

Šesta vežba

REGULACIJA PROCESNIH VELIČINA: REGULACIJA PRITISKA PROMENOM BRZINE PUMPE

1. UVOD

U ovoj laboratorijskoj vežbi biće prikazano kako se regulisani elektromotorni pogoni mogu koristiti za regulaciju procesne veličine – pritiska u hidrauličkom sistemu. Za merenje pritiska koristi se standardni industrijski davač pritiska, a regulator procesne veličine je realizovan u upravljačkom algoritmu frekventnog pretvarača. Koristi se frekventni pretvarač čiji je upravljački sistem (softver) prilagođen aplikacijama u pumpnim sistemima.

Cilj vežbe je da se prouči način korišćenja regulatora procesnih veličina i način podešavanja parametara regulatora za objekat upravljanja koji nije unapred poznat.

2. PRIPREMA ZA VEŽBU

Obavezno pročitati teorijsku osnovu o pumpnim sistemima koje je dato u Uputstva za pripremu vežbe br. VI ("Ispitivanje mogućnosti za uštedu energije u pogonu sa pumpom promenom brzine radnog kola pumpe") iz Praktikumuma za elektromotorne pogone. Dokument sa nalazi na Internet prezentaciji Laboratorije za elektromotorne pogone <http://www.pogoni.etf.bg.ac.rs> ⇒ Lab.vežbe / Praktikumumi ⇒ Elektromotorni pogoni ⇒ Šesta vežba).

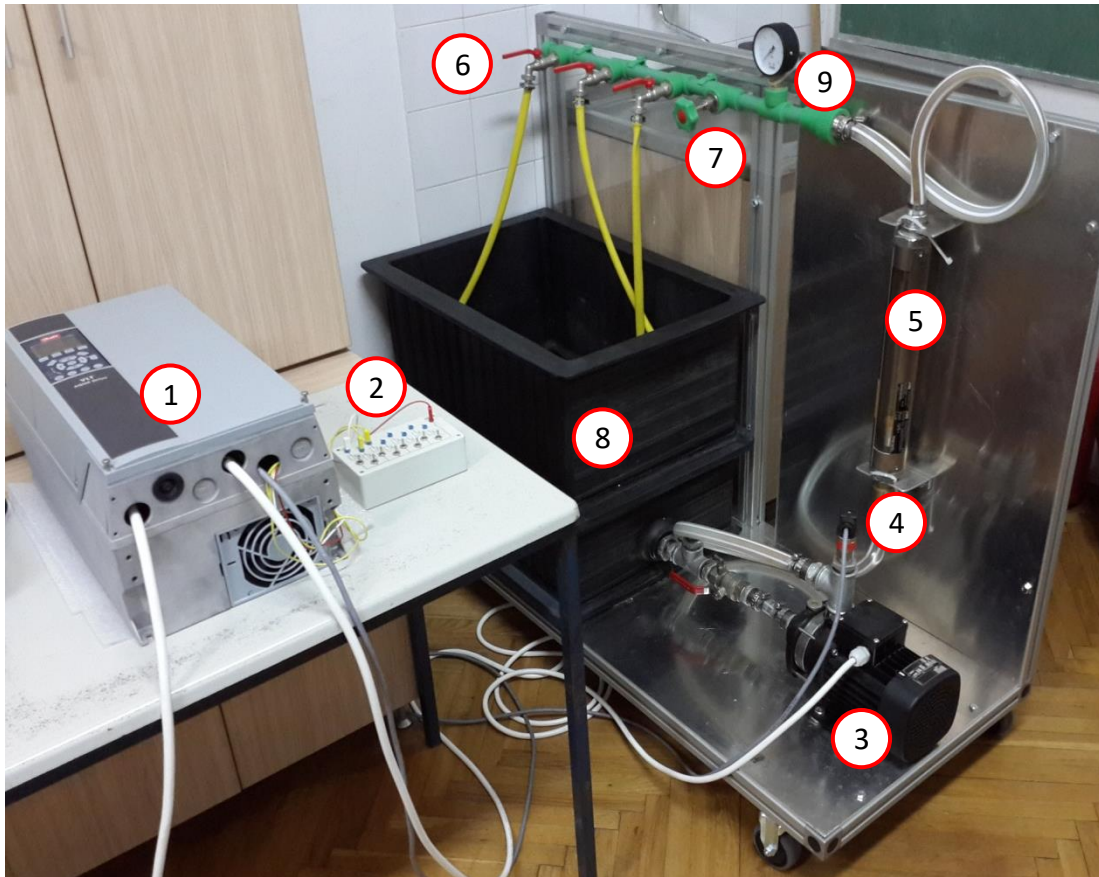
Uputstva za upotrebu korišćene opreme (Danfoss VLT® AQUA Drive FC 202, Pumpa Grundfoss CM1 i davač pritiska Danfoss MBS 3000) i softvera (MCT 10) nalaze se na Internet prezentaciji Laboratorije za elektromotorne pogone: <http://www.pogoni.etf.bg.ac.rs> ⇒ Lab.vežbe / Praktikumumi ⇒ Regulacija elektromotornih pogona ⇒ Sedma vežba.

