

IZBOR DIGITALNOG ZAKONA UPRAVLJANJA U SISTEMU NAMENJENOM ZA REGULACIJU NIVOA

Miodrag Zubić, Radiša Jevremović, Veran Vasić, *Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu*

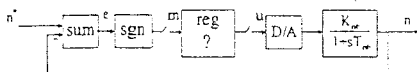
Sadržaj - U radu je izvršena sinteza digitalnog zakona upravljanja u sistemu čije je praktično mesto primene regulacija nivoa tečnosti. Specifičnosti sistema se ogleda u činjenici da digitalni regulator dobija samo informaciju o znaku greške a ne i o njenom iznosu. Zbog toga je u radu diskutovana ova klasa problema. Dati su analiza odzive i određivanje parametara za nekoliko mogućih tipova digitalnog regulatora i predložena je struktura digitalnog regulatora nivoa.

1. UVOD

Sistem koji se razmatra u ovom radu sadrži asinhroni motor (pumpu), davač greške i digitalni regulator. Ono što ovaj sistem razlikuje od uobičajenih je davač greške, koji daje informaciju jedino o tome da li je upravljana veličina veća ili manja od zadate veličine (reference). Ova činjenica onemogućava primenu uobičajenih metoda analize sistema i sinteze digitalnog regulatora koji će obezbediti željenu brzinu odziva i kvalitet ponašanja u ustaljenom stanju. Dakle, raspolaze se samo sa znakom greške, te postoji neumitni rizik od podržanih oscilacija upravljane promenljive. Ove oscilacije je potrebno ograničiti, a ujedno obezbediti i željenu brzinu odziva. U cilju što veće opštosti objekat upravljanja je uprošćen i u modelu predstavljan tipičnim blokom sa kašnjenjem prvog reda. Time se data diskusija svodi na rešavanje ne samo konkretno ovog problema već i problema sa pomenutom specifičnošću. Pred sintezu je u pogledu kvaliteta odziva postavljen zahtev da obezbedi da amplituda oscilacija upravljane veličine u ustaljenom stanju bude manja od 1% u odnosu na maksimalnu zadatu vrednost, a da se pri tome ostvari što veća brzina odziva. Razmotreno je nekoliko mogućih digitalnih zakona upravljanja.

2. REALIZACIJE DIGITALNOG REGULATORA

Model sistema sa uprošćenim objektom upravljanja i digitalnim regulatorom čiji zakon upravljanja treba odrediti, prikazan je na slici 1.



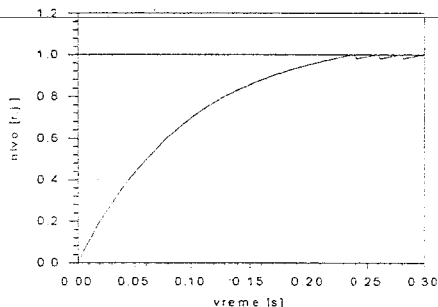
Sl. 1. Uprošćen model digitalnog sistema upravljanja

Za parametre objekta upravljanja usvojene su vrednosti: $K_{ob} = 1$ i $T_{ob} = 0.1$ s.

Analizirani su slučajevi sa proporcionalnim, proporcionalno-integralnim, digitalnim regulatorom koji upravljačku veličinu računa na osnovu tekućeg i šest prethodnih odbraka znaka greške i jednom vrstom digitalnog regulatora sa adaptivnim upravljanjem. Za periodu odabiranja usvojena je vrednost $T = 0.001$ s.

2.1. Proporcionalni digitalni regulator

Digitalni regulator raspolaze samo sa informacinom o znaku greške (+1 ili -1). Kada je reč o proporcionalnom zakonu upravljanja jasno je da se postavljeni zahtevi prevode u što veće pojačanje u periodima kada je upravljana veličina "daleko" od reference i u što manje pojačanje kada je upravljana veličina ušla u stacionarno stanje. Uz to, pojačanje proporcionalnog regulatora mora biti veće, ili bar jednako, maksimalnoj vrednosti reference, da bi upravljana veličina uopšte mogla da dostigne njenu vrednost. Ako se usvoji da je maksimalna referenca 1, i u skladu sa tim nešto veće pojačanje, na primer 1.1, dobije se odziv prikazan na slici 2.



