

EKSPERIMENTALNO POSTROJENJE ZA UTVRĐIVANJE OPTIMALNOG NAČINA UPRAVLJANJA PUMPNIM AGREGATIMA ZA VODOSNABDEVANJE

1. OPIS PROBLEMA KOJI SE REŠAVA EKSPERIMENTALNIM POSTROJENJEM

Potrošnja vode u sistemima za proizvodnju i distribuciju vode za piće, značajno varira tokom 24 časa. Noću je potrošnja jako mala, skoro da je i nema, dok je tokom dana višestruko veća. Uglavnom se izvorišta mogu podeliti na dva tipa. Prvi tip izvorišta predstavljaju ona koja imaju po jedan bunar iz kojih se voda direktno crpi i potiskuje u vodovodnu mrežu. Drugi tip predstavljaju izvorišta koja imaju sistem bunara, odakle se voda putem pumpi ili natega prebacuje u crpne bazene, a odatle pomoću većih pumpnih agregata u vodovodni sistem.

Centrifugalne pumpe i pripadajuća oprema (cevni sistem, ventili...) predstavljaju dva serijski povezana sistema. Promena protoka se može regulisati na neki od sledećih načina:

- primenom prigušnih uređaja
- bypass kontrolom
- kontrolom broja obrtaja pogonskog motora pumpe

Pri izboru novih sistema upravljanja pumpnim agregatima treba obratiti pažnju na mogućnost njihove primene u ekstremnim režimima eksploatacije.

U cilju pronalazjenja optimalnog načina upravljanja radom centrifugalnih pumpi, potrebno je utvrditi specifičnu potrošnju energije za svaku od tri moguće varijante promene protoka.

Promena protoka pumpe pomoću prigušnih uređaja, već se primenjuje na crpnoj stanici koja je služila kao eksperimentalna. Za ovu varijantu nije bilo potrebno ugrađivati nikakvu dodatnu opremu ili elemente, već se zadatak svodio na utvrđivanje specifične potrošnje energije upotrebom prigušnog ventila koji se nalazi na potisnom cevovodu pumpe.

Kod bypass sistema regulacije, elektromotor i pumpa rade u optimalno izabranom režimu a regulacija protoka koji se daje u vodovodnu mrežu vrši se vraćanjem dela vode u usisni vod pumpe. Naime, kada pritisak u sistemu dostigne određenu vrednost koja je zadata pomoću pritiskog ventila, otvara se preliv i voda cirkuliše u kratkom spoju.

Sistemi sa regulacijom brzine, karakteristiku pumpe menja tako što potisnu visinu (koja se generiše u pumpi) podešavaju prema zahtevanim parametrima cevovoda i željenog protoka.

Na crpnoj stanici Đeriz za promenu broja obrtaja pumpe korišćen je frekventni regulator, koji je vezan za na pumpni agregat sa asinhronim elektromotor snage 30 kW. Frekventni regulator je marke OMRON Varispeed E7; model: CIMR – E7Z 4037.

Za potrebe eksperimenta frekventni regulator je pozajmljen od firme “MIKRO KONTROL” – Beograd.

Na gore navedeni način su stvoreni uslovi da se izvrši eksperimentalno utvrđivanje specifične potrošnje energije za sve tri varijante upravljanja protokom pumpe

Eksperimentalni postrojenje je proisteklo kao rezultat rada i istraživanja u okviru projekta br. 0042 b pod nazivom: “Korišćenje energije u vodosnabdevanju – Optimizacija pumpnih sistema za vodosnabdevanje gradova”, koji je finansiralo MNT u okviru programa Energetske efikasnosti, uz korišćenje opreme firme “MIKRO KONTROL” - Beograd

2. STANJE REŠENOSTI PROBLEMA U SVETU – PRIKAZI I ANALIZA POSTOJEĆIH REŠENJA

Povećanje energetske efikasnosti je veoma značajno u svim oblastima privređivanja. Optimizacija pumpnih sistema za vodosnabdevanje gradova zauzima značajno mesto u oblasti energetske efikasnosti, jer tu postoji veliki prostor za smanjenje potrošnje energije koja predstavlja jedan od

najvažnijih resursa. U pogledu korišćenja energije i primene sistema upravljanja u vodosnabdevanju naših gradova koristi se tehnologija na nivou osamdesetih godina.