3. OPIS VEŽBE

Na laboratorijskom modelu grupe, čiji su osnovni delovi sistem sa pumpom i frekventni pretvarač, potrebno je proučiti statičke i dinamičke režime rada regulisanog pogona pumpe sa zatvorenim povratnom spregom po procesnoj veličini u sistemu, u ovom slučaju pritiska.

Eksperimentalna postavka na kojoj se može realizovati regulacija procesnih veličina (pritiska), prikazana je na Slici 1. Celokupan sistem se nalazi na pokretnim kolicima.

Maksimalni protok pri svim otvorenim slavinama i pri učestanosti napajanja motora pumpe od 50 Hz iznosi 80% maksimalnog protoka koji meri senzor protoka. S druge strane, maksimalni pritisak u sistemu iznosi 1,8 bar i nastaje pri učestanosti napajanja motora pumpe od 50 Hz i svim zatvorenim slavinama.

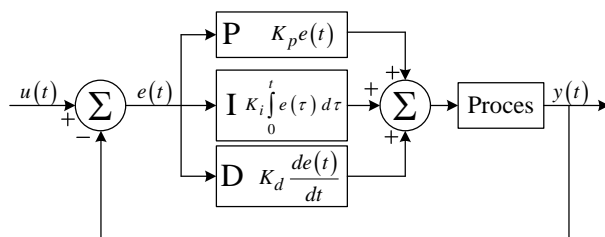


Slika 1: 1. Frekventni pretvarač, 2. Komandni pult, 3. Pumpa, 4. Senzor pritiska, 5. Rotametar – merenje protoka, 6. Tri slavine za izbor sistema, 7. Prigušni ventil, 8. Rezervoar od 120 litara, 9. Manometar

