

NEKI ASPEKTI PRIMJENE FREKVENTNIH REGULATORA U VODOVODIMA, SA OSVRTOM NA UŠTEDU ENERGIJE

Nebojša Šolaja¹, Radovan Stojanović

SAŽETAK:

Frekventni regulatori (FR) su elektronski uređaji za kontrolu brzine AC motora putem konverzije napona i frekvencije mreže iz fiksnih u promjenjive veličine, pri čemu odnos U/f ostaje konstantan. Veliki broj dobrih osobina preporučuje ih za upotrebu u vodovodnim sistemima, kao i industrijskim pogonima uopšte. U radu su date najvažnije prednosti korištenja FR u odnosu na tradicionalne metode regulacije osnovnih parametara u vodovodnoj mreži, sa posebnim akcentom na uštedu električne energije. Demonstrirana je mogućnost korištenja programa VLT@Energy Box, Danfoss za proračun ušteta i isplativosti investicije u ugradnju FR.

Ključne riječi: frekventni regulator, pumpa, vodovodni sistem, ušteta, električna energija

1. UVOD

Frekventni regulatori (FR) su elektronski uređaji za kontrolu brzine AC motora putem konverzije frekvencije i napona mreže iz fiksnih u promjenjive veličine, pri čemu odnos U/f ostaje konstantan. Oni upravljaju brojem obrtaja standardnog industrijskog trofaznog asinhronog motora proporcionalno ulaznom signalu zadate vrednosti. Njihov intenzivni razvoj i primjena počinje od kraja šezdesetih godina prošlog vijeka, i nastavlja se do sada, kada je relativno niska cijena omogućila široku primjenu u industriji i drugim oblastima tehnike. Konstrukciono gledano, slika 1, FR se sastoji od četiri glavna bloka [5]:

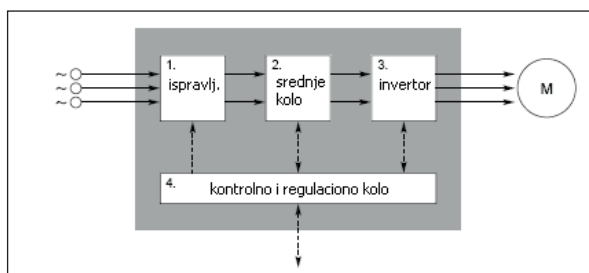
– ispravljača,

¹ Nebojša Šolaja, dr Radovan Stojanović, Kombinat Aluminijuma Podgorica, Elektrotehnički fakultet Podgorica, solaja@cg.yu

- srednjeg kola,
- invertora,
- kontrolne elektronike koja upravlja radom prva tri bloka i vrši prihvat i obradu vanjskih signala.

Prvi blok, ispravljač, služi za pretvaranje trofaznog napona mreže u jedno-smjerni. Pri tome se koriste diodni mostovi (neupravljivi ispravljač), tiristorski mostovi (cio-talasn kontrolisani ispravljač) ili kombinacija diodnih i tiristorskih mostova (polutalasn kontrolisani ispravljač).

Srednje kolo frekventnog regulatora može biti konstruisano u skladu sa tri osnovna principa. U osnovi sadrži zavojnicu koja pretvara promjenjivi istosmjerni napon dobijen iz ispravljača u promjenjivu istosmjernu struju. Ovaj tip kola koristi se jedino u kombinaciji sa kontrolisanim ispravljačem. Drugi tip se sastoji od L-C filtera, koji vrši filtriranje pulsirajućeg jednosmjernog napona iz ispravljača. Konačno, treći tip srednjeg kola se dobije ako se ispred opisanog filtera postavi čoper, koji vrši čopovanje DC napona iz ispravljača, pri čemu je sada moguća kontrola i upravljanje naponom na ulazu u inverter.



Slika 1. Jednostavni dijagram frekventnog regulatora

Invertor je zadnji blok frekventnog regulatora prije motora koji vrši prilagođenje izlaznog napona. Pri tome ima dvostruku ulogu. Ako dobija promjenjivu struju ili napon, invertor mora voditi računa samo o frekvenciji, a ako dobija konstantan napon, invertor kontroliše i frekvenciju i amplitudu izlaznog napona. Zahvaljujući ovome frekventni regulator omogućava izvanredne operacione uslove u cijelom opsegu upravljanja pošto se izlazni napon usklađuje sa uslovima opterećenja. Pri tome je moguće zadržati konstantan magnetizam motora. Konstrukcija invertora ranije se bazirala na tiristoskim mostovima, dok je danas češća upotreba snažnih energetskih tranzistora pri čemu se postiže bolja upravljivost. Kao algoritam upravljanja izlaznim tranzistorima najčešće se koristi amplitudna impulsna ili širinsko impulsna modulacija.