Gore navedeni načini upravljanja (primenom prigušnih uređaja, bypass-a i promenom broja obrtaja) protokom pumpnih agregata su poznati, ali cilj izgradnje eksperimentalnog postrojenja je utvrđivanje optimalnog načina upravljanja pre svega sa stanovišta energetske efikasnosti, uzimajući u obzir i mogućnosti dalje automatizacije rada kompletne crpne stanice. U svetu se trenutno najviše koriste sistemi sa daljinskim nadzorom i upravljanjem crpnih stanica.

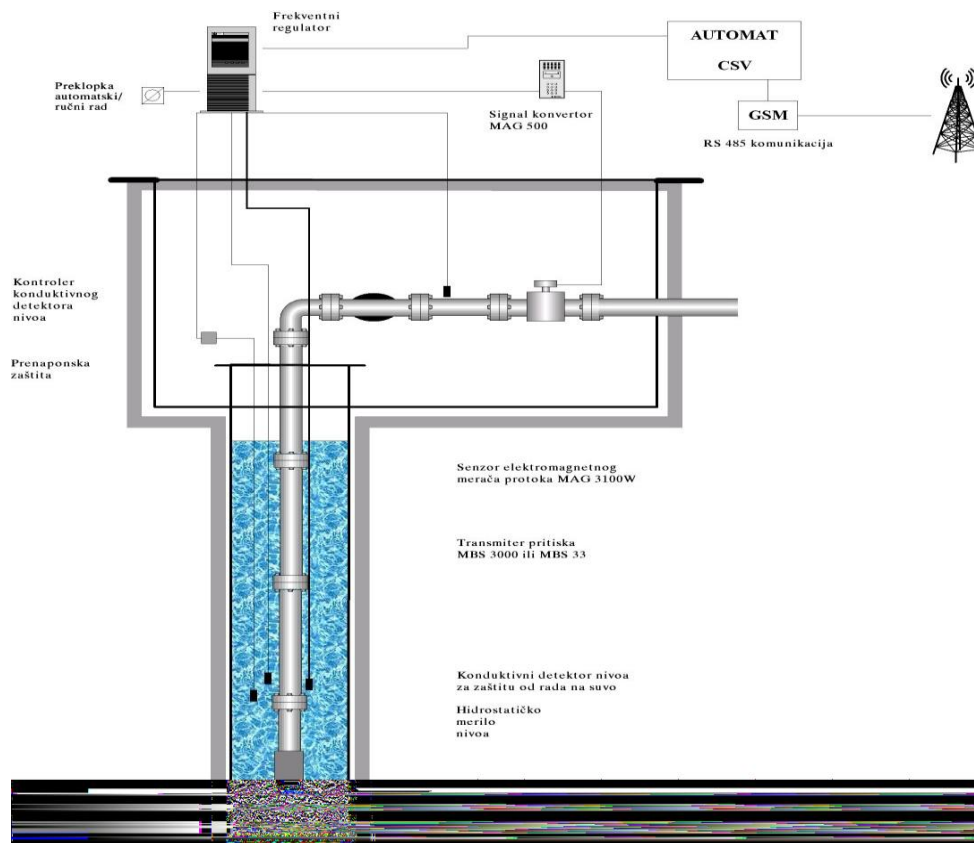
Posmatrajući $Q - H$ karakteristiku, tj. zavisnost napora H od protoka Q , neke karakteristične pumpe, uočava se da se kod sistema sa prigušenjem povećava napor pri povećanju gubitaka (strmije karakteristike cevovoda).

Ovo dovodi do smanjenja protoka, odnosno povećanja napora, jer se povećava koeficijent karakteristike cevovoda sa povećanjem koeficijenta gubitaka u prigušnom ventilu.