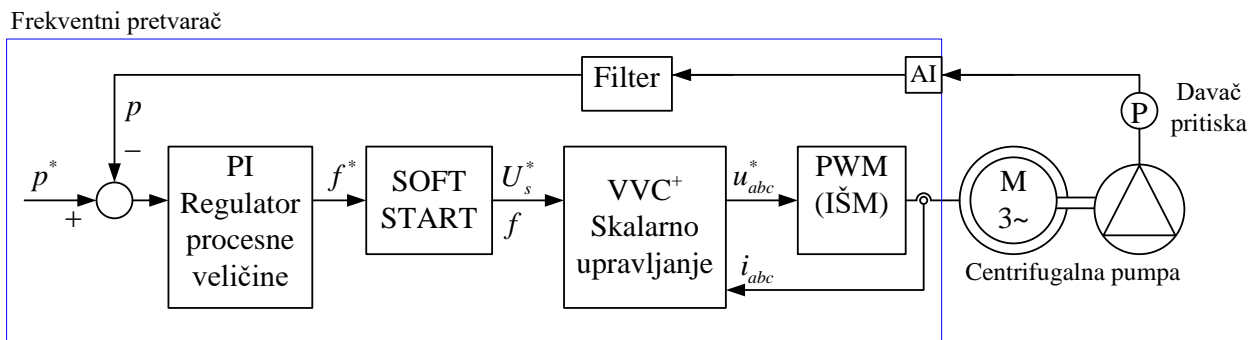
3.1 Sinteza regulatora pritiska

Osnovni zahtevi u regulaciji elektromotornog pogona su: stabilnost, tačnost i brzina odziva. Da bi se regulisao pritisak u hidrauličnom sistemu sa elektromotornim pogonom sa pumpom, koji je predmet analize u ovoj laboratorijskoj vežbi, potrebno je odrediti parametre PID regulatora pritiska, koji je implementiran kao deo upravljačkog algoritma u frekventnom pretvaraču serije VLT® AQUA Drive FC 202 (proizvođač Danfoss). Parametri regulatora pritiska su proporcionalno pojačanje (K_p), integralno pojačanje (K_i) i diferencijalno pojačanje (K_d). Blok dijagram PID regulatora prikazan je na Slici 2, a upravljanje u funkciji greške $e(t)$ je oblika:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t). \quad (1)$$

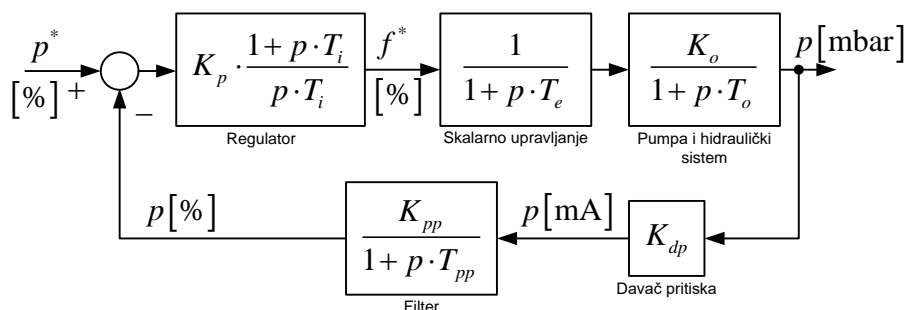


Slika 2. Osnovna struktura sistema upravljanja procesom korišćenjem PID regulatora
Blok dijagram elektromotornog pogona pumpe sa PI regulatorom pritiska, prikazan je na Slici 3.



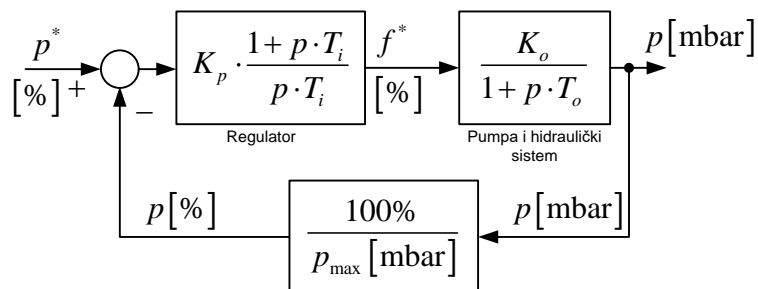
Slika 3. Blok dijagram regulisanog pogona pumpe

Pod pretpostavkom da se objekat upravljanja (pumpa) može predstaviti funkcijom prenosa prvog reda, blok dijagram sa Slike 3. se može predstaviti pomoću strukturnog blok dijagrama sa funkcijama prenosa na način prikazan na Slici 4, na kojoj se može uočiti da su VVC⁺ i PWM modulacija zajedno predstavljeni ekvivalentnom funkcijom prenosa prvog reda sa vremenskom konstantom T_e , kao i filter merenog signala (vremenska konstanta T_{pp}).



Slika 4. Strukturni blok dijagram regulisanog pogona pumpe

Dominantnu ulogu u ponašanju sistema ima blok soft starta, koji ograničava brzinu promene učestanosti, i time sprečava neželjeni rad motora sa rotorskim učestanostima većim od prevalne rotorske učestanosti. Vrednost u bloku soft starta podešava se tako što se unosi trajanje promene učestanosti od nule do nominalne učestanosti. Trajanje promene učestanosti mora biti usaglašeno sa inercijom (mehaničkom vremenskom konstantom pogona), što su najveće vremenske konstante u opisanom pogonu. Imajući to u vidu, a tokom izvođenja vežbe to će biti i prikazano, blok dijagram prikazan na slici 4 može se uprostiti kao na slici 5.