Kontrolno upravljački blok je četvrti osnovni blok svakog frekventnog regulatora. Njegova uloga je dvojaka. On kontroliše i upravlja radom ostalih blokova

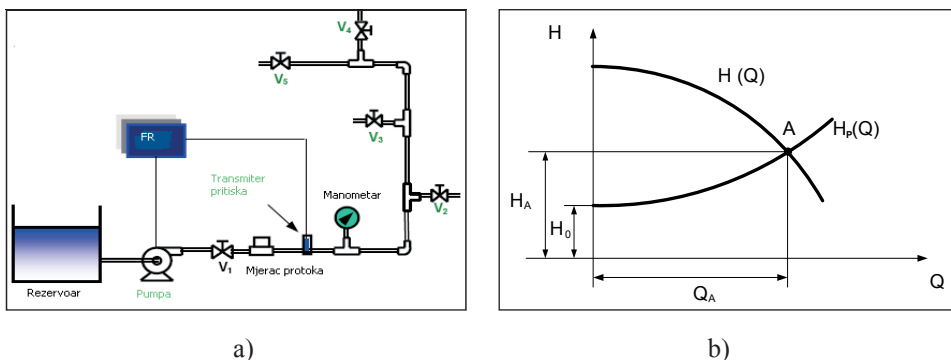
unutar frekventnog regulatora s jedne strane, a sa druge prima signale od okolne opreme i šalje signale od frekventnog regulatora ka drugim uređajima. Takvi signali mogu biti od transmitera, komandnih panela, PLC-a, digitalnih i analognih displeja i sl. Osnovu ovog bloka predstavlja mikrokontrolersko kolo.

Primjer rada frekventnog regulatora u jednom klasičnom vodovodnom sistemu sa povratnom vezom po pritisku dat je na slici 2 a).

Postrojenje i pumpa su dva redno spregnuta dijela jednog sistema, od kojih svaki ima svoje radne karakteristike. Protočna ili pogonska karakteristika pumpe, kao kriva napora u funkciji protoka, je $H_p(Q)$, a pumpnog postrojenja $H(Q)$.

Dinamička ravnoteža pumpe i cjevovoda se ostvaruje kada su vrijednosti karakteristika $H(Q)$ i $H_p(Q)$ pri određenom protoku međusobno jednake. Karakteristiku pumpe daje proizvođač a karakteristika postrojenja ili sistema se proračunava i ima oblik parabole čiji je matematički zapis[1]:

$$H_p = H_0 + kQ^2 \quad (1)$$



Slika 2. a) primjer pumpnog postrojenja, b) tipične krive sistema i pumpe (H-Q)

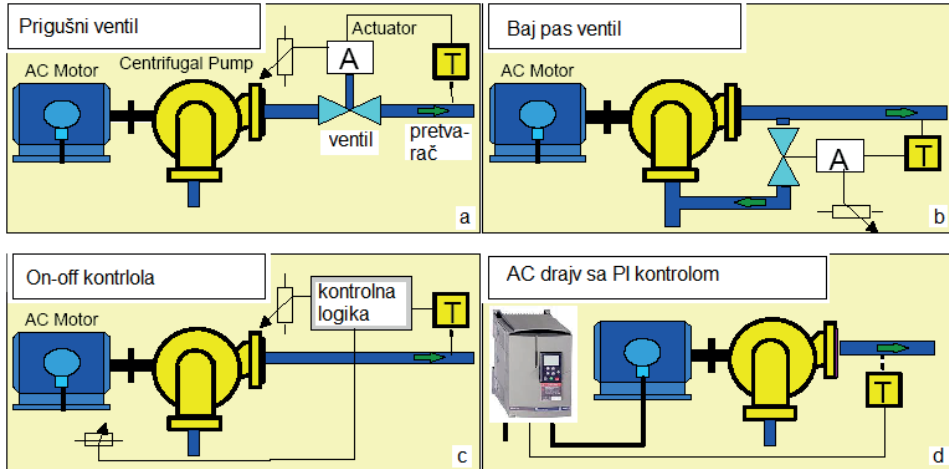
Upotreba frekventnog regulatora kod centrifugalnih pumpi nosi niz prednosti. Ovdje će se nabrojati sve važne uštede sa naglaskom na uštedu električne energije. Mnogi poznatiji proizvođači frekventnih regulatora su razvili programe za proračun ušteda električne energije. Ovdje je demonstrirana upotreba VLT@Energy Box, Danfoss programa.