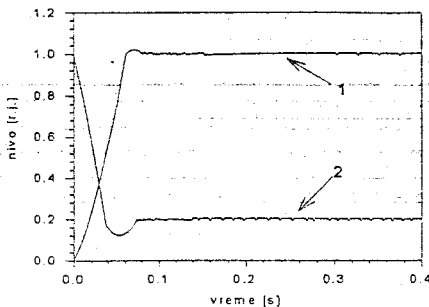
Sl. 2. Odskočni odziv sistema sa proporcionalnim digitalnim regulatorom

Može se uočiti da u pogledu zahteva za kvalitetom ponašanja u ustaljenom stanju, ovakvo rešenje ne zadovoljava jer je amplituda oscilacija u ustaljenom stanju veća od dozvoljene. U trenutku odabiranja nakon što regulisana veličina premaši zadatu, upravljanje postaje jednako negativnoj vrednosti pojačanja te za vreme jedne periode odabiranja regulisana veličina napravi nedozvoljeno veliku promenu. Iz pomenutih razloga digitalni regulator sa čisto proporcionalnim dejstvom ne može da zadovolji postavljene zahteve i ne može se primeniti u ovakvoj regulacionoj strukturi.

2.2. Proporcionalno-integralni digitalni regulator

Motivacija za analizu odskočnog odziva u slučaju primene proporcionalno-integralnog digitalnog regulatora je činjenica da bi se integralnim dejstvom moglo postići manje oscilovanje upravljane promenljive u ustaljenom stanju, kao i napredak u pogledu brzine odziva u odnosu na čisto proporcionalni digitalni regulator. Izgled odziva prikazan je na slici 3. (trag 1), a parametri sa kojima se dobija su: $K_p = 0.9$, $K_i = 0.038$.

Oscilacije upravljane promenljive u ustaljenom stanju su relativno male, a brzina odziva je solidna, s obzirom na vremensku konstantu objekta upravljanja. Kao posledica integralnog dejstva pojavljuje se preskok upravljane promenljive ali njegov iznos ne premašuje okvirne dozvoljenog.



Sl. 3. Odskočni odziv sistema sa proporcionalno - integralnim digitalnim regulatorom

Ozbiljna mana sinteze ovakvog digitalnog regulatora je što ne postoji nikakav postupak za određivanje pojačanja K_I i K_P , pogotovo što je izgled odziva jako osetljiv na njihove promene. U ovom slučaju oni su određeni ugadanjem tako da se dobije što bolji izgled odziva. Međutim, na primer, za prelazni proces prilikom promene reference sa 1 na 0.2, i sa istim pojačanjima kao u prethodnom slučaju, dobije se odziv prikazan na slici 3. (trag 2). Sada je preskok još uočljiviji, čak prevazilazi dozvoljeni iznos od 5%.

2.3. Upravljanje na osnovu tekućeg i šest prethodnih odbiraka znaka greške

Ovaj digitalni regulator treba da obezbedi sledeći zakon upravljanja:

$$u(kT) = a_0 \cdot \text{sgn}\{e(kT)\} + a_1 \cdot \text{sgn}\{e(k-1)T\} + a_2 \cdot \text{sgn}\{e(k-2)T\} + a_3 \cdot \text{sgn}\{e(k-3)T\} + a_4 \cdot \text{sgn}\{e(k-4)T\} + a_5 \cdot \text{sgn}\{e(k-5)T\} + a_6 \cdot \text{sgn}\{e(k-6)T\} \quad (2.1)$$

Ovakvo rešenje bi trebalo da obezbedi veliku upravljačku promenljivu u prelaznom periodu, na primer pri zadatom povišenju nivoa, kada se nagomilaju greške istog znaka. U ustaljenom stanju, kada greška često menja znak, treba da obezbedi da upravljanje bude što bliže referenci. Može se uočiti da ovakav zakon upravljanja predstavlja kompromis između proporcionalnog i integralnog zakona upravljanja, što pri pogodnom izboru koeficijenata a_0, \dots, a_6 treba da istakne prednosti jednog i drugog u odgovarajućim periodima.