Slika 5. Uprošćeni strukturni blok dijagram regulisanog pogona pumpe ($p_{\max} = 2000$ mbar)

Ukoliko sistemu nije zatvorena povratna sprega po procesu, parametri K_o i T_o se mogu odrediti na sledeći način: za izabrano stanje sistema povećava se učestanost motora pumpe od donjeg ograničenja (limita) u jednakim koracima do gornjeg ograničenja; meri se pritisak kada se uspostavi stacionarno stanje, kao i vreme za koje se uspostavi stacionarno stanje. Dobijena karakteristika je paraboličkog oblika (kvadratna zavisnost pritiska od učestanosti), i predstavlja karakteristiku hidrauličkog sistema. U gornjem delu karakteristike, na osnovu izmerenih vrednosti pritiska može se povući tangenta ili sečica na snimljenu krivu, čiji je koeficijent pravca jednak vrednosti K_o .

Izmerena vremena odziva sistema, za koje se dogodi promena pritiska nakon skokovite promene zadate učestanosti su približno jednaka i to vreme predstavlja vrednost T_o .

Sa određenim vrednostima pojačanja (K_o) i vremenske konstante (T_o), potrebno je odrediti vrednosti pojačanja PI regulatora pritiska. Funkcija prenosa celog sistema sa Slike 5, glasi:

$$F_w(p) = \frac{K_p \frac{1+pT_i}{pT_i} \frac{K_o}{1+pT_o}}{1+K_p \frac{1+pT_i}{pT_i} \frac{K_o}{1+pT_o}} \quad (2)$$

Ukoliko se pretpostavi da je vremenska konstanta T_i jednaka vremenskoj konstanti objekta T_o , funkcija prenosa se svodi na

$$F_w(p) = \frac{1}{1+p \cdot \frac{T_i}{K_p K_o}} \quad (3)$$

Pojačanje PI regulatora pritiska može se slobodno odrediti tako da se ostvari željeni odziv. Odziv sistema će biti aperiodičan, a vreme reagovanja se može podešavati. Vreme reagovanja sistema mora ostati veće od zanemarenih vremenskih konstanti, uvažavajući i uticaj soft starta (ograničenja promene učestanosti napajanja motora pumpe).

3.2 Frekventni pretvarač

Korišćeni frekventni pretvarač pripada specijalizovanoj seriji pretvarača za primenu u hidrauličnim i pneumatskim sistemima, i proizvodi se u opsegu snaga od 0,25 do 1400 kW. Nominalni podaci pretvarača su dati u Tabeli 1.

Aktivna snaga	0,55 kW	max. izlazna učestanost	590 Hz
Napon (fazni)	200 – 240 V	Izlazni napon	0 – 100% ulaznog
Faktor snage	> 0,98	Broj digitalnih ulaza	6
Učestanost napajanja	50 Hz	Broj analognih ulaza	2

Tabela 1. Nazivni podaci korišćenog frekventnog pretvarača

3.3 Pumpa

Pumpa i motor su od 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 m³/h. Broj 2 predstavlja broj impelera. Značenje preostalih brojeva i slova u oznaci pumpe, dato je u katalogu proizvođača.

Motor je trofazni asinhroni i u postavci laboratorijske vežbe, njegovi su namotaji spregnuti u zvezdu. Osnovni podaci o motoru su dati u Tabeli 2.

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

Tabela 2: Osnovni podaci o motoru

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.

3.4 Davač pritiska

U okviru laboratorijske postavke vežbe upotrebljen je senzor pritiska proizvođača Danfoss, tipa MBS 3000 (puna oznaka konkretnog modela je MBS3000-1611-1AB04) koji može da meri pritisak u opsegu od 0 do 4 bar ($\pm 0,5\%$). Signal koji se dobija na izlazu je strujni u opsegu od 4 mA do 20 mA, a napon napajanja je 10-30V. Zavisnost struje na izlazu od pritiska koji se meri je linearna.