Ovo dovodi do smanjenja protoka, odnosno do pada pritiska u cevovodu koji se menja sa kvadratom protoka a definisan je karakteristikom cevovoda. Iz ovoga se zaključuje da su sistemi u kojima se regulacija protoka, vrši "gušenjem" cevne mreže, sistemi čistog gubitka i zahtevaju velike eksploatacione troškove.

Sistemi sa regulacijom broja obrtaja karakteristiku pumpe menjaju tako što napor podešavaju prema datoj karakteristici cevovoda i željenom protoku. Sa aspekta potrošnje energije, ovaj sistem je najracionalniji.

Kod bypass sistema regulacije, elektromotor i pumpa rade u optimalno izabranom režimu a regulacija protoka koji se daje u vodovodnu mrežu vrši se vraćanjem dela vode u usisni vod pumpe. Naime, kada pritisak u sistemu dostigne određenu vrednost koja je zadata pomoću pritisknog ventila, otvara se preliv i voda cirkuliše u kratkom spoju.



Slika 1. Oprema na bunaru za daljinski nadzor i upravljanje

Veliki broj naših vodovodnih sistema ima izvorišta u blizini velikih reka, na relativno velikom prostoru, odakle se voda doprema u crpne stanice a odatle u vodovodnu mrežu. Brojne posade mašinista koje dežuraju u tri smene su zadužene za obilazak bunara i komunikaciju sa dispečerom, sa kojim u dogovoru pokreću ili zaustavljaju pojedinačne pumpe na crpnim stanicama i bunarima. Kao i obično, ljudski faktor je nedovoljno pouzdan, što prouzrokuje greške koje se ogledaju u netačnom i neblagovremenom izveštavanju.

Poseban problem predstavlja zaštita pumpnih agregata. Prilikom uključivanja i isključivanja uređaja, dolazi do električnih, mehaničkih, pa i hidrauličkih udara. Ovaj problem je posebno izražen kod bunara kojima je smanjena izdašnost u periodima godine kada je potreba za vodom velika, a mogućnosti proizvodnje smanjene.

Problem svih zaštita i regulacija može se rešiti ugradnjom hidrostatičkih senzora nivoa, koji se povezuju direktno na frekventne regulatore, koji uz pomoć ugrađenog PID regulatora menjaju broj obrtaja pumpe, održavajući nivo vode u bunaru konstantnim. Na ovaj način motori pumpi su potpuno zaštišeni, izbegnuti su udari pri njihovom pokretanju i zaustavljanju, a istovremeno se vrši i čuvanje bunara (crpi se onoliko vode koliko je moguće).

Usled lokacije bunara i specifičnih potreba (količine podataka koje treba prenositi), željene brzine uvođenja sistema za daljinski nadzor i upravljanje, kao i potrebe za investiciona ulaganja budu što manja, predlaže se komunikacija sa KKC putem SMS poruka.

Na slici 1. šematski je prikazana oprema jednog bunara. Automat CSV komunicira preko komunikacionog porta sa frekventnim regulatorom, prati trenutna stanja regulatora (rad, kvar, alarm), pokreće, zaustavlja i resetuje ga po potrebi.

Automat CSV je tako koncipiran da je na njega moguće povezati i sve ostale signale bitne za prašenje i rad bunara, kao i opremu za detekciju ulaska u objekat, kao i alarmna sirena. To mogu biti sledeći signali: nivo vode u bunaru, temperatura statora motora, trenutni protok, kumulativni protok, trenutni pritisak, ulazak u objekat, zaštita transformatora, zaštita od rada na suvo, režim rada (lokalno/daljinski), i drugo.

Automati CSV iniciraju slanje poruka o stanju dva puta dnevno, dok se pri nastupanju alarma i događaja poruke šalju odmah po nastajanju takvog stanja.

U automat CSV je upisana tabela telefonskih brojeva, na čije poruke automat reaguje, kako bi se sprečilo neovlašćeno raspolaganje informacijama i upravljanje bunarima.