Pokazuje se da je oblik odziva prilično osetljiv na vrednosti koeficijenata, te njihovo određivanje "ugadanjem" nije moguće. U ovom radu je primenjena Simpleks metoda za određivanje optimalnih koeficijenata koja minimizira sumu kvadrata odstupanja odziva u trenucima odabiranja, od zadanog odziva. Za zadati odziv, u slučaju da referenca ima oblik step funkcije sa amplitudom 1, usvojena je funkcija:

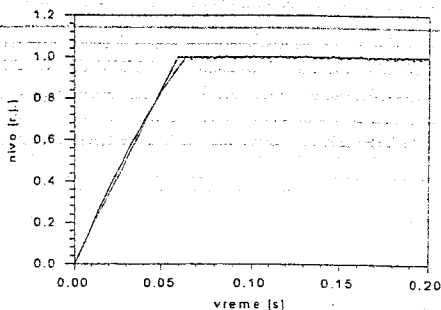
$$f(t) = \begin{cases} t/t_1 & 0 < t < t_1 \\ 1 & t > t_1 \end{cases} \quad (2.2)$$

Izvršeno je nekoliko optimizacija sa različitim vrednosima t_1 . Pokazuje se da se najkvalitetniji odziv dobija u slučaju optimizacije sa vrednošću kolena zadanog odziva postavljenom na $t_1 = 0.06$ s. Pri tome se dobiju koeficijenti:

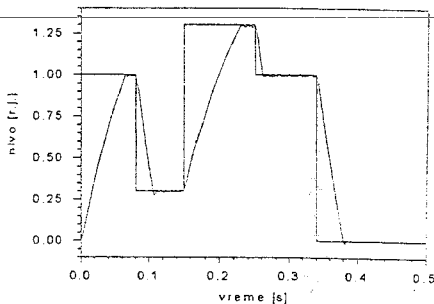
$$a_0 = 1.102 \quad a_1 = 0.300327 \quad a_2 = 0.2099$$

$$a_3 = 0.117926 \quad a_4 = 0.136075 \quad a_5 = 0.152177 \\ a_6 = 0.119776 \quad (2.3)$$

i odziv prikazan na slici 4.



Sl. 4. Odskočni odziv sistema sa optimalnim koeficijenima



Sl. 5. Odziv sistema sa optimalnim koeficijentima pri skokovito promenljivoj referenci

Radi provere ispravnosti zakona upravljanja, izvršena je simulacija u kojoj se referenca menja skokovito nekoliko puta. Izgled reference i odziva prikazan je na slici 5. Kvalitet ponašanja u ustaljenom stanju kao i brzina odziva su zadovoljavajući, što ide u prilog opštosti optimizacionog postupka koji je korišćen.

2.4. Digitalni regulator sa adaptivnim upravljanjem

U delu u kome je razmatrana mogućnost korišćenja proporcionalnog zakona upravljanja, ustanovljeno je da nije moguće istovremeno obezbediti zadovoljavajuće veliku brzinu odziva i male oscilacije u ustaljenom stanju. U ovom delu je razmotrena mogućnost realizacije upravljanja koje prepoznaje režim rada (prelazni proces ili ustaljeno stanje) i na osnovu toga određuje odgovarajući zakon upravljanja aktuelnim.

Način da se prepozna da li je u pitanju prelazni proces ili ustaljeno stanje je, na primer, da se proverava da li su nekoliko prethodnih odbiraka znaka greške istog ili različitog znaka. Ako su istog znaka to znači da je u pitanju prelazni proces, a ako su različitog znaka to znači da je u pitanju ustaljeno stanje. Pri sintezi zakona upravljanja za pojedine režime javlja se problem izbora strukture i parametara zakona upravljanja i njihova povezanost sa ispravnošću prepoznavanja stvarnog režima. Osnovnu poteškoću predstavlja

usklađenosti zakona upravljanja u prelaznom procesu sa ispravnosću prepoznavanja ustaljenog stanja odmah nakon dostizanja reference. Radi jednostavnosti usvojimo da se za prepoznavanje režima posmatra identičnost ili različitost tekućeg i još devet prethodnih odbiraka greške. Naime, ako se dogodi da je u trenutku odabiranja kojim je prethodio prelazni proces upravljanja promenljiva gotovo dostigla referencu, algoritam prepoznavanja će to prepoznati kao prelazni proces. Rezultat toga će biti veliko pojačanje. U narednoj periodu odabiranja regulisana promenljiva će napraviti relativno veliku promenu, odnosno preskok. U sledećem trenutku odabiranja znak greške se menja, prepoznaje se promena režima i prelazi na zakon upravljanja koji važi za ustaljeno stanje. U tom režimu upravljanje treba da bude što blaže da bi se sprečile oscilacije upravljane promenljive, a u isto vreme treba da se izbegne situacija da upravljana promenljiva ne dostigne referencu sa druge strane za devet perioda odabiranja, odnosno da se dobije deset istih znakova greške.