3.4 Rotametar – merenje protoka

Instrument za merenje protoka, rotametar, je proizvod švajcarske kompanije „ABB“ i nosi oznaku D10A11. Radi se o meraču protoka koji se sastoji od staklene cevi debljine jednog inča (2,54 cm) i plovka. Na sebi poseduje linearnu skalu za protok od 10 do 100%. Poseduje takođe oznaku za 0% protoka, tako da je moguće utvrditi kada nema protoka, ali nije moguće precizno meriti protoke između 0 i 10%. Merenjima u laboratoriji određeno je da za maksimalnu vrednost skale (100%) protok iznosi 2,66 m³/h (2,66/3,6 l/s).

Potrebno je napomenuti da maksimalni pritisak koji ovaj merač može da izdrži iznosi 14 bar-a.

3.5 Ostala oprema

Cevna instalacija sa ventilima, senzorima, pumpom i rezervoarom je data na Slici 1. Slavine su namenjene podešavanju protoka u toku eksperimenata. Ventil (7) se može koristiti kao prigušni ventil. Pokazivač pritiska je postavljen iz sigurnosnih razloga.

4. ZADATAK

- a) Podesiti parametre pretvarača tako da se ostvari upravljanje brzinom pumpe zadavanjem učestanosti sa lokalnog upravljačkog panela.
- b) Snimiti karakteristiku hidrauličkog sistema i snimljene podatke iskoristiti za određivanje pojačanja i vremenske konstante objekta upravljanja (K_o i T_o).
- c) Realizovati sistem sa zatvorenom povratnom vezom po pritisku. Podesiti parametre regulatora pritiska.
- d) Proveriti ponašanje regulisanog elektromotornog pogona u sistemu sa zatvorenom povratnom spregom po pritisku za različite zadate vrednosti pritiska i u slučaju pojave poremećaja.

5. POSTUPAK

Laboratorijski model, na kome se radi, sastoji se od sistema za kruženje vode sa pumpom, u koji su ugrađeni davači protoka i pritiska i slavine, sa kojima se može uticati na protok vode. Pumpu pokreće trofazni asinhroni motor, koji se napaja preko frekventnog pretvarača. Postoji mogućnost kontrole protoka prigušenjem i promenom brzine radnog kola pumpe.

Frekventnim pretvaračem se može upravljati ručno, preko lokalnog upravljačkog panela (Hand on) ili daljinski (Auto on). Daljinski se može upravljati sa komandne table preko analognih i digitalnih ulaza/izlaza ili serijski, korišćenjem različitih komunikacionih protokola. Izabrano je da se cela vežba izvodi upravljanjem sa lokalnog panela, a da se parametri frekventnog pretvarača podešavaju pomoću računara i softvera MCT 10, korišćenjem USB veze sa pretvaračem. Pre početka merenja prvo treba kompletirati proceduru za puštanje u rad.

a) Procedura puštanja u rad sa lokalnog upravljačkog panela

Uključiti pretvarač dovođenjem na nominalni mrežni napon. Pokrenuti MCT 10 softver na računaru. USB kablom povezati računar i frekventni pretvarač i uraditi sledeće:

- Izabrati opciju *Serial*
- Izabrati opciju *Scan for active drives*

- Kada MCT 10 softver prepozna priključeni frekventni pretvarač na *USB1* portu, levim klikom miša na znak „+” ispred oznake *All Parameters*, dobiće se spisak svih parametara u pretvaraču, organizovanih u parametarske grupe, dok se desnim klikom miša na oznaku *All Parameters* dobija spisak svih parametara u pretvaraču, organizovanih u četiri setup-a. Treba izabrati *Setup 1* za aktivni (parametar P010 *Active Setup 1*) i dalja podešenja parametara vršiti u okviru njega. Kako je u trenutku prepoznavanja priključenog pretvarača softver učitao parametre iz pretvarača, potrebno je samo prekontrolisati vrednosti bitnih parametara:

- U parametru P0-01 izabrati SRPSKI - izbor jezika za prikazivanje poruka na ekranu lokalnog upravljačkog panela
- U parametru P1-00 izabrati OPEN LOOP - podešavanje brzine u otvorenoj sprezi.
- U parametru P1-01 izabrati VVC+
- U parametru P1-03 izabrati VARIABLE TORQUE

