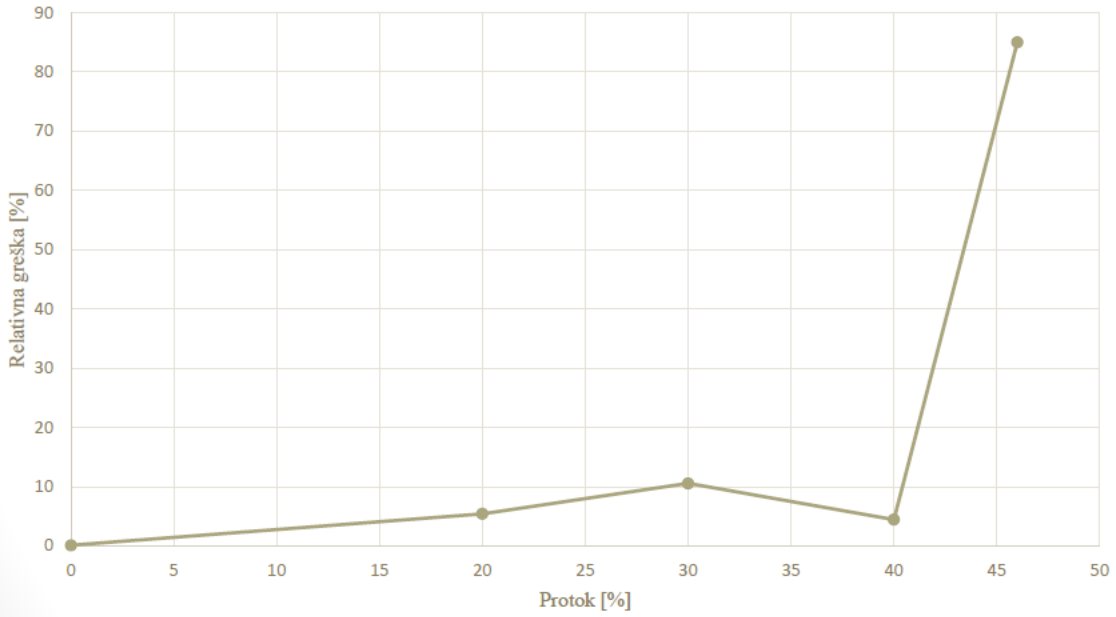
Relativna greška na 30 Hz



Relativna greška na 47 Hz



Relativna greška na 37 Hz



Sensorless + AEO

- Da li je moguće istovremeno korisititi obe specijalizovane funkcije?
- Ogledi rađeni sa Load Cycle
- Očitavane su stvarne vrednosti pritiska i poređene sa referentnom vrednošću

Stanja sistema

Stanje	Referentni pritisak [mbar]	Otvorenost slavina [%]
1	400	0
2	800	0
3	800	100
4	800	0
5	400	0
6	400	100
7	400	0

Greška u estimaciji pritiska AEO OFF

Stanje	Referentni pritisak [mbar]	Ostvareni pritisak [mbar]	Relativna greška pritiska [%]
1	400	407	1.75
2	800	784	2
3	800	563	29.625
4	800	800	0
5	400	412	3
6	400	315	21.25
7	400	396	1

Greška u estimaciji pritiska AEO 0.68

Stanje	Referentni pritisak [mbar]	Ostvareni pritisak [mbar]	Relativna greška pritiska [%]
1	400	358	10.5
2	800	741	7.375
3	800	358	55.25
4	800	746	6.75
5	400	358	10.5
6	400	141	64.75
7	400	358	10.5

Greška u estimaciji pritiska AEO 0.85

Stanje	Referentni pritisak [mbar]	Ostvareni pritisak [mbar]	Relativna greška pritiska [%]
1	400	347	13.25
2	800	697	12.875
3	800	293	63.375
4	800	571	28.625
5	400	336	16
6	400	153	61.75
7	400	352	12

Zaključak

- Mogućnosti za povećanje efikasnosti pogona sa pumpom
- Optimizacija fluksa regulacijom faktora snage
- Opasnost od naglog povećanja momenta opterećenja
- Laboratorijska ispitivanja
- Funkcija AEO – optimizacija gubitaka
- Rad u zatvorenoj povratnoj vezi sa optimizovanim fluksom
- Funkcija Sensorless – regulacija bez davača
- Sensorless + AEO

Literatura

[1] Monografija nacionalnog značaja „Energetska efikasnost elektromotornih pogona," Poglavlja:" Pregled tipova i performansi pumpnih sistema" i "Pregled pogona pumpnih sistema sa promenljivom brzinom", Miloš Božić, Marko Rosić i Miroslav Bjekić, ISBN: 978-86-7776-147-9, UDC 621 313, pp 219 - 337, Tehnički fakultet u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu, 2012.

[2] Kostić, Miloje M.**, "**Povećanje energetske efikasnosti elektromotora u pogonima", Beograd : Elektrotehnički institut Nikola Tesla, 2010

[3] Hugh Falkner, „Appendix 5: Lot 11- Water Pumps (in commercial buildings, drinking water pumping, food industry, agriculture)— Europian Comision, AEA Energy and Environment, February 2008

[4] Pump Handbook, Grundfos Management A/S, 2004, Dostupno na: http://net.grundfos.com/doc/webnet/mining/_downloads/pump-handbook.pdf

[5] Engineered Software, dostupno na: http://kb.eng-software.com/ questions/399/Entering+Pump+Curves+into+PIPE-FLO+or+Flow+of+Fluids

[6] Application guide No. 2.-Using variable speed drives (VSDs) in pump applications, ABB, www.abb.com/motors&drives

[7] I am your optimisation heating, ventilation and air conditioning systems guide, NSW Government, The Office of Environment and Heritage, Sidney, Australia, July 2015.

[8] Maxime Binama, Wen-Tao Su, Xiao-Bin Li, Feng-Chen Li, Xian-Zhu Weia, Shi An, "Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for microhydropower schemes: A state-of-the-art review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 148–179, 79 (2017)

[9] Armando Carravetta, Shahram Derakhshan, Springer Tracts in Mechanical Engineering, https://doi.org/10.1007/978-3-319-67507-7_1, Springer International Publishing AG 2018.

[10] Matteo Postacchini , Giovanna Darvini , Fiorenza Finizio, Leonardo Pelagalli, Luciano Soldini, Elisa Di Giuseppe, "Hydropower Generation Through Pump as Turbine: Experimental Study and Potential Application to Small-Scale WDN," Water 2020, 12, 958; doi:10.3390/w12040958)

[11] Velibor Simović, semestralni rad na predmetu Energetski efikasni elektromotorni pogoni, "Specijalne funkcije frekventnog pretvarača za primenu u pogonima sa pumpom – Danfoss Aqua Drive FC202", Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2014.god.

[12] F. Abrahamsen, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, P. Grabowski, P. Thogersen and E. J. Petersen, "On the energy optimized control of standard and high-efficiency induction motors in CT and HVAC applications," Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE, New Orleans, LA, 1997, pp. 621-628 vol.1., doi: 10.1109/IAS.1997.643132

[13] Mateja Nikolić, master rad "Energetski optimalno upravljanje pogonom sa asinhronim motorom u aplikacijama sa pumpom", ETF, Beograd 2018.