2. PREDNOSTI KORIŠĆENJA FREKVENTNIH REGULATORA

Regulaciju pritiska ili protoka u vodovodnoj mreži možemo ostvariti na jedan od sledećih načina:

- upotreba prigušnih uređaja (Slika 3. a),

- bajpas kontrolom (Slika 3. b),
- on-off regulacijom (Slika 3. c),
- regulacijom brzine obrtanja pumpe primjenom frekventnog regulatora (Slika 3. d).



Slika 3. Načini regulacije u vodovodnim sistemima

Prve tri su do sada uobičajeno korištene metode, dok je četvrta novija sa nizom prednosti, a najvažnija je ušteda električne energije[2].

Poznati su odnosi između brzine obrtanja, protoka, visine dizanja i snage centrifugalnih pumpe:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (3)$$

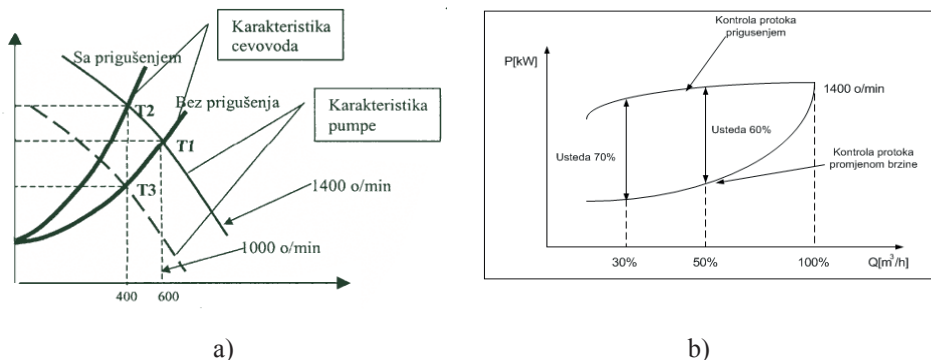
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (4)$$

Iz jednačine 4 se vidi da je snaga pumpe proporcionalna kubu brzine, odnosno ako je potrebna npr. polovina od nominalnog broja obrtaja motor će trošiti sa-

mo 12,5% energije u odnosu na nominalnu potrošnju. Iz ovoga se može vidjeti da je moguće pravilnom primjenom frekventnih regulatora ostvariti velike uštede električne energije.

Posmatrajući Q-H karakteristiku neke karakteristične pumpe, slika 4 a), uočava se da se kod sistema sa prigušenjem povećava potisna visina sa povećanjem karakteristike cjevovoda. Ovo dovodi do smanjenja protoka, odnosno pada pritiska u cjevovodu koji se mijenja sa kvadratom protoka, a definisan je karakteristikom cjevovoda. Iz ovoga se zaključuje da su sistemi sa prigušnom kontrolom protoka sistemi čistog gubitka i zahtijevaju velike eksploatacione troškove. S druge strane, sistemi sa regulacijom brzine karakteristiku pumpe mijenjaju tako što visinu (koja se generiše u pumpi) podešavaju prema zahtijevanoj karakteristici sistema i željenog protoka. Promjenom brzine obrtanja karakteristika pumpe se translatorno pomjera uz očuvanje najvećeg stepena iskorišćenja.

Kod sistema sa prigušenjem, specifična potrošnja energije se uvijek dobija na maksimalnom protoku. Ako se podesi na niži protok, specifična potrošnja energije se progresivno povećava. Kod sistema sa regulacijom brzine, specifična potrošnja energije ne samo da opada sa opadanjem protoka, pošto je angažovana snaga na pumpi proporcionalna kubu brzine, nego pumpa dostiže i minimalnu radnu tačku i radi pri maksimalnom korisnom dejstvu.