Iz komandnog centra se slanjem SMS poruke može inicirati da bunar pošalje poruku o stanju, može se pokrenuti ili zaustaviti motor pumpe, ili promeniti zadata vrednost nivoa vode u bunaru. Ovo može da se uradi i pomoću običnog GSM telefona, ali je radi lakšeg baratanja sa podacima i čuvanja svih primljenih i poslanih poruka na lokaciji KKC instaliran PC računar sa posebnim programskim paketom SMS server.

3. SUŠTINA IZRADE EKSPERIMENTALNOG POSTROJENJA

Gore navedeni načini upravljanja (primenom prigušnih uređaja, bypass-a i promenom broja obrtaja) protokom pumpnih agregata su poznati, ali cilj izgradnje eksperimentalnog postrojenja je utvrđivanje optimalnog načina upravljanja pre svega sa stanovišta energetske efikasnosti, uzimajući u obzir i mogućnosti dalje automatizacije rada kompletne crpne stanice. U svetu se trenutno najviše koriste sistemi sa daljinskim nadzorom i upravljanjem crpnih stanica.

U strukturi proizvodnih troškova pijaće vode električna energija zauzima najznačajnije mesto. U teoriji su odavno poznata rešenja za upravljanje asinhronim motorima, ali su ona bila dosta skupa. Današnji nivo proizvodnih tehnologija omogućuje izradu opreme za frekventnu regulaciju po relativno niskim cenama.

Korišćenjem eksperimentalnog postrojenja, utvrđeni su koeficijenti specifične potrošnje energije za sve tri vrste regulacije protoka pumpnih agregata. Takođe se vidi, da se primenom frekventnog regulatora ostvaruje najveća energetska ušteda (11.5%), a u nekim ograničenim oblastima protoka i pritiska u mreži sistem bypassa može biti najracionalniji. Sistem regulacije sa prigušenjem je uvek sistem čistog gubitka energije. Procenat uštede energije može biti i viši ako frekventni regulator vrši regulaciju broja obrtaja u oblasti ekonomičnog i stabilnog rada pumpe i ako se optimizira rad pumpe s obzirom na izdašnost bunara. Oblast ekonomičnog rada pumpe ograničava se najmanjim dozvoljenim stepenom korisnosti pumpe. Obično se ova oblast ograničava uslovom da se stepen korisnosti pumpe kreće u granicama od $80 \div 90\%$ u odnosu na stepen korisnosti pumpe u optimalnom režimu rada. Primenom navedenih metoda energetska efikasnost postojećih centrifugalnih pumpi se može povećati i do 20%.

Na bazi izvršenih istraživanja, kada je u pitanju ekonomska opravdanost ulaganja u frekventnu regulaciju i mernu opremu za optimizaciju rada pumpnih agregata na pumpnim stanicama u vodosistemima za snabdevanje gradova, nedvosmisleno pokazuje svoju punu opravdanost.