Zakon upravljanja u prelaznom procesu treba da obezbedi što brži odziv i što manji preskok. Da bi se to ostvarilo pogodno je izabrati proporcionalno dejstvo. U ustaljenom stanju zakon upravljanja treba da obezbedi što manje oscilovanje upravljane promenljive što upućuje na integralno dejstvo ili na proporcionalno dejstvo sa malim pojačanjem. Međutim, potrebno je onemogućiti situaciju da u ustaljenom stanju algoritam prepozna deset istih znakova greške, te je opet najpogodnije odabrati proporcionalni zakon upravljanja. Da bi se umanjilo oscilovanje upravljane promenljive u ustaljenom stanju, potrebno je obezbediti da se upravljačka promenljiva menja u što užim granicama oko reference. Ako usvojimo da je opseg mogućih referenci od 0 do 1, onda je pogodno na upravljačku veličinu, koja se dobija množenjem pojačanja za ustaljeno stanje sa -1 ili 1, dodati sredini opsega, odnosno 0.5. Ovim se postiže da upravljanje u ustaljenom stanju bude što simetričnije u odnosu na referencu, za dati opseg referenci, čime se smanjuje oscilovanje upravljane promenljive. Nakon uvođenja oznaka:

T - perioda odabiranja
 T_{ob} - vremenska konstanta objekta upravljanja
 K_u - pojačanje regulatora za ustaljena stanja
 za maksimalnu promenu upravljane promenljive u toku jedne periode odabiranja $(\Delta n_{max})_u$ se dobije:

$$(\Delta n_{max})_u = \frac{T}{T_{ob}} (K_u + 0.5) \quad (2.4)$$

Ako $(\Delta n_{max})_u$ treba da zadovolji uslov $(\Delta n_{max})_u \leq 0.01$ sledi da K_u treba birati tako da je:

$$K_u \leq \frac{T_{ob}}{T} \cdot 0.01 - 0.5 \quad (2.5)$$

što u našem slučaju daje uslov: $K_u \leq 0.5$.

Istovremeno, pojačanje K_u mora biti dovoljno veliko da upravljana veličinu "doveđe" do reference u sledećih devet perioda odabiranja nakon prvog preskoka reference.

Ako sa K_p obeležimo pojačanje za prelazni proces, sa BRT broj odbiraka znaka greške na osnovu koga se prepoznaje režim rada i sa n_{max} maksimalna referentnu vrednost upravljane promenljive, maksimalna promena upravljane promenljive u prelaznom procesu (maksimalni preskok $(\Delta n_{max})_p$) biće:

$$(\Delta n_{max})_p = \frac{T}{T_{ob}} (K_p + n_{max}) \quad (2.6)$$

Da bi upravljanje koje važi u ustaljenom stanju uspešno "doveđe" upravljanu promenljivu do reference za $(BRT - 1)$ perioda odabiranja potrebno je da važi:

$$(\Delta n_{max})_p \leq \frac{T}{T_{ob}} \cdot (BRT - 1) \cdot (K_u + 0.5 - n_{max}) \quad (2.7)$$

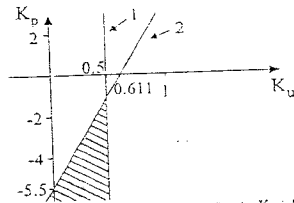
uvažavanjem oboj uslova dobije se:

$$\frac{T}{T_{ob}} (K_p + n_{max}) \leq \frac{T}{T_{ob}} \cdot (BRT - 1) \cdot (K_u + 0.5 - n_{max}) \quad (2.8)$$

što u našem slučaju daje:

$$K_p \leq 9 \cdot K_u - 5.5 \quad (2.9)$$

Oblast parova vrednosti K_u i K_p za koje će prepoznavanje režima rada biti ispravno, prikazana je na slici 6.