Slika 4. a) sistem sa prigušenjem, b) uštede u sistemu sa prigušenjem

Iznos snage koju zahtijeva pumpa može se izračunati pomoću sledeće formule [4]:

$$P = \frac{Q * H * g * g}{3600 * h} \quad (5)$$

gdje je:

- P – snaga pumpe [kW]
- Q – protok [m³/h]

- H – potisna visina pumpe [m]
- ρ – gustina fluida [kg/dm^3]
- g – gravitaciono ubrzanje [m/s^2]
- h – stepen korisnog dejstva

Ako se za ilustraciju poređenja stepena korisnog dejstava korišćenjem prigušenja i regulacije brzine uzme pumpa čiji je maksimalni protok $600 \text{ m}^3/\text{h}$, a nominalna brzina $1400 \text{ o}/\text{min}$, te pod pretpostavkom da je $\rho=1$, a $h=0,74$, dobija se (slika 4 b):

- Radna tačka 1 (sistem sa prigušenjem):

Pri prigušenju od 50% i pri nominalnoj brzini od $1400 \text{ o}/\text{min}$ sa Q-H karakteristike pumpe dobija se potisna visina od 60 m. Uvrštavanjem ovih podataka u (5) proizilazi da je angažovana snaga u ovom režimu $P_1 = 66 \text{ kW}$.

- Radna tačka 2 (sistem sa regulacijom brzine):

Pri protoku od 50% sa Q-H karakteristike pumpe dobija se da je potisna visina pumpe 20 m. Uvrštavanjem u (5) izračunava se angažovana snaga za ovaj režim, $P_2 = 22 \text{ kW}$.

Ovo poređenje pokazuje da su uštede energije u slučaju 2 u odnosu na slučaj 1 60%. Ukoliko se zahtijeva protok od 30%, onda uštede energije korišćenjem regulacijom broja obrtaja u odnosu na prigušenje iznose čak 70%. Poznavanjem Q-H karakteristike i podataka o gustini fluida i režima rada pumpe precizno se može odrediti veličina uštede koja se dobija u odnosu na sisteme sa prigušenjem. Lako se može uočiti da su ove uštede vrlo velike i da samo po ovom osnovu postoji velika isplativost u investiciju ugradnje frekventnih regulatora u pumpnim stanicama.

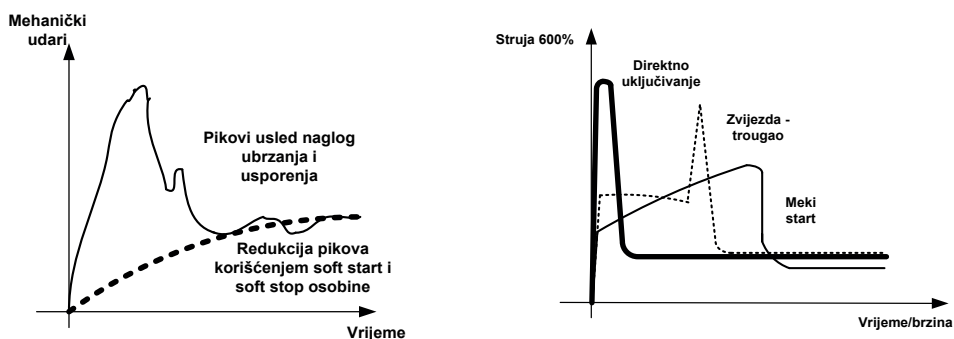
- „Soft” start i „soft” stop funkcije

Ako se analizira on – off režim rada (koji je veoma čest slučaj), tj. kada pumpa radi punim kapacitetom dok se ne postigne pritisak u mreži a zatim se gasi i ostaje na „stand by”, tada ne postoje uštede u električnoj energiji ili su minimalne. Međutim, u ovom slučaju do posebnog izražaja dolazi mogućnost „soft” starta i „soft” stopa motora.

Stalno uključivanje i gašenje pumpi, odnosno pripadajućih motora, unosi „stres” u rad tih uređaja, pogotovu ako se često ponavljaju u jednom vremenskom intervalu. Ovaj „stres” se prenosi kroz čitav mehanički transmisioni sistem uzrokujući povećano nošenje materijala, prijevremeno stradanje remenja, zupčanika, mehaničkih zaptivača, te pojave kavitacije, vibracija, zraka u sistemu itd. Ovome treba dodati da naglo ubrzanje motora i povlačenje struje koja je do 6, 7, a ponekad i više puta veća od nominalne donosi jake udare na mrežu, tako da osjetljiva elektro oprema u blizini pumpnih stanica može lako da strada. Takođe, ove pojave kod motora uzrokuju stradanje namotaja motora, izolacije i ležajeva što smanjuje radni vijek motora. Upotreba zvijezda – trougao prebacivača je samo parci-

jalno rešenje ovog problema. Takođe, prilikom prelaznog perioda kada se motor gasi opet se pojavljuju pikovi koji mogu čak i prevazići one u toku starta[3].