4. DETALJAN OPIS REŠENJA EKSPERIMENTALNOG POSTROJENJA

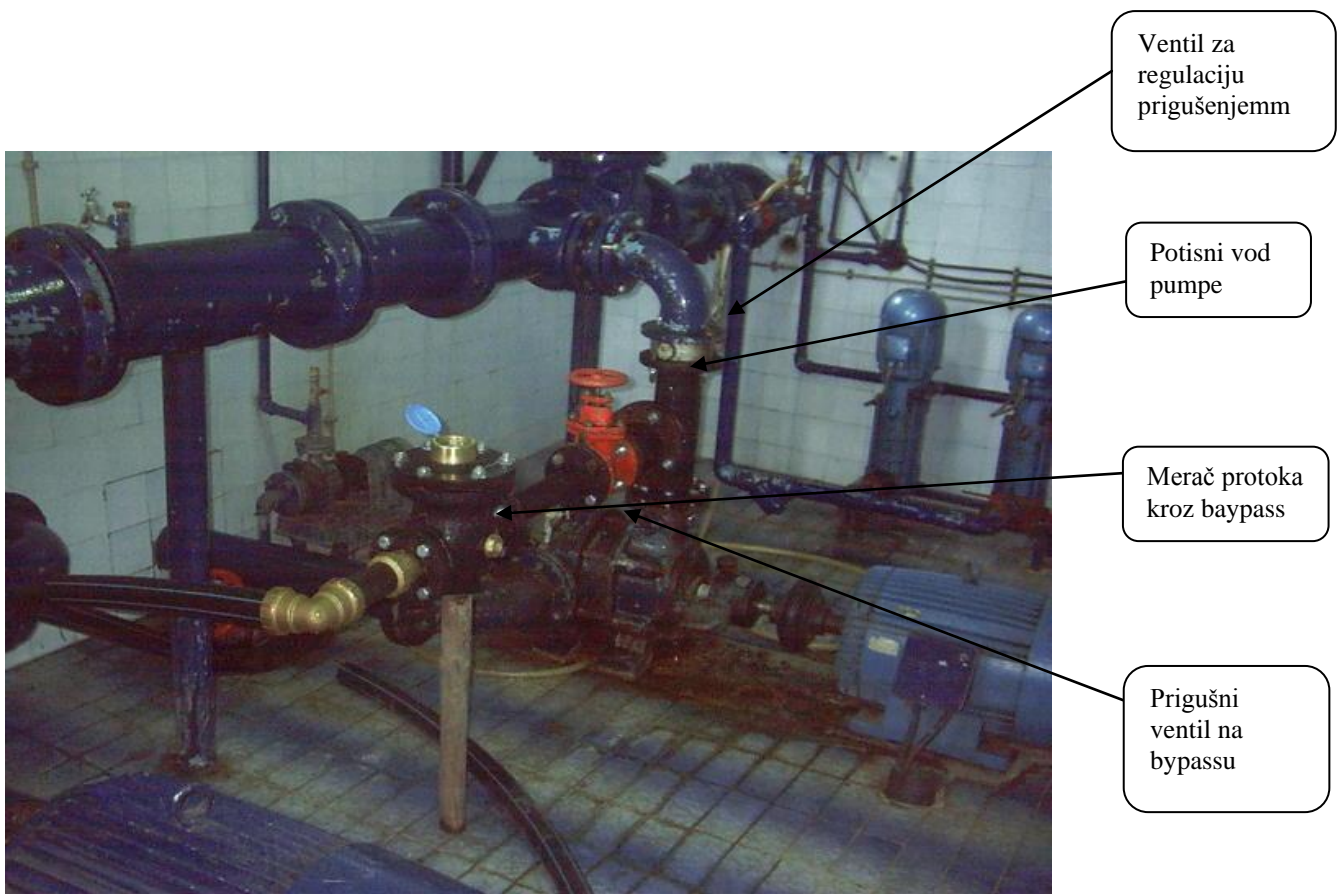
Sistemi regulacije – eksperimentalno izvođenje

Na crpnoj stanici “Đeriz” vodovoda Kraljevo, izvedena su tri različita eksperimenta, kako bi se utvrdio optimalni način upravljanja centrifugalnom pumpom.

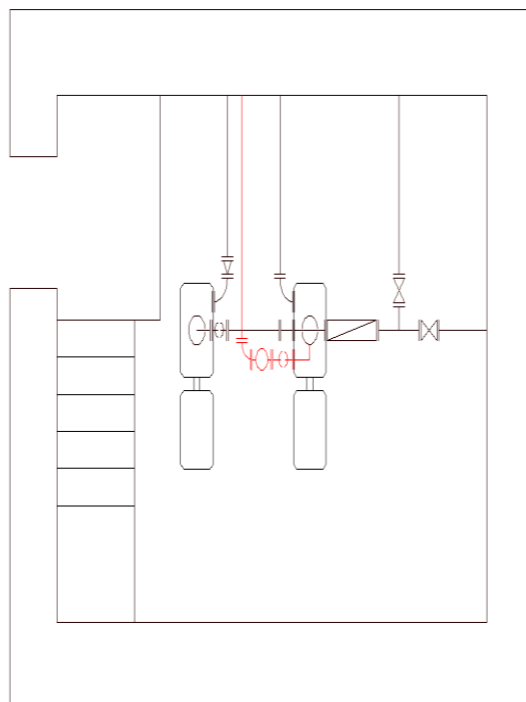
- a) Testirana je potrošnja energije variranjem stepena prigušenja pri različitim uslovima eksploatacije,
- b) Na postrojenju je projektovan i ugrađen baypass sistem i izvršeno je testiranje uštede energije kada se regulisanje protoka vrši na ovaj način,
- c) Izvršena je ugradnja frekventnog regulatora na istom demo postrojenju i izvršena merenja potrošnje energije pri različitim uslovima eksploatacije,