Sl. 6. Dozvoljena oblast pojačanja K_u i K_p

Ispravno prepoznavanje režima, time i ispravno upravljanje, sa ovakvim parametrima sistema i upravljanja nije moguće jer oblast dozvoljenih pojačanja ne pokriva ni jedan deo oblasti pozitivnih pojačanja, što je svakako neophodno.

Iz gornjih uslova vidi se da je proširivanje oblasti dozvoljenih pojačanja moguće smanjenjem odnosa T/T_{ob} , odnosno pomeranjem prave "1" udesno. U isto vreme promena tog odnosa ne utiče na pravu "2", jer on ne figurise u uslovu 2.9, po kome je prava dobijena.

Smanjenje odnosa T/T_{ob} može se ostvariti smanjenjem periode odabiranja, ili povećanjem vremenske konstante objekta upravljanja. Efekat povećanja vremenske konstante objekta upravljanja može se izazvati uvrštavanjem u digitalni zakon upravljanja diskretne prenosne funkcije koja vrši kompenzaciju odgovarajućeg pola objekta upravljanja.

Smanjenje periode odabiranja može biti ograničeno mogućnostima realizacije, odnosno sposobnošću mikroprocesora da izvrši algoritam upravljanja, dok uvođenje dodatne funkcije diskretnog prenosa za kompenzaciju povećava ukupna transportna kašnjenja u sistemu. Izbor načina smanjenja odnosa T/T_{ob} zavisi od konkretnog slučaja, a ovde će biti razmotren sledeći, odnosno slučaj sa kompenzacijom pola objekta upravljanja.

\mathcal{Z} - transformacija funkcije prenosa D/A konvertora i objekta upravljanja je:

$$F(z) = (1 - z^{-1}) \cdot \mathcal{Z} \left\{ \frac{1}{s(1 + sT_{ob})} \right\} = \frac{(1 - e^{-T/T_{ob}})}{(z - e^{-T/T_{ob}})} \quad (2.10)$$

Ako se želi kompenzacija pola, odnosno efekat promene vremenske konstante objekta upravljanja T_{ob} na T_{obi} , potrebno je u digitalni regulator uvrstiti funkciju diskretnog prenosa kompenzatora:

$$G_k(z) = \frac{(1 - e^{-T/T_{obi}})}{(z - e^{-T/T_{obi}})} \cdot \frac{(z - e^{-T/T_{ob}})}{(1 - e^{-T/T_{ob}})} \quad (2.11)$$

Rezultat ove kompenzacije je pomeranje granice (prave "1") udesno. Ako izvršimo kompenzaciju sa $T_{obl} = 5 \cdot T_{ob} = 0.5$ s. uslov postaje:

$$K_u < \frac{T_{obl}}{T} (\Delta n_{max})_u - 0.5 = \frac{0.5}{0.001} \cdot 0.01 - 0.5 = 4.5 \quad (2.12.)$$

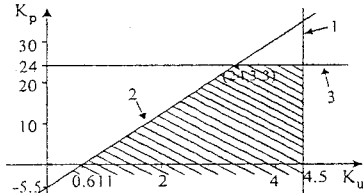
Potrebno je reći da u pogledu dozvoljene oblasti za (K_p, K_u) postoji još jedno ograničenje koje nije ucrtano na slici 6, a vezano je za maksimalni preskok. Ovo ograničenje se dobija iz uslova:

$$(\Delta i_{max})_p > \frac{T}{T_{obl}} (K_p + n_{max}) \quad (2.13.)$$

Ako usvojimo maksimalni preskok 5%, uslov postaje:

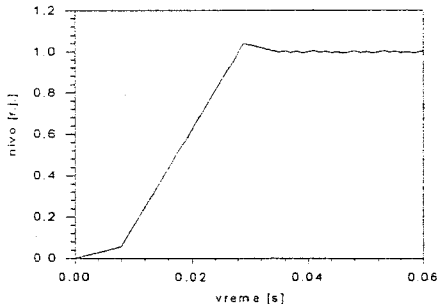
$$K_p < \frac{T_{obl}}{T} (\Delta n_{max})_p - n_{max} = \frac{0.5}{0.001} \cdot 0.05 - 1 = 24 \quad (2.14.)$$

Na slici 7. ovo ograničenje je predstavljeno pravom "3".