Frekventni regulatori korišćenjem funkcija „soft” starta i „soft” stopa, koji su podesivi u vremenu, predupređuju gore pomenute probleme. Ove osobine su naročito pogodne kod pumpi u vodovodu gdje prelazni momenti često uzrokuju vodene čekice, i u nekim primjerima, kada ne dolazi do postepenog usporavanja fluida može se desiti da kinetička energija izazove lomove u cjevovodima i sastavnim dijelovima. Takođe se eliminišu efekti parcijalnih vrtložnih opterećenja i sa njima povezanih vrtložnih gubitaka.



Slika 5. Uticaj direktnog priključivanja motora i pumpe na mrežu

– Manji zahtjevi za snagom na startu

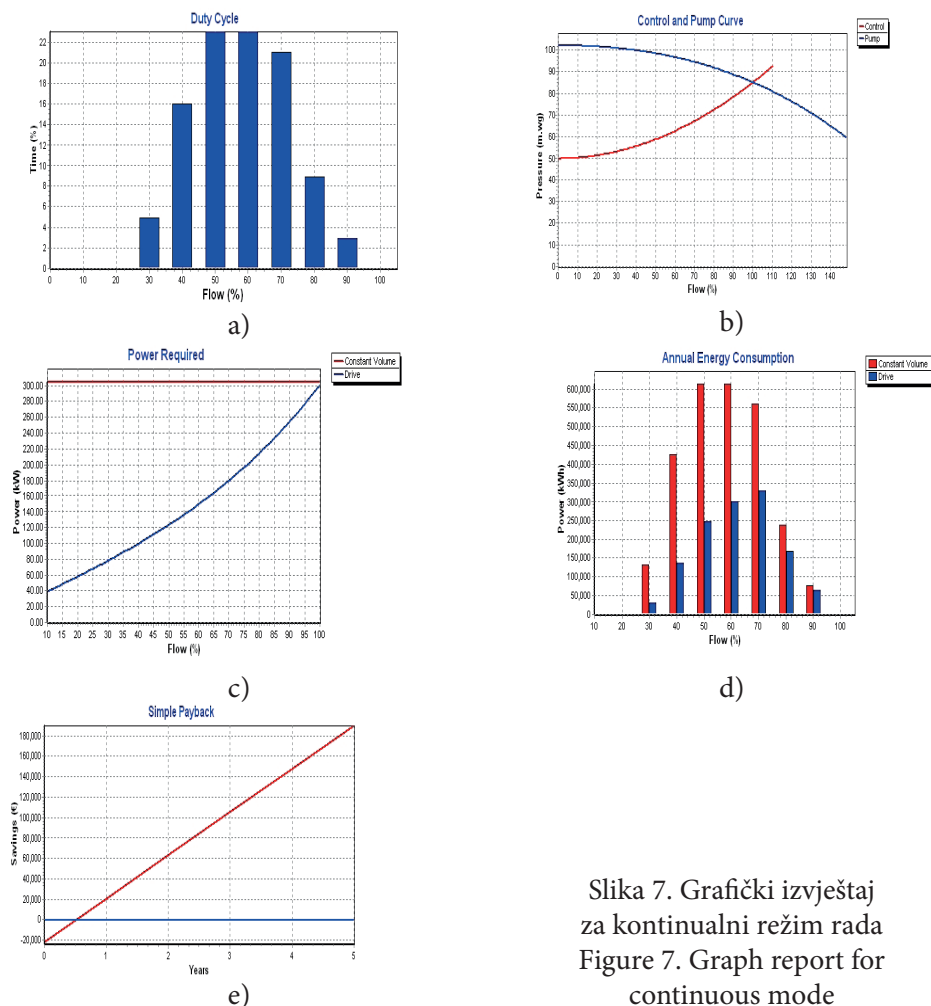
Kako je snaga proporcionalna proizvodu struje i napona, to je snaga motora direktno vezanog na mrežu značajno veća od one preko frekventnog regulatora. Ovo može biti problem sa distribucionom mrežom koja je često na limitu, tako da ova ekstra snaga može biti predmet posebne naplate tokom pikova snage.

Pored ovih prednosti, korištenje frekventnih regulatora nosi i niz drugih kao što su: podešavanje radne brzine, mogućnost podešavanja limita momenta, reverzibilni rad, kompenzacija reaktivne energije itd.