a) Regulacija prigušenjem

Posmatrajući $Q - H$ karakteristiku, tj. zavisnost napora H od protoka Q , uočava se da se kod sistema sa prigušenjem povećava napor na račun smanjenja protoka. Iz ovog se zaključuje da su sistemi sa regulacijom protoka promenom karakteristike cevovoda, sistemi čistog gubitka i zahtevaju velike eksploatacione troškove.



Sl. 2. Izgled eksperimentalnog postrojenja na crpnoj stanici



Sl. 3. Šematski prikaz eksperimentalnog postrojenja na crpnoj stanici

Regulacija pomoću frekventnog regulatora

Sistemi sa regulacijom brzine, karakteristiku pumpe menja tako što potisnu visinu (koja se generiše u pumpi) podešavaju prema zahtevanim parametrima cevovoda i željenog protoka. Sa aspekta potrošnje energije, ovaj sistem je najracionalniji.

Na crpnoj stanici Đeriz frekventni regulator je vezan na pumpni agregat sa asinhronim elektromotor snage 30 kW. Frekventni regulator je marke OMRON Varispeed E7; model: CIMR – E7Z 4037.



Sl. 4. Frekventni regulator postavljen na crpnoj stanici za potrebe eksperimentalnog postrojenja

Tabela 1 - Parametri regulacije prigušenjem

Srednji pritisak	Rač. protok	Snaga/čas	Specifična potrošnja	Odnos
[bar]	[l/s]	[kW/h]	[kWh/m ³]	[kWh/bar m ³]
4,85	20,895	0,938	0,012	0,060
5,15	19,090	1	0,014	0,074
4,95	16,792	1,009	0,016	0,082
5,10	14,292	0,9	0,017	0,089
4,90	14,520	0,913	0,017	0,085

b) Regulacija bypass-om

Kod bypass sistema regulacije, elektromotor i pumpa rade u optimalno izabranom režimu a regulacija protoka koji se daje u vodovodnu mrežu vrši se vraćanjem dela vode u usisni vod pumpe. Naime, kada pritisak u sistemu dostigne određenu vrednost koja je zadata pomoću pritisnog ventila, otvara se preliv i voda cirkuliše u kratkom spoju.

Tabela 2 - Parametri regulacije dobijeni primenom bypassa

Srednji pritisak	Rač. protok	Sr. protok kroz bypass	Ukupni srednji protok	Snaga/čas	Specifična potrošnja	Odnos
[bar]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[kW/h]	[kWh/m ³]	[kWh/bar m ³]
5,00	18,055	0,555	18,611	1,00	0,015	0,076
5,00	18,257	1,035	19,292	0,96	0,014	0,073
5,00	16,464	1,818	18,282	0,99	0,016	0,083
5,05	17,171	1,818	18,989	1,09	0,017	0,089
4,90	15,984	1,919	17,904	0,97	0,016	0,082
5,15	16,641	2,5	19,141	0,97	0,016	0,083
5,15	14,267	4,267	18,535	1,14	0,022	0,113
5,10	14,242	3,762	18,005	0,92	0,017	0,091
4,80	14,040	3,257	17,297	0,92	0,018	0,087
4,80	14,671	3,156	17,828	0,95	0,017	0,085
5,00	14,318	3,914	18,232	0,92	0,017	0,089

c) Regulacija pomoću frekventnog regulatora

Sistemi sa regulacijom brzine obrtanja, karakteristiku pumpe menjaju tako što napor podešavaju prema zahtevanoj karakteristici cevovoda i željenom protoku.