Sl. 7. Dozvoljena oblast pojačanja K_u i K_p nakon kompenzacije

Za pojačanja su usvojene vrednosti: $K_p = 24$ i odgo-varajuće gotovo minimalno pojačanje $K_u = 3.3$. Sa ovako usvojenim pojačanjima i sa već navedenim ostalim parametrima sistema, izvršena je simulacija odskočnog odziva sistema čiji je izgled prikazan na slici 8.



Sl. 8. Odskočni odziv sistema sa odabranim pojačanjima

Upravljana veličina dostiže novu zadatu vrednost za najviše 0.03 s, što je znatno brže nego u do sad diskutovanim strukturama digitalnog regulatora. Kvalitet ponašanja u ustaljenom stanju je zadovoljavajući. U ovom slučaju amplituda oscilacija je čak manja od 0.66 % u odnosu na maksimalnu vrednost reference. Preskok je slučajna veličina, a u ovom slučaju je uočljiv jer je trenutak odabiranja neposredno prethodno dostizanju referentne vrednosti.

Izbor broja odbiraka na osnovu kojih se prepoznaje režim (parametar BRT) uslovljen je sa više faktora. Povećanje BRT, sa jedne strane ubrzava prelazni proces, jer

se oblast dozvoljenih pojačanja proširuje (povećava se nagib prave "2" na sl. 7.), dok sa druge strane usporava prelazni proces jer se produžuje period u kome se prepoznaje da je regulisana veličina "daleko" od reference. U prikazanom primeru, povećanje parametra BRT iznad odabranih 10 nema smisla jer je pojačanje za prelazni proces (K_p) već ograničeno sa gornje strane veličinom dozvoljenog preskoka. Smanjenjem parametra BRT ispod 9 došlo bi do smanjenja dozvoljenog K_p , a time i do usporavanja prelaznog procesa.

3. ZAKLJUČAK

Razmatranjem dobijenih rezultata može se zaključiti da priroda problema i nemogućnost primene uobičajenih metoda analize sistema i sinteze digitalnog regulatora, rezultuje nezadovoljavajućim ponašanjem prilikom primene konvencionalnih digitalnih P i Pi zakona upravljanja. Proporcionalnim zakonom upravljanja ne može se postići zadovoljavajuće ponašanje u ustaljenom stanju. Proporcionalno-integralnim zakonom može se postići zadovoljavajući odziv upravljane promenljive, ali je problematičan način za izbor pojačanja P i I dejstva. Osim toga pri istim pojačanjima P i I dejstva ponašanje pri različitim prelaznim procesima može biti različito.

Sledeći način upravljanja, zasnovan na ponderisanju tekućeg i prethodnih šest znakova greške, omogućava dobijanje zadovoljavajućeg odziva upravljane promenljive. Osnovni problem predstavlja neophodnost korišćenja optimizacione metode za određivanje koeficijenata za pondersanje.

Digitalni zakon upravljanja koji prepoznaje režim rada (prelazni proces ili ustaljeno stanje) i na osnovu toga određuje aktuelno pojačanje, pokazuje se kao najbolji. Izborom pojačanja za pojedine režime rada moguće je specificirati željenu brzinu odziva upravljane promenljive kao i amplitudu oscilacija ustaljenom stanju, pod uslovom da se pojačanja nalaze u dozvoljenoj oblasti. U radu je razrađen način za određivanje dozvoljene oblasti za pojačanja, kao i način za njeno proširivanje ukoliko je to u konkretnom slučaju neophodno. Osnovnu prednost ovog načina upravljanja predstavlja postojanje metode za izbor pojačanja i činjenica da se na osnovu odabranih pojačanja unapred zna ponašanje upravljane promenljive.

LITERATURA

- [1] Stojić M. R. *Kontinualni sistemi automatskog upravljanja*, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- [2] Stojić M. R. *Digitalni sistemi upravljanja*, Nauka, Beograd, 1994.

Abstract - Most of level sensors acquire the information on the error sign only, rather than providing to the controller the error amplitude as well. The structure of the fluid level controller is proposed in the paper, along with specific parameter setting procedure designed that obtain the prescribed character of the response and limit the jitter of the driving force. Results are verified by means of extensive computer simulations.

SELECTION OF THE DIGITAL CONTROL LAW FOR THE LIQUID LEVEL REGULATOR

Miodrag Zubić, Radiša Jevremović,
Veran Vasić.