Proveriti podatke o korišćenom motoru:

Podatak o motoru	Broj parametra	Vrednost
Nominalna snaga	P1-20	0,45kW
Nazivni napon	P1-22	400 V
Nazivna učestanost	P1-23	50 Hz
Nazivna struja	P1-24	1,20 A
Nazivna brzina	P1-25	2900 rpm
Broj polova motora	P1-39	2

Zatim treba podesiti način upravljanja sa lokalnog upravljačkog panela pritiskom na taster Hand on i podesiti prikaz željenih veličina na lokalnom upravljačkom panelu na sledeći način:

- U parametru P0-20 izabrati Analog Input 54 - ispisuje se vrednost signala sa senzora pritiska [mA]. Oduzimanjem početne vrednosti u iznosu od 4mA od merene vrednosti i množenjem sa konstantom $C=250\text{mbar}/\text{mA}$ dobija se vrednost pritiska u [mbar].
- U parametru P0-21 izabrati Motor Shaft Power [kW].
- U parametru P0-22 izabrati Motor Current [A].
- U parametru P0-23 izabrati Frequency [Hz].

Takođe treba podesiti prikaz vremenskih dijagrama željenih veličina (moment, brzina, analogni ulaz, učestanost) u MCT 10 softveru na sledeći način:

Izabere se opcija *Project, New, Scope Folder*.

Levim klikom miša na znak „+” ispred opcije *Project*, bira se *New Folder 1, Network*, a zatim levim klikom miša na znak „+” ispred opcije *USB1* prikazuje se oznaka priključenog pretvarača. Levim klikom miša na ovu oznaku, otvara se ekran u kome se dvoklikom miša na željenu veličinu vrši njen izbor za prikaz na vremenskom dijagramu. Npr:

1 *Torque %/div (20, 0)*

Desnim klikom miša na *Ch1*, bira se *Properties* i podešava se vremenska osa (*sec/div 5s*)

Desnim klikom miša na prazno polje ispod oznake *Ch1*, bira se opcija *Add channel*, zatim se dvoklikom miša bira druga veličina čiji će se vremenski dijagram prikazivati na ekranu, npr:

2 *Speed rpm/div (600, 0)*

3 *Analog Input 54 mA/div (2, 0)*

4 *Frequency Hz/div (10, 0)*

Ovim je završena procedura puštanja u rad i priprema za merenja koja će se vršiti u nastavku.

b) Snimanje karakteristike hidrauličkog sistema

Maksimalno otvoriti prvu slavinu, zatvoriti drugu i treću, tako da se obezbedi najveći napor u sistemu. Frekventni pretvarač podesiti da radi u režimu ručnog zadavanja učestanosti od 10 do 50 Hz. Pustiti pogon u rad (Hand on). Prilikom snimanja karakteristika očitavaju se učestanost, protok, pritisak, moment i mehanička snaga motora pumpe. Protok se očitava sa rotametra, mehanička snaga i struja motora sa displeja frekventnog pretvarača, a ostale vrednosti sa vremenskog dijagrama koji se prikazuje pomoću softvera MCT 10 na ekranu računara. Očitani rezultati se upisuju u Tabelu 6.1.

Postupak ponoviti za sve učestanosti u koracima od 10 Hz, uz nagle promene učestanosti. Zabeležiti vremenske promene pritiska pri naglim promenama zadate vrednosti iz čega treba odrediti vremensku konstantu T_0 . Izračunati pojačanje sistema na osnovu prave koja spaja merene vrednosti na 30 i 50 Hz.

c) Realizacija sistema sa zatvorenim povratnom vezom po pritisku

Na laboratorijskom modelu treba realizovati regulaciju pritiska primenom frekventnog pretvarača sa zatvorenim povratnom vezom po pritisku. Davač pritiska je povezan na priključke br. 54 i 13 na frekventnom pretvaraču. Postaviti *Setup 2* za aktivni (parametar P0-10 *Active Setup 2*) i u njemu podesiti parametre frekventnog pretvarača za rad sa zatvorenim povratnom spregom na sledeći način:

P1-00 - *Closed loop*

P1-01 - *VVC+*

P1-03- *Variable torque*

P20 - *Drive Closed loop*

P20-00 - *Analog Input 54*

P20-02 - *mbar*

P20-20 - *Sum* - definisanje načina dobijanja vrednosti za izabranu veličinu u povratnoj sprezi (u datom slučaju za pritisak)

P20-21 - *0 mbar* - podešavanjem različitih vrednosti može se korigovati referentna vrednost za pritisak, koja je definisana pomoću digitalnih ulaza 32, 33 i 19, definisanjem unapred podešenih vrednosti (preset referenci).