Tabela 3 - Parametri regulacije dobijeni primenom frekventnog regulatora

Srednji protok [l/s]	10.39	13.38	13.65	16.46	17.43
Srednji pritisak [bar]	5.15	5.01	4.91	4.74	4.69
Spec. potrošnja [kWh/m ³]	0.481	0.405	0.451	0.426	0.406

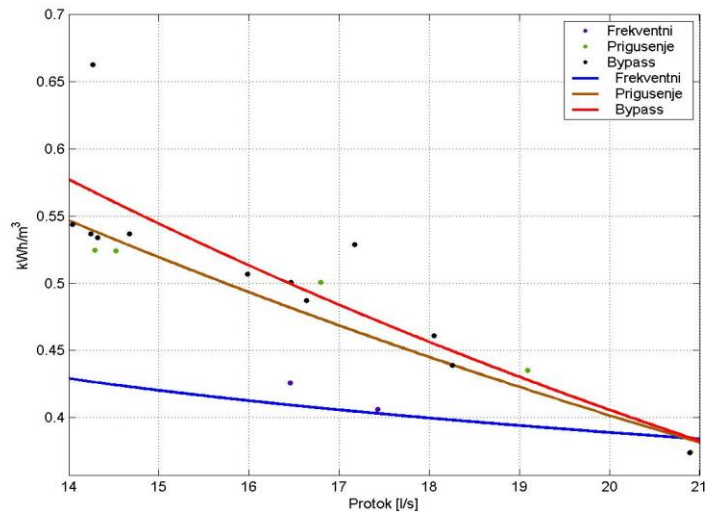
Specifična potrošnja energije

Kod sistema sa prigušenjem specifična potrošnja energije se uvek dobija na maksimalnom protoku. Ako se podesi na niži protok, specifična potrošnja energije se progresivno povećava. Kod sistema sa regulacijom broja obrtaja, specifična potrošnja energije ne samo da opada sa opadanjem protoka nego pumpa dostiže i optimalnu radnu tačku i radi pri maksimalnom korisnom dejstvu.

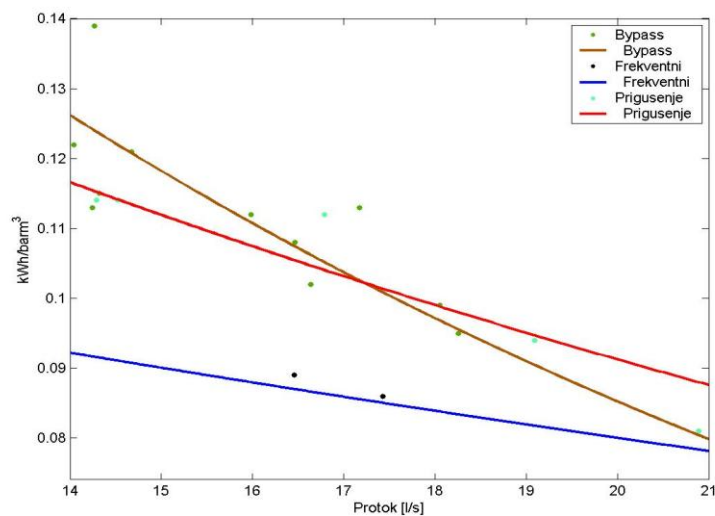
Utvrđivanje koeficijenta specifične potrošnje energije najbolji je način za određivanje optimalnog sistema regulacije protoka kod centrifugalnih pumpi.

Za utvrđivanje stepena korisnosti pumpe potrebno je odrediti procentualno učešće pojedinih protoka u odnosu na maksimalni u toku vremena i koeficijent specifične potrošnje energije. Podaci koji se odnose na procentualno učešće pojedinih protoka u odnosu na maksimalni, a koji su korišćeni u ovom radu, utvrđeni su za vremenski period od godinu dana.

Koeficijent specifične potrošnje energije, za navedene načine regulacije protoka, predstavljaju količinu utrošene energije za proizvodnju jedinice zapremine (1 m^3) pijaće vode.



a)



b)

Sl.5. a) Potrošnja energije po jedinici protoka; b) Koeficijenti specifične potrošnje energije za različite vrste regulacije pumpe

Energetska efikasnost

U cilju sagledavanja vremena rada pumpnih agregata u režimu sa prigušenjem, potrebno je za određeni duži vremenski period pratiti parametre kao što su protok, pritisak, ukupni protok i broj agregata u pogonu.