3. PRORAČUN UŠTEDA

Demonstracija programa VLT@Energy Box je urađena na primjeru jedne pumpe, dok bi analiza čitavog vodovodnog sistema prevazilazila okvire ovog rada. Prvobitno pumpa je radila u on–off režimu rada. Na slici 6 prikazani su prozori programa u kojima se unose konačni podaci za motor, pumpu, sistem, cijenu električne energije i frekventnog regulatora i drugi troškovi. Na osnovu ovih podataka program daje tehno-ekonomski proračun.

Međutim, koristeći drugi režim rada pumpi, ostvariće se velika ušteda električne energije. Naime, ako pumpa radi sa manjim brojem obrtaja, koji diktira sistem (slika 7. a), došlo bi do rapidnog smanjenja utrošene energije. Dakle, ako bi pogoni pumpi bili frekventni regulatori i ako bi pogonili pumpe prema pritisku mreže, odnosno uz „feedback” signal mjerenja pritiska, čitav sistem bi se mogao zatvoriti u jednu upravljačku petlju. Sada bismo imali kontinualnu regulaciju mreže po pritisku u kojem bi pumpe radile uvijek ispod maksimalnog režima, sem u dnevnim špicovima, i na taj način bi se ostvarivale uštede u električnoj energiji, a takođe bi više došle do izražaja i indirektna uštede koje se dobijaju zbog eliminisanja rada pumpi u on – off režimu što je ranije detaljnije pojašnjeno. Na slici 7 prikazan je grafički pregled simulacije ovakvog novog režima rada.



Slika 7. Grafički izvještaj za kontinualni režim rada
Figure 7. Graph report for continuous mode

Sa slike 7 očigledno je da kada pumpa radi u kontinualnom režimu sa regulacijom broja obrtaja, postoje velike uštede u električnoj energiji i konkretno za ovaj primjer su oko 40 000 € (po trenutnoj subvencioniranoj cijeni struje), pa je period otplate sa ovim radnim ciklusom pumpe reda pola godine (slika 7. e). Na slici 7. d, prikazan je odnos u potrošnji električne energije za ovaj režim rada i režim rada sa maksimalnim brojem obrtaja. Naravno, mnogo veći efekti bi se ostvarili ako bi se sve pumpe pogonile sa frekventnim regulatorima čime bi se stvorila mogućnost kaskadne regulacije kojom bi korisnik mogao sam da odredi sa kojim pumpama bi mogao da najefikasnije reaguje na zahtjeve mreže. Ova metoda omogućuje veliku brzinu odziva sistema, čime se osnovni parametri mreže drže u predviđenim granicama.

4. ZAKLJUČAK

U radu su opisane osnovne prednosti korištenja FR u vodovodnim sistemima u odnosu na ranije korištene metode. Poseban akcenat je stavljen na uštedu električne energije. Prikazana je demonstracija proračuna ušteta na jednoj pumpi za različite režime rada i predloženo povezivanje svih pumpi u jedinstven sistem upravljanja po pritisku u mreži, čime bi se postigle značajne uštede i dobilo na brzini odziva sistema.

5. LITERATURA

- [1] Prof. dr Milo Mrkić, Miodrag Macanović, *Turbomašine, pumpe i ventilatori*, Univerzitet Crne Gore, 1998.
- [2] *Fan and Pump Motor Energy Savings Guide*, www.controltechniques.com
- [3] *Adjustable Speed Drives As Applied to Centrifugal Pumps*, www.rockwellautomation.com
- [4] *Primena frekventnih regulatora kod pumpi*, www.mikrokontrol.co.yu
- [5] *AC Technical Reference*, www.danfoss.com

SOME ASPECTS OF APPLIANCE OF FREQUENCY REGULATORS IN WATER PLANTS WITH EMPHASIS ON ENERGY SAVING

ABSTRACT:

Frequency regulators or drivers are electronics devices for AC motor speed control by converting fixed voltage and frequency values in variable, behind constant ratio U/f . Several good features commend them for using in water plants as well as in industrial systems. In this paper the main advantages of using of FR are elaborated by their comparison against traditional methods. The emphasis is given on energy saving. The possibilities of the software tool VLT@Energy Box, Danfoss for calculation of energy saving and investment justification by FR installing are demonstrated.

Key words: Frequency regulator, pump, water system, energy saving, energy efficiency