P5-10 - *Start* - postavljanje funkcije starta na digitalni ulaz 18

P5-11 - *Preset reference on* - izbor unapred podešene vrednosti pomoću digitalnog ulaza 19

P5-12 - *No operation* - definisanje funkcije digitalnog ulaza 27

P5-13 - *No operation* - definisanje funkcije digitalnog ulaza 29

P5-14 - *Preset ref bit 0* - definisanje unapred podešene vrednosti pomoću digitalnog ulaza 32

P5-15 - *Preset ref bit 1* - definisanje unapred podešene vrednosti pomoću digitalnog ulaza 33

P5-19 - *Safe StopAlarm* - definisanje funkcije digitalnog ulaza 37

P3-02 - *0* - definisanje minimalne vrednosti za referencu (minimalna vrednost zadatog pritiska)

P3-03 - *2000* - definisanje maksimalne vrednosti za referencu (maksimalna vrednost pritiska u sistemu iznosi 2000 mbar)

P3-04 - *External/Preset* - način zadavanja reference (referentna vrednost za pritisak u sistemu sa zatvorenim spregom se u slučaju ovog frekventnog pretvarača ne može zadavati sa lokalnog upravljačkog panela, već samo eksterno - pomoću potenciometra ili definisanjem preset referenci).

Preset reference se definišu na sledeći način:

P3-10.0 - *20.00* - uključanjem motora pumpe zadavanjem komande za *Start* (prebacivanjem prekidača koji je vezan na digitalni ulaz 18 u položaj 1) zadaje se referentna vrednost pritiska u iznosu od 20% maksimalne vrednosti pritiska (u konkretnom slučaju $0,2 \times 2000\text{mbar}=400\text{mbar}$).

P3-10.1 - 40.00 - prebacivanjem prekidača povezanog na digitalni ulaz 32 u položaj 1, zadaje se 40% maksimalne vrednosti pritiska (u konkretnom slučaju $0,4 \cdot 2000\text{mbar} = 800\text{mbar}$).

P3-10.2 - 60.00 - prebacivanjem prekidača koji je vezan na digitalni ulaz 32 u položaj 0, a uključanjem prekidača koji je vezan na digitalni ulaz 33 zadaje se referentna vrednost pritiska u iznosu od 60% maksimalne vrednosti pritiska (u konkretnom slučaju $0,6 \cdot 2000\text{mbar} = 1200\text{mbar}$).

P3-15 - *Digital input select* - kao i način zadavanja reference,

Pre puštanja u rad treba podesiti vrednosti pojačanja i vremenske konstante integralnog dejstva PI regulatora pritiska:

Proporcionalno pojačanje regulatora	P20-93 = 1
Vremenska konstanta integralnog dejstva regulatora	P20-94 = 0,1

Podešavanje parametara pretvarača prema podacima o davaču pritiska.

Minimalna vrednost signala (struje u mA)	P6-22 = 4
Maksimalna vrednost signala (struje u mA)	P6-23 = 20
Vrednost pritiska za minimalnu vrednost signala	P6-24 = 0
Vrednost pritiska za maksimalnu vrednost signala	P6-25 = 4000

d) **Provera ponašanja sistema sa zatvorenim povratnom vezom po pritisku**

Podesiti način upravljanja sa lokalnog upravljačkog panela izborom opcije *Auto on* (pritisnuti taster *Auto on* na pretvaraču) i pokrenuti merenja zadavanjem komande za start (uključanjem prekidača broj 1 koji je vezan na digitalni ulaz 18).

Očitati vrednosti sa davača protoka i pritiska. Postupak ponoviti za nekoliko vrednosti referentnog pritiska (npr. 400, 800 i 1200 mbar-a). Očitane vrednosti se upisuju u Tabelu 6.2.

Proveriti ponašanje sistema pri delovanju poremećaja u hidrauličkom sistemu. Poremećaj nastaje otvaranjem odnosno zatvaranjem dodatne slavine (nagla promena potrošnje). Šta se dešava ukoliko se potrošnja naglo smanji? Opisati ponašanje pogona pri delimičnom i potpunom zatvaranju prve slavine (druga i treća slavina su zatvorene).

Da li se menja ponašanje sistema pri pojavi poremećaja za različite vrednosti zadatog pritiska? Objasniti uzrok eventualnog različitog ponašanja sistema.

Napisati zapažanja na osnovu posmatranja vremenskih dijagrama karakterističnih veličina na ekranu računara korišćenjem MCT 10 softvera.

6. IZVEŠTAJ

b) Snimanje karakteristika hidrauličkog sistema.

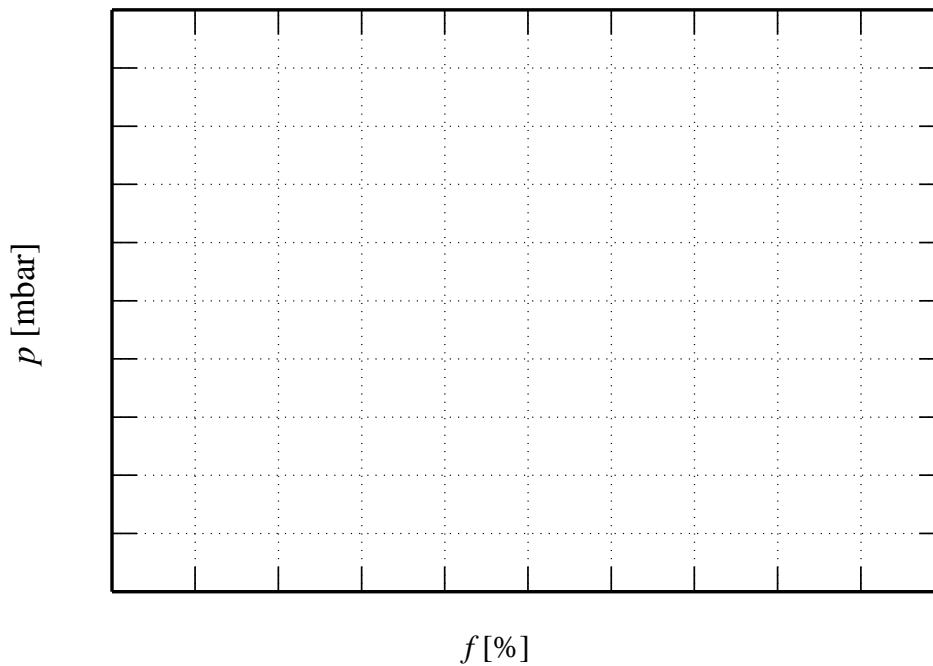
Tabela 6.1

Zadata učestalost [Hz]	Zadata učestalost [%]	Vrednost ulaza AI54 [mA]	Pritisak p [mbar]	Pritisak p [%]	Snaga P [kW]	Moment m_e [%]	Brzina n [o/min]	Protok Q [%]	Trajanje promene $5 \cdot T_o$ [s]
10	20								
20	40								
30	60								
40	80								
50	100								

Izračunavanje pojačanja objekta regulacije K_o

$$K_o = \frac{\Delta p [\%]}{\Delta f [\%]} = \frac{p_{50Hz} - p_{30Hz}}{100\% - 60\%} = \frac{(\text{---}\%) - (\text{---}\%)}{40\%} = \text{---}$$

$$T_o = \text{---}$$



Karakteristika sistema

d) Provera ponašanja sistema sa zatvorenim povratnom spregom po pritisku

Tabela 6.2

Sistem	Referentni pritisak [mbar]			
		400	800	1200
I	Q [%]			
	p [mbar]			
	P [kW]			
	m_e [%]			
	n [o/min]			

Napisati zapažanja i na datim vremenskim dijagramima prikazati odgovarajuće ilustracije.