Tabela 4 - Stepen korisnosti dobijen poredjenjem regulacije sistema prigušenjem i primenom frekventnog regulatora

Protok [l/s]	Q/Qmax u toku ukupnog vremena rada [%]	Relativni odnos koeficijenata specifične potrošnje energije [%]	Stepen učešća [%]
21	32	100	32
19	45	86.3	38.84
17	9	83.5	7.51
15	1	80.4	0.80
13	5	76	3.8
11	8	73	4.38
< 11	2	60	1.2
UKUPNO:			88.53

Ako se proizvodi relativnih odnosa protoka u odnosu na maksimalni protok i relativnih odnosa koeficijenata specifične potrošnje energije sabere, dobija se stepen korisnosti sistema sa ugrađenim frekventnim regulatorom u odnosu na sistem sa prigušenjem.

Upoređivanjem stepena korisnosti pumpe za sistem regulacije protoka sa promenom broja obrtaja pumpnog kola u odnosu na sistem regulacije protoka koji se vrši "gušenjem" cevne mreže, vidi se da je on daleko veći.

Najveći broj obrtaja sa kojim pumpa može da radi ograničen je s obzirom na čvrstošu radnog kola i konstruktivna rešenja uležištenja.

U vodovodnim sistemima pumpe se pogone elektromotorima relativno malih snaga, pa se savremena regulacija ovih pumpi vrši frekventnom regulacijom struje napajanja elektromotora. Frekventnom regulacijom broj obrtaja elektromotora se može, ne samo snižavati, već i povećavati. S obzirom na čvrstoću i rešeno uležištenje broj obrtaja elektromotora se ne sme povećati više od 20% od nominalnog broja obrtaja. Najmanji regulacioni broj obrtaja pumpe definisan je izrazom (7). Pri nižim brojevima obrtaja stepen korisnosti pumpe opada.

Uz ograničenje najmanjeg i najvećeg regulisanog broja obrtaja (n_{min} , n_{max}), najmanjeg dozvoljenog stepena korisnosti pumpe i uslova da pumpa ne sme da uđe u područje nestabilnog režima rada, u dijagramu $H(Q)$ karakteristika za različite brojeve obrtaja kola pumpe izdvaja se područje regulacije napornih karakteristika pumpe (oivičena površina na sl. 4).

Povećanje energetske efikasnosti centrifugalnih pumpi u pumpnim stanicama za vodosnabdevanje gradova je veoma značajno, iz razloga što istraživanja pokazuju, da se na taj način može uštedeti od 11.5÷20% električne energije koja u ceni pijaće vode zauzima najznačajnije mesto. Osim toga, električna energija je jedan od najvažnijih resursa, pa se njenim racionalnim korišćenjem ostvaruje višestruka korist. Evidentna je ekonomska opravdanost ulaganja u frekventnu regulaciju i opremu za optimizaciju rada pumpnih agregata.

5. LITERATURA

1. Petrović Z., Radičević B., Bjelić M., Povećanje energetske efikasnosti pumpnih postrojenja u vodovodu Kraljevo, Industrijska energetika 2004, Donji Milanovac, 2004.
2. Petrović Z. i drugi, Elaborat razvojnog projekta MNT br. 42b – Optimizacija pumpnih sistema za vodosnabdevanje gradova, Mašinski fakultet Kraljevo, 2004.
3. Bogdanović B., Spasić Ž., Bogdanović-Jovanović J., Mogućnosti regulacije režima rada pumpe promenom broja obrtaja s obzirom na ograničenu oblast njenog stabilnog i ekonomičnog rada, Zbornik radova 13. Savetovanja jugoslovenskog društva za hidraulička istraživanja, Soko Banja, 2002.
4. Bogdanović B., Nikodijević D., Vulić A., Hidraulički i hidromehanički prenosnici snage, Mašinski fakultet Niš, 1